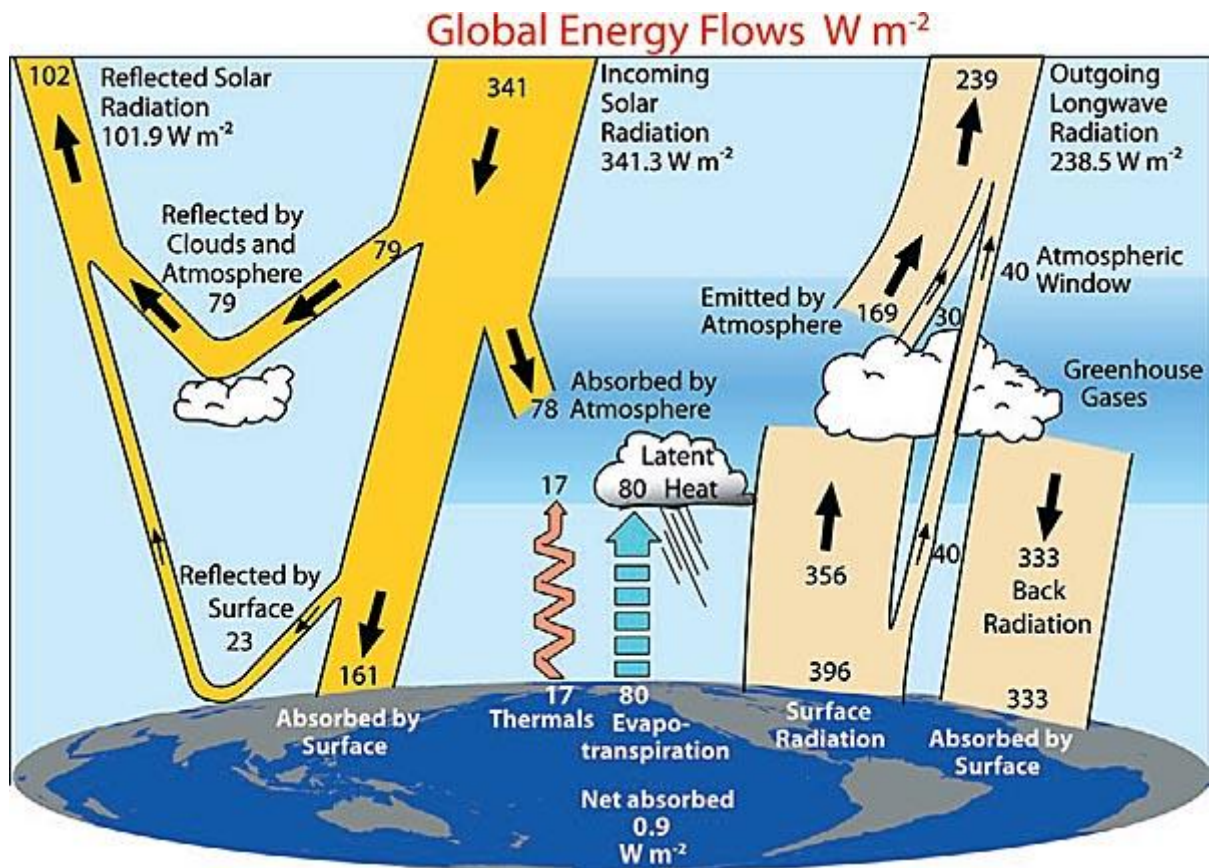


De temperatuur op aarde



Door Sjors Timmermans V6A en Bob Jacobs V6B

Begeleiders: Dhr. De Vos en Dhr. Heil

Profielwerkstuk voor: aardrijkskunde en natuurkunde

Datum: 8 maart 2012

Inhoud

	Blz.
Inleiding	4
1. Theoretische gedeelte	5-33
1.1 De atmosfeer	5-7
1.1.1 Ontstaan van de atmosfeer	5
1.1.2 De functies van de atmosfeer	5
1.1.3 Adiabatische warmteverandering	6
1.1.3 De opbouw van de atmosfeer	6-7
1.2 De Zon	8-14
1.2.1 Kernfusie in de zon	8-9
1.2.2 Het albedo effect	9
1.2.3 Variabele positie aarde t.o.v. de zon	10
1.2.4 Zonnecyclus	10-11
1.2.5 Zonnevlekken	11
1.2.6 Kosmische straling	12
1.2.7 Een duidelijk verband	13
1.2.8 Veranderingen in kosmische straling	13-14
1.2.9 Zonneactiviteit in de afgelopen 400 jaar	14
1.3 Broeikasgassen	15-23
1.3.1 Wat zijn broeikasgassen	15
1.3.2 Het spectrum van de zon en de aarde	15-16
1.3.3 De absorptie van fotonen	16
1.3.4 Het opnieuw uitzenden van fotonen	17
1.3.5 Absorptiespectra	17-18
1.3.6 Water	18-19
1.3.7 Ozon	20
1.3.8 Koolstofdioxide	21-23
1.3.9 Methaan	23
1.4 Stralingsbalans	24-25
1.5 Convectie	26-28
1.5.1 Stijgende lucht	26
1.5.2 Hadley cellen	27
1.5.3 Polaire cellen	28
1.5.4 Ferrelcellen	28
1.5.5 Intertropische convergentie zone	28
1.6 Verdamping	29-33
1.6.1 Verdampingsenergie	29
1.6.2 Herverdamping	29
1.6.3 Factoren	30
1.6.4 Zonuren	30
1.6.5 Wind	30
1.6.6 Temperatuur	30
1.6.7 Wolken	30

1.6.8 Opwarmend of afkoelend?	31
1.6.9 Samenloop verdamping en convectie	32
1.6.10 De droogadiabaat	32
1.6.11 De natadiabaat	33
2. Praktische gedeelte	34-43
2.1 Uitleg van ons practicum	34
2.2 Opstelling	35-37
2.2.1 Algemene opstelling	35
2.2.2 Waterdamp	35
2.2.3 Broeikaseffect	35
2.2.4 Convectie	35
2.2.5 Verdeling van de bakjes	36
2.2.6 PE	37
2.2.7 PMMA	37
2.2.8 Verwachtingen met betrekking tot het practicum	37
2.2.9 Problemen	37
2.3 Metingen	38-39
2.3.1 Practicum 1	38
2.3.2 Practicum 2	39
2.4 Analyse	40-41
2.4.1 Practicum 1	40-41
2.4.1.1 Kwaliteit van de meting	40
2.4.1.2 Waterdamp	40
2.4.1.3 Broeikaseffect	40-41
2.4.2 Practicum 2	41
2.4.2.1 Kwaliteit van de meting	41
2.4.2.2 Convectie	41
2.4.2.3 Waterdamp	42
2.4.2.4 Broeikaseffect	42
2.4.3 Conclusie van het practicum	43
3. Conclusie	44
4. Bronnen	45-49
5. Bijlage	50-51
5.1 Weersomstandigheden tijdens practicum 1	50
5.2 Weersomstandigheden tijdens practicum 2	51
6. Logboeken	52-55
6.1 Logboek van Sjors	52-53
6.2 Logboek van Bob	54-55

Inleiding

In dit profielwerkstuk willen wij graag proberen de verschillende factoren die ons klimaat beïnvloeden uiteen te zetten en te bestuderen. We hebben dit onderwerp gekozen omdat dit ons beiden heel erg interesseert, we er al vaker mee te maken hebben gehad en omdat dit onderwerp veel te maken heeft met zowel aardrijkskunde als natuurkunde, onze favoriete vakken, die wij dan ook willen gaan studeren. Wij willen onderzoeken welke van deze factoren het grootste effect heeft. Wij stellen ons hiertoe de hoofdvraag: “Wat is de belangrijkste factor op aarde die de temperatuur aan het aardoppervlak bepaalt?” Deze hoofdvraag breken we op in een aantal deelvragen:

- “Welke factoren spelen een rol bij de vorming van de temperatuur op aarde?”
- “Wat is de rol van de zon?”
- “Wat is de rol van de broeikasgassen”
- “Wat is de rol van verdamping”
- “Wat is de rol van convectie?”

Eerst bepalen we welke factoren invloed zouden kunnen hebben op onze temperatuur door onze atmosfeer te bekijken. We zullen niet kijken naar relatief constante factoren, zoals de warmte uit de aardkern en de wrijving die onze maan in de aarde veroorzaakt. Er is maar één niet-constante factor voor de temperatuur op het aardoppervlak die zich niet in onze atmosfeer of op de aarde zelf bevindt, namelijk de zon. Deze factor zullen we omschrijven in het hoofdstuk na de atmosfeer. We beginnen zo met inkomende warmte en gaan via een stralingsbalans naar de uitgaande warmte: de warmte die onze planeet kwijt raakt aan de ruimte. Daarna gaan we proberen door middel van een simpel proefje te bepalen welke factor het grootst is.

1.1 De atmosfeer

1.1.1 Ontstaan van de atmosfeer

4,5 miljard jaar geleden, bevatte de aarde een atmosfeer bestaande uit vulkanische gassen. Belangrijke componenten waren waterdamp (H_2O), koolstofdioxide (CO_2), zwaveldioxide (SO_2) en kleine hoeveelheden van andere gassen zoals stikstof (N_2). In deze atmosfeer zou modern leven niet mogelijk zijn geweest. De samenstelling is echter veranderd doordat de gassen in de atmosfeer gingen reageren met de aarde en vloeibaar water. Dit is pas later gevormd, doordat de temperatuur op aarde in het begin te hoog was voor de aanwezigheid van vloeibaar water. Toen de temperatuur dus sterk genoeg was gedaald, ontstonden de oceanen. Doordat er veel waterdamp condenseerde verdween dus een groot deel van de concentratie uit de atmosfeer. Ook de concentratie koolstofdioxide daalde sterk, doordat dit gas oploste in de oceanen en daarna neersloeg tot kalksteen en doordat het werd geabsorbeerd door stenen. Door de afname van waterdamp en koolstofdioxide in de lucht, nam het percentage stikstof in de lucht sterk toe. Dit gas reageert namelijk niet met andere stoffen. Ook het ontstaan van leven droeg sterk bij aan de verandering van de samenstelling van de atmosfeer. Doordat er planten ontstonden, kon er zuurstof worden gemaakt door middel van fotosynthese. Deze zuurstof is niet alleen belangrijk omdat zo complexere organismen konden ademen, maar vooral doordat het de grondstof is voor de vorming van ozon. Dit is een erg belangrijke stof, omdat ozon ultraviolette straling absorbeert, en dus invloed heeft op de temperatuur.

De atmosfeer bestaat voor 78 % uit stikstof, voor 21 % uit zuurstof en de andere 1% bestaat uit sporenelementen. Dit zijn elementen, in dit geval gassen, die in kleine hoeveelheden voorkomen. Deze sporenelementen zijn erg belangrijk voor de temperatuur op aarde. Hiertoe behoren namelijk ook de broeikasgassen (zoals koolstofdioxide en methaan) en het gas ozon. Verder bevat de atmosfeer aerosolen. Dit zijn erg kleine deeltjes materiaal, die zo klein zijn dat ze blijven zweven.

1.1.2 De functies van de atmosfeer

De atmosfeer heeft meerdere functies:

- Bescherming tegen schadelijke straling vanuit de ruimte, zoals ultraviolette straling.
- Energietransport over het aardoppervlak en door de atmosfeer in de vorm van convectie en verdamping.
- Zorgen dat belangrijke kringlopen, zoals de waterkringloop en de koolstofdioxidekringloop, kunnen plaatsvinden.

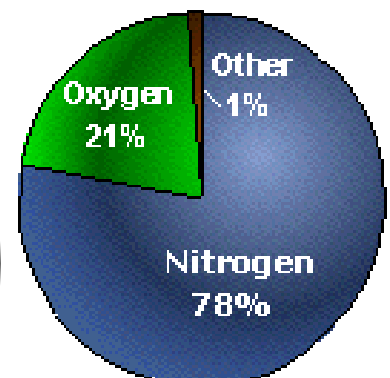


Fig 1. Samenstelling van de aardatmosfeer
Bron: NASA

1.1.3 Adiabatistische warmteverandering

De temperatuur in de atmosfeer verandert door meerdere oorzaken. Een van deze oorzaken is adiabatistische warmteverandering. Adiabatistische warmteverandering is de verandering in temperatuur als gevolg van drukveranderingen. Als de luchtdruk afneemt, zet de lucht uit, waardoor de moleculen langzamer gaan bewegen en de luchttemperatuur afneemt. Dit is adiabatistische afkoeling. Ook het omgekeerde gebeurt. Als de luchtdruk toeneemt, krimpt het luchtvolume, waardoor de moleculen sneller gaan bewegen en de luchttemperatuur toeneemt. Dit is adiabatistische opwarming. Adiabatistische afkoeling en opwarming zijn belangrijke processen in de atmosfeer, omdat de luchtdruk met de hoogte verandert (bij toename van de hoogte daalt de luchtdruk).

1.1.4 De opbouw van de atmosfeer

De atmosfeer is verdeeld in 5 verschillende lagen die elk hun eigen kenmerken hebben. Dit zijn de troposfeer, de stratosfeer, de mesosfeer, de thermosfeer en de exosfeer.

Troposfeer: Dit is de atmosferische laag waarin wij leven. Hij begint bij het aardoppervlak en loopt door tot een hoogte van ongeveer 8 tot 9 km boven de polen en tot een hoogte van ongeveer 12 tot 18 km boven de evenaar. De temperatuur in deze laag neemt progressief af van een gemiddelde van 18°C aan het aardoppervlak tot ongeveer -55°C bij de top (de tropopauze). In de troposfeer is er sprake van adiabatistische afkoeling, omdat de druk afneemt met de hoogte. Door de stijging van warme lucht met een kleine dichtheid en de daling van koude lucht met een grote dichtheid, ontstaan in de troposfeer de meeste weerinvloeden. Daarom wordt de troposfeer ook wel ‘weer laag’ genoemd.

Stratosfeer: In deze atmosferische laag heeft de temperatuur een redelijk stabiel verloop. Aansluitend op de troposfeer verandert deze de eerste 10 kilometer amper, waarna hij langzaam stijgt tot een maximum van rond de 0°C. Dit is ook de laag die de meeste ozon bevat. Deze laag is erg belangrijk voor het leven op aarde, omdat de ozonlaag de meeste ultraviolette straling van de zon absorbeert. Dit is van groot belang, omdat UV straling schadelijk is voor mens, plant en dier. Zo kan langdurige blootstelling aan UV straling huidkanker veroorzaken. Ook nemen oogsten als gevolg van een verhoogde hoeveelheid UV straling af en neemt de hoeveelheid plankton af. Dit is weer van invloed op de temperatuur op aarde, omdat plankton veel CO₂ absorbeert. Aangezien dit een belangrijk broeikasgas is, zou het ontbreken van de ozonlaag ook nog bijdragen aan een versterkt broeikaseffect. Als laatste is ozon ook zelf een broeikasgas.

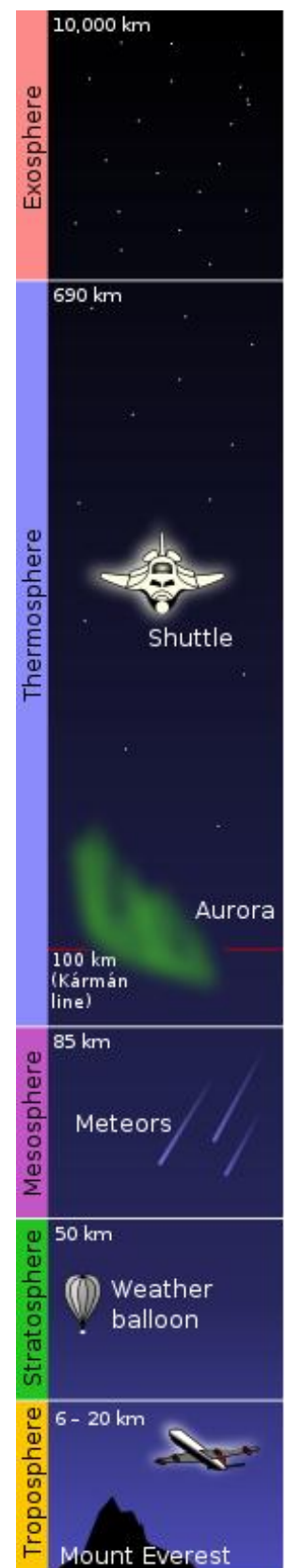


Fig. 2 Samenstelling van de atmosfeer
Bron: Wikipedia

Mesosfeer: In deze laag neemt de temperatuur af tot ongeveer -85°C . Deze afkoeling wordt veroorzaakt doordat de mesosfeer, omdat de lucht hier niet meer zoveel moleculen bevat, niet veel zonnestraling opneemt en dus verder afkoelt, naarmate de afstand tot de warmere stratosfeer afneemt.

Thermosfeer: Dit is de buitenste laag van de atmosfeer. De thermosfeer bevat maar een heel klein deel van het gas in de atmosfeer (minder dan 1%) en de temperatuur neemt toe naarmate de afstand tot het aardoppervlak groter wordt. Dit komt doordat de gasen in de thermosfeer kortgolvlige zonnestraling absorberen, doordat de ultraviolette straling hier moleculen ioniseert, en de thermosfeer dus van bovenaf wordt verwarmd.

Exosfeer: Dit is de buitenste laag van de atmosfeer. Omdat er niet echt een duidelijke grens tussen de exosfeer en de ruimte is wordt de exosfeer echter ook wel eens tot de ruimte gerekend. In deze laag is de deeltjesdichtheid ook erg klein, waardoor moleculen vaak honderden kilometers af kunnen leggen zonder tegen een ander molecuul te botsen. Hierdoor kunnen sommige moleculen, als ze voldoende snelheid hebben, ontsnappen aan de zwaartekracht van de aarde en de ruimte in verdwijnen.

De troposfeer, stratosfeer en mesosfeer worden samen de homosfeer genoemd, omdat er in deze lagen veel moleculen zijn die regelmatig met elkaar botsen. Doordat ze regelmatig botsen worden ze min of meer gelijkmatig verdeeld.

De thermosfeer en de exosfeer worden ook wel de heterosfeer genoemd, omdat deze sferen maar weinig moleculen bevatten. Hierdoor botsen de moleculen niet vaak. Doordat de moleculen niet vaak botsen, dalen de moleculen met een grote dichtheid (zoals stikstof) en stijgen de moleculen met een kleine dichtheid. Hierdoor bevinden de zwaarste moleculen (zoals stikstof) zich onderin de thermosfeer en exosfeer en de lichtste moleculen (zoals waterstof) bovenin. De moleculen in deze sferen zijn dus niet gelijkmatig verdeeld, maar zijn verdeeld in lagen.

Je kunt in de atmosfeer ook nog een andere laag onderscheiden: de ionosfeer. De ionosfeer bevindt zich tussen 50 km en 400 km hoogte. De ionosfeer is zo genoemd, omdat in deze laag kortgolvlige zonne-energie de elektronen van stikstof en zuurstof moleculen weghaalt en er positieve ionen van maakt. De ionosfeer reflecteert de radiosignalen die de mens gebruikt om over grote afstanden kan communiceren.

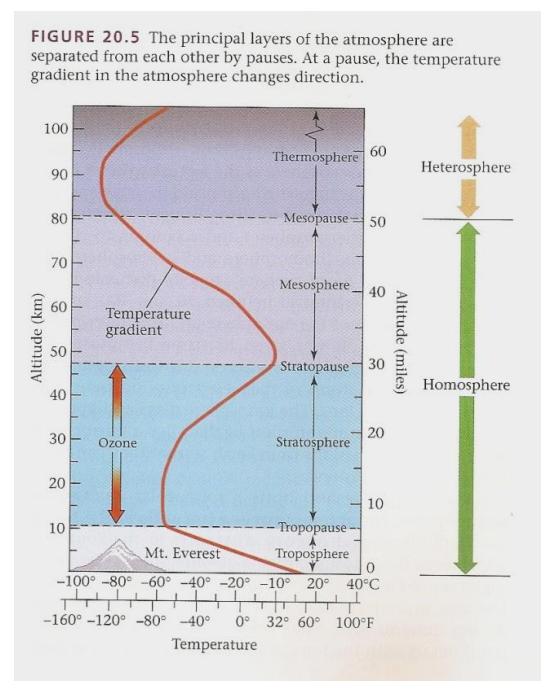


Fig. 3 Temperatuurverschillen in de atmosfeer
Bron: Earth, portrait of a planet

1.2 De zon

Zonder zon zou het op onze planeet bar koud zijn: een paar graden warmer dan het absolute nulpunt (-273,15°C), als de aarde al zou bestaan zonder de zon. De zon zorgt ervoor dat alle planeten van ons zonnestelsel worden opgewarmd. Dit doet ze door straling uit te zenden.

1.2.1 Kernfusie in de zon

In de kern van de zon vindt proton-proton kernfusie plaats: de twee waterstofkernen fuseren met elkaar tot deuterium (waterstof met één neutron en één proton), een elektron en een neutrino (fysisch deeltje): ${}_1^1\text{H} + {}_1^1\text{H} \rightarrow {}_1^2\text{H} + e^- + \nu$. Daarna vindt er een vervolgreactie plaats waarin dat deuteriumatoom reageert met een waterstofatoom tot een helium-3 kern (helium atoom met één neutron en twee protonen) en een γ -foton: ${}_1^1\text{H} + {}_1^2\text{H} \rightarrow {}_2^3\text{He} + \gamma$. In 86% van de gevallen reageren twee van deze helium-3 kernen met elkaar tot één helium-4 kern (helium atoom met twee neutronen en twee protonen) en twee waterstofatomen: ${}_2^3\text{He} + {}_2^3\text{He} \rightarrow {}_2^4\text{He} + 2 {}_1^1\text{H}$. De volledige reactie is hiernaast uitgetekend. In zo'n 14% van de gevallen reageert één zo'n helium-3 kern met één helium-4 kern, een elektron en een waterstofkern tot twee helium-4 kernen, een neutrino en een γ -foton: ${}_2^3\text{He} + {}_2^4\text{He} + {}_{-1}^0e^- + {}_1^1\text{H} \rightarrow 2 {}_2^4\text{He} + \nu + \gamma$.

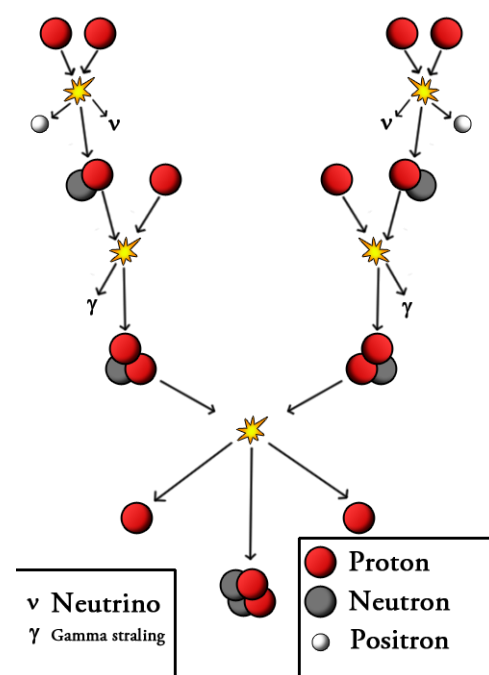


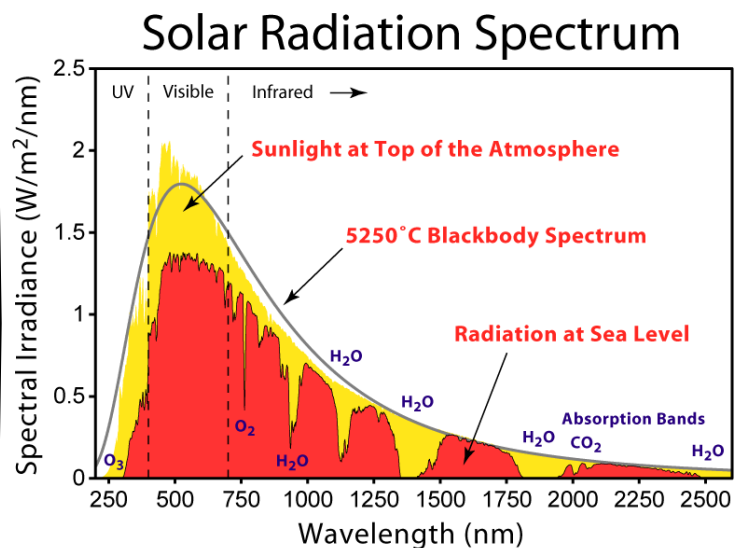
Fig. 4 Proton-proton kernfusie

Bron: Wikipedia

Een mooi bijproduct bij deze kernfusies is de energie die hierbij vrijkomt. Bij 86% van de gevallen komt in totaal 26,73 MeV vrij. Dit valt te verklaren met de bekende formule van Einstein: $E=mc^2$. Deze stelt dat voor elk verlies aan massa er een grote hoeveelheid energie in de plaats komt. Zo is 0,7% van de massa van de waterstofatomen verloren gegaan in deze reactie.

1 MeV is gelijk aan $1,602 \cdot 10^{-13}$ J. Dit lijkt weinig, maar in de zon zijn er miljoenen zulke reacties per seconde. Nadat de energie naar de buitenste randen is gekropen, blijft er in totaal $3,8 \cdot 10^{26}$ J aan energie over dat de zon elke seconde uitstoot. Hiervan bereikt gemiddeld $1,8 \cdot 10^{17}$ J de aarde elke seconde. Ter vergelijking: de gemiddelde inwoner verbruikt $1,0 \cdot 10^4$ J per seconde. Als de aarde een rond vlak was geweest, zou er 1366 Joule op elke vierkante meter aarde komen elke seconde. Dat betekent dat 1366 W/m² zonne-energie op onze aarde valt. De aarde is echter bol, heeft een nachtzijde en draait, waardoor de gemiddelde energie per vierkante meter zo'n 341 W is.

Deze energie bereikt onze planeet in de vorm van fotonen met een bepaalde frequentie. Fotonen zijn pakketjes energie zonder massa. Als een oog fotonen die met een bepaalde frequentie trillen, opvangt, zie je licht. Licht bestaat uit fotonen. De frequentie van de fotonen bepaalt de kleur van licht. Onze zon zendt voornamelijk fotonen met een frequentie die past bij infraroodlicht, zichtbaar licht en ultraviolet licht, zoals hiernaast te zien (het gele vlak), met de meeste hoeveelheid straling in het zichtbare gedeelte van het zogenaamde elektromagnetische spectrum. In de grafiek hiernaast is op de horizontale as de golflengte weergegeven. De golflengte van fotonen is, in dit geval, enkel afhankelijk van de frequentie, en dus kun je de frequentie vervangen voor de golflengte (de lengte van één golf)



Figuur 5: Het lichtspectrum van de zon

Bron: Wikipedia

1.2.2 Het albedo effect

Een groot deel van dit licht wordt weer direct teruggekaatst door de aarde. Het weerkaatsingsvermogen van een object heet de albedo. De aarde heeft een gemiddelde weerkaatsingsvermogen van 37%. Dit betekent dat 37% procent van het invallende licht weer wordt teruggekaatst. Het licht wordt dan door het aardoppervlak, het ijs, de zee maar ook wolken teruggekaatst. In het spectrum van het teruggekaatste zonlicht zijn niet zoveel broeikasgassen actief: er zijn maar weinig broeikasgassen die dit zonlicht weer naar aarde terugkaatsen. Bovendien wordt een groot deel van het zonlicht weerkaatst door wolken. Boven de wolken zijn vrijwel geen broeikasgassen aanwezig, waardoor het zonlicht dat de wolken terugkaatsen geheel de ruimte in gaan. De albedo is echter niet overal op aarde hetzelfde: op de polen wordt vanwege het ijs veel meer zonlicht teruggekaatst. De albedo van landmassa's is hoger dan dat van de zee. Bij verschuiving van de aardplaten verandert dus ook de albedo van de aarde. Stel dat de aardplaten van de evenaar af drijven, dan gaat de albedo van de aarde omlaag, aangezien er meer zonlicht op de evenaar valt. Dit zonlicht wordt dan minder snel teruggekaatst doordat water een lager albedo heeft. Hierdoor stijgt de temperatuur op aarde. Ook de mens heeft de albedo van de aarde beïnvloed door bomen te kappen.

1.2.3 Variabele positie aarde t.o.v. de zon

De hoeveelheid energie die de aarde van de zon ontvangt, is echter niet constant. Een van de oorzaken hiervan is de positie van de aarde ten opzichte van de zon. De aarde maakt een elliptische baan. De mate waarin deze ellips afwijkt van een cirkel is de excentriciteit. Op dit moment heeft de baan van de aarde een excentriciteit van 0,017, terwijl het minimum 0,005 en het maximum 0,028 is. Deze excentriciteit betekent dat er op dit moment 6,8% meer zonne-energie gevangen wordt door de aarde als de aarde het dichtst bij de zon staat, ten opzichte van wanneer de aarde het verst van de zon afstaat. Dit verschil kan oplopen tot 23% wanneer de excentriciteit maximaal is. De periodiciteit van de excentriciteit bedraagt zo'n 100.000 jaar. Door de excentriciteit worden, bij een hoge excentriciteit, de zomers op hogere lengtegraden koeler en zal het ijs van de voorgedane winter niet zo snel smelten. Hierdoor kan een ijstijd veroorzaakt worden. Ditzelfde effect heeft de obliquiteit: de hoek die de aardas maakt met het vlak waarop ze om de zon draait. Deze varieert tussen de 22,1 en 24,5 graden in 41.000 jaar. Bovendien verandert de hoek die de baan van de aarde maakt met het vlak waarin de andere planeten liggen. Zo zouden we hierdoor de laatste tijd meer micro-meteoren krijgen, die extra wolken op zeer grote hoogte creëren. Micro-meteoren zijn dusdanig klein dat ze zo weinig wrijving ondervinden van de aardatmosfeer dat ze niet verdampen en gewoon op grote hoogte, tussen de 80 en 100 kilometer, blijven zweven. Daar trekken ze ijskoude (-125°C) waterdamp aan die zich hierop afzet. Zo vormen zich dus zogenaamde Noctilucent clouds. Maar ook op de zon zelf komen variaties voor.

1.2.4 Zonnecyclus

Elke 11 jaren maakt de zon een zonnecyclus door. In deze 11 jaren keren de magnetische polen van de zon om en wordt de zon actiever en weer minder actief. Deze minima en maxima vallen samen met het aantal zonnevlekken dat te zien is op de zon, zoals hiernaast is weergegeven. In deze 11 jaren varieert de energie die onze aarde opvangt met ongeveer 0,1 %, wat neerkomt op zo'n $1,3 \text{ W/m}^2$ (het gemiddelde is 1366 W/m^2). Ook deze 11 jaren variëren: er zijn

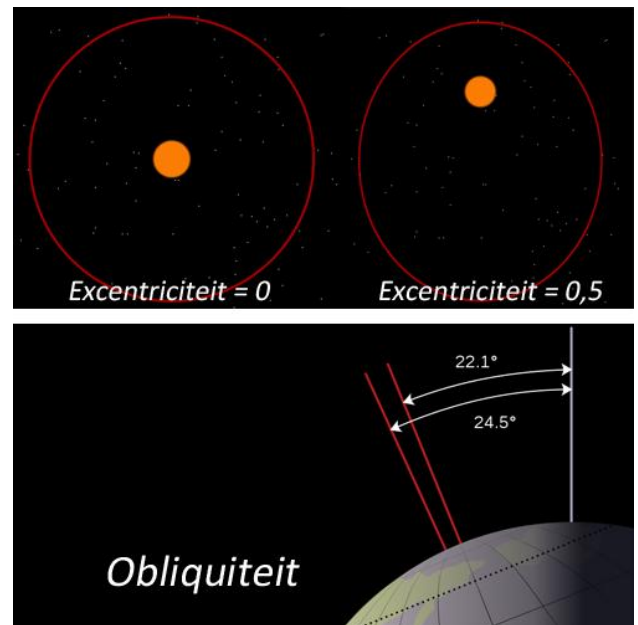


Fig. 6 Excentriciteit en obliquiteit

Bron: Wikipedia

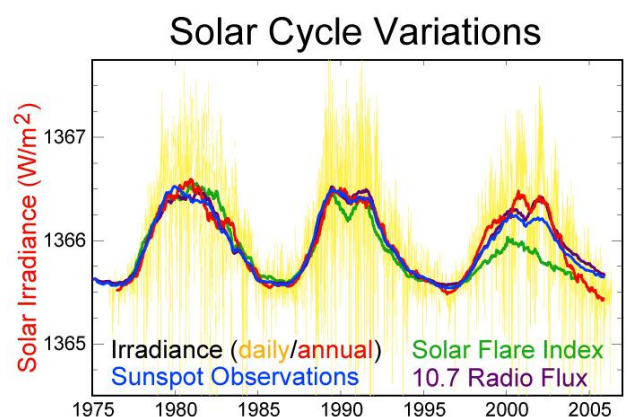


Fig. 7 Cyclische variatie in de zonnesterkte

Bron: Wikipedia

vaak zonnecycli van 9, maar ook van 14 jaar. Daarbovenop varieert de zonneactiviteit ook nog eens onregelmatig door de jaren heen: de laatste 2000 jaar is ze met een extra 0,1-0,2 % gevarieerd, alhoewel we uit metingen weten dat in het verleden veel grotere variaties hebben plaatsgevonden.

1.2.5 Zonnevlekken

Zonnevlekken zijn zwarte plekken op de zon, waar het magnetisch veld van de zon veel sterker is. Ze kunnen vaak gezien worden vanaf de aarde met relatief kleine telescopen, aangezien de vlekken vaak groter dan de aarde zijn. In deze plekken is de oppervlaktetemperatuur lager: zo'n 4000 a 4500 Kelvin (≈ 3700 a 4200°C) tegenover de gewoonlijke 5780 K ($\approx 5500^\circ\text{C}$). Deze vlekken verschijnen eerst dicht bij de polen en trekken dan naar de evenaar van de zon toe. Wanneer de zon in een maximum is, zijn er veel vlekken, wanneer ze in een minimum is, zijn er weinig. Dit wordt geïllustreerd in de afbeelding hieronder.

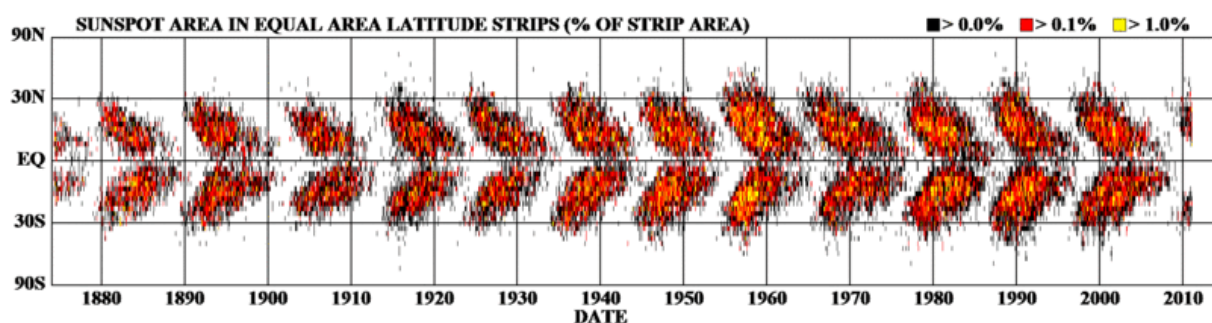


Fig. 8 Zonnevlekken cyclus

Bron: Wikipedia

Ondanks dat het kouder is in deze zwarte plekken, komt er dus wél meer straling van de zon af tijdens een maximum. Dit komt door andere vlekken op de zon: rondom de zwarte vlakken zijn plekken met een hogere temperatuur: fakkelvelden. Op deze plekken wordt het ongeveer 10000 K ($\approx 9700^\circ\text{C}$) heet. Er zijn ook nog andere plekken op de zon die warmer zijn dan normaal. Deze plekken bij elkaar geteld maakt het dat zij voor een grotere extra warmte zorgen dan de zonnevlekken voor extra koelte.

Er zijn gevallen bekend waarin het aantal zonnevlekken een lange tijd vrij laag bleef. Een bekend voorbeeld is het Maunder minimum. Dit viel samen met een tijd van koelte: de Kleine IJstijd. Voor een vrij lange tijd lagen de temperaturen lager dan normaal, terwijl het aantal zonnevlekken voor meer dan 50 jaar 0 bleef. Dit vergroot het vermoeden dat de activiteit van onze zon samenhangt met de temperatuur op aarde.

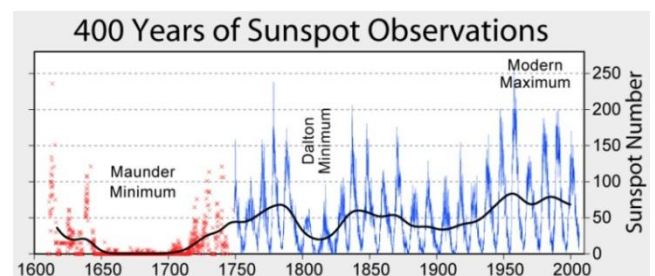


Fig. 9 De zonnevlekken over de laatste 400 jaren

Bron: Wikipedia

1.2.6 Kosmische straling

Daarbovenop komt nog het feit dat een actievere zon zorgt voor meer zonnewind. Deze zonnewind is een stroom deeltjes die bestaat uit protonen en elektronen die door de grote hitte in de corona (de atmosfeer van de zon) kunnen ontsnappen aan de zon. Aangezien een actievere zon een sterker magnetisch veld heeft, zullen er minder kosmische deeltjes in de buurt van de aarde komen.

Kosmische deeltjes zijn fysische deeltjes die uit de ruimte komen. Ze hebben een zeer hoge energie, hoger dan de deeltjes die van de zon afkomen, en zijn waarschijnlijk afkomstig van ontplofte sterren en zwarte gaten. Deze deeltjes zijn vaak ook elektrisch geladen en worden door de Lorentzkracht (een kracht die een magnetisch veld uitoefent op elektrisch geladen deeltjes) van het magnetische veld van de zon een andere kant opgeschoten: het magnetische veld van de zon weert deze deeltjes af. Doordat er minder straling is

dat zwavelzuur polair kan maken door middel van ionisatie, het wegstoten van een elektron van een molecuul, zullen er ook minder condensatiekernen zijn voor water om zich bij te condenseren. Het is een misverstand dat wolken gevormd worden door enkel veel water in de lucht. Water moet zich aan aerosolen, zoals zwavelzuur kunnen vastklampen. Een nevelvat werkt immers op dit principe. Een nevelvat is een afgesloten vat dat oververzadigd is met waterdamp. Maar er is geen wolkvorming, hoeveel waterdamp er ook is. Pas als je straling op dit vat loslaat, worden de moleculen geïoniseerd, waardoor ze waterdamp aantrekken. Zo wordt in een nevelvat nevel of een wolk gevormd. In de atmosfeer gebeurt dit vooral in de onderste laag. Als er minder aerosolen zijn, worden er dus, volgens Svensmark, de bedenker van deze theorie, minder lage wolken gevormd en neemt het weerkaatsingsvermogen van de aarde af. Dan valt er dus meer straling op de aarde, en warmt de aarde op. De afgelopen honderd jaar is het magnetische veld van de zon verdubbeld wat de temperatuurverhoging van deze eeuw heel goed kan verklaren.

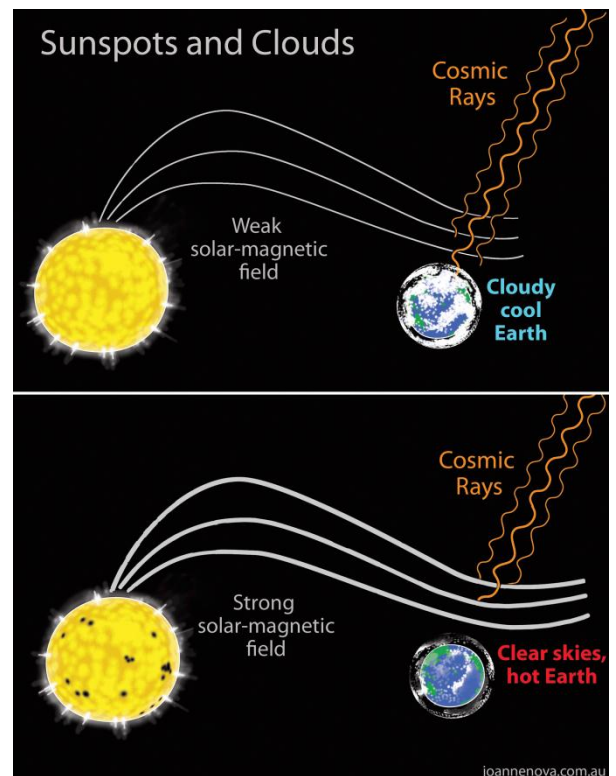


Fig. 10 Een sterkere zon verhit de aarde

Bron: Wikipedia

1.2.7 Een duidelijk verband

Zoals hiernaast valt te zien, lijkt de temperatuur inderdaad een verband te houden met de kosmische straling: wanneer de kosmische straling hoog is, is de temperatuur op aarde laag. De kosmische straling is gemeten aan de hand van de concentraties zeldzame isotopen in ijzermeteorieten (in combinatie met de tijd waarin de meteoriet is blootgesteld aan de straling, gemeten aan de hand van niet-vervallende kernen, zoals neon-21). De temperatuur is gemeten met de ratio $^{18}\text{O}:^{16}\text{O}$ in fossielen in de tropische oceaan. Als er relatief veel ^{18}O (zuurstof met 8 protonen en 10 neutronen) in de fossielen zit, betekent dit dat de temperatuur laag is geweest in die periode. Het lichtere ^{16}O verdampt namelijk eerder de atmosfeer in.

Wanneer de temperatuur laag is, blijft deze ^{16}O bovenop de bergen liggen in de vorm van sneeuw of ijs. Dan is er dus relatief meer ^{18}O aanwezig.

1.2.8 Veranderingen in kosmische straling

Waarschijnlijk is de reden dat de kosmische straling verandert buiten de activiteit van onze zon om, het feit dat ons zonnestelsel zich niet altijd in een ruimte bevindt met dezelfde dichtheid aan (exploderende) sterren. In onze elliptische baan rond het midden van het melkwegstelsel doorkruisen we wel eens vaker een arm van het zonnestelsel. Bovendien beweegt ons zonnestelsel op en neer ten opzichte van het vlak waarop alle sterren liggen. De zon bevindt zich dan boven of onder het vlak met alle sterren. Hierdoor bevindt ons zonnestelsel zich dus wel eens in gebieden waar er meer exploderende sterren zijn, en dus meer kosmische straling. Dit wordt in de afbeelding op de volgende pagina geïllustreerd.

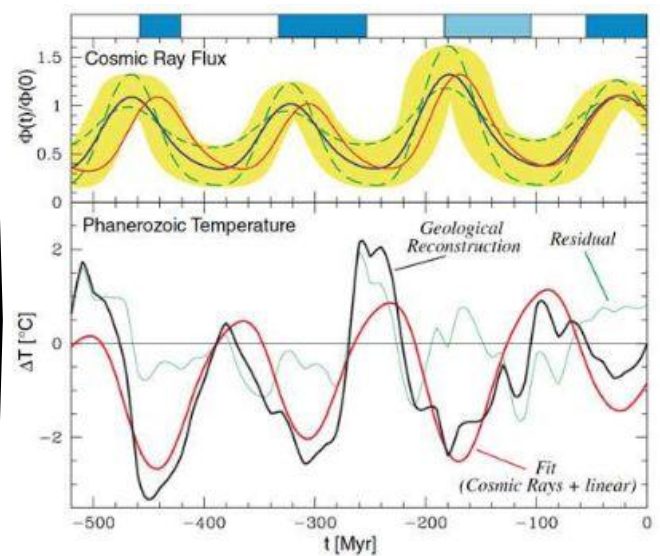


Fig. 11 Kosmische straling versus de temperatuur

Bron: Shaviv

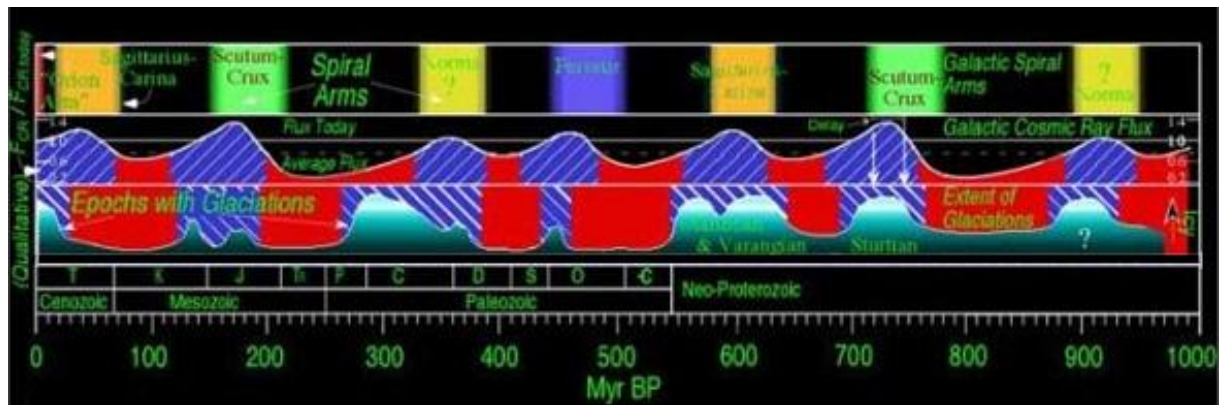


Fig. 12 Kosmische straling

Bron: Shaviv

Op de horizontale as is de tijd uitgetekend met oplopend het aantal miljoen jaar geleden. In de bovenste balk is te zien wanneer we een arm van het melkwegstelsel doorkruisen. In de tweede balk is de kosmische straling uitgetekend, en in de derde de ijstijden. Er lijken duidelijke verbanden te zijn tussen het doorkruisen van een arm van het melkwegstelsel, de kosmische straling en ijstijden.

1.2.9 Zonneactiviteit in de afgelopen 400 jaar

De Chinese onderzoekers Qian en Lu hebben de zonneactiviteit van de afgelopen 400 jaar gemeten aan de hand van ^{10}Be meetgegevens. Deze hebben ze vergeleken met een grafiek die bestaat uit twee sinusgrafieken met een periode van 118 en 175 jaar. Deze periodes corresponderen met enkele cycli die de zon heeft. Hieronder valt deze grafiek te zien. Het is dus vrij duidelijk dat de zonnestraling varieert en een periodiciteit vertoont. Zo is de zonneactiviteit de laatste jaren vrij hoog en komt dit overeen met de relatief hoge temperatuur van de laatste tijd en komen de periodes met lage activiteit overeen met de Kleine IJstijd en het Dalton Minimum.

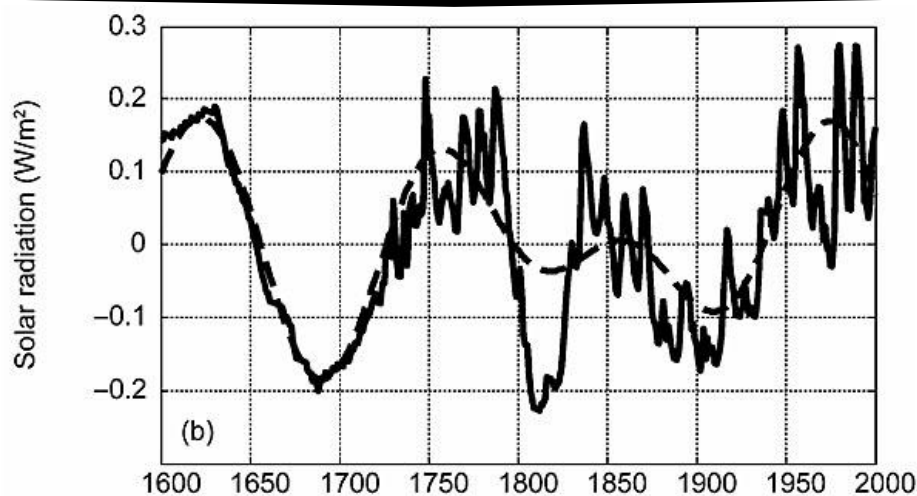


Fig. 13 De cycli van de zon

Bron: Qian en Lu

1.3 Broeikasgassen

1.3.1 Wat zijn broeikasgassen?

Een broeikasgas is een gas dat voor een ongewenste temperatuurstijging op aarde zorgt, aldus de Van Dale. Als we echter geen broeikasgassen in onze atmosfeer zouden hebben, zou het hier bar koud zijn: zo ongeveer $-18/-19\text{ }^{\circ}\text{C}$, waar het nu $14/15\text{ }^{\circ}\text{C}$ is. Broeikasgassen zijn dus niet geheel ongewenst, maar wel gedeeltelijk, omdat het ook té warm kan worden.

Broeikasgassen zijn gassen met een dipoolbinding. Een dipoolbinding is een binding waarbij de elektronen die de binding tussen twee atomen vormen, meer naar het ene atoom dan naar het andere atoom getrokken worden. Zo zijn er bij het ene atoom meer elektronen dan bij het andere en heeft het molecuul aan die kant een hogere lading en aan de andere kant een lagere. Volgens de kwantummechanica absorberen gassen zonder een dipoolbinding, zoals N_2 , O_2 en Ar (de hoofdbestanddelen van de atmosfeer), geen warmtestraling, infraroodstraling. Gassen met een dipoolbinding, zoals CO_2 , H_2O , CH_4 en N_2O , absorberen wél deze warmtestraling, waarna ze deze weer uitzenden. Des te meer dipoolbindingen een molecuul heeft, des te meer straling er wordt geabsorbeerd.

1.3.2 Het spectrum van de zon en de aarde

Zonlicht bereikt de aarde in de vorm van UV-straling, zichtbaar licht en IR-straling, zoals hiernaast is te zien in de vorm van de gele grafiek. De aarde absorbeert ongeveer 239 van de 341 W/m^2 van deze straling, hiernaast weergegeven als de rode grafiek. Zoals te zien is wordt niet al het licht van de zon geabsorbeerd. Dit komt door de verstrooiing van licht, het albedo-effect, absorptie van ozon en door de broeikasgassen, waarover later meer uitleg.

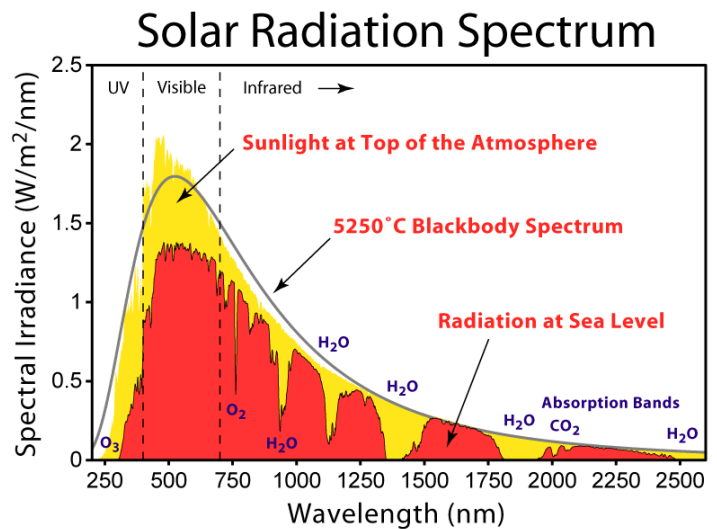


Fig. 14 Het spectrum van de zon

Bron: Wikipedia

Een molecuul van een stof absorbeert alleen licht met bepaalde golflengtes, omdat de energie die licht met die golflengtes bevat precies genoeg is om een elektron in een andere baan te slaan. Het molecuul neemt deze energie dan op. Door het opnemen van deze energie kan een molecuul gaan trillen. De elektronen willen echter zo snel mogelijk terug naar hun oorspronkelijke baan waardoor het (trillende) molecuul de energie weer emitteert in de vorm van één of meerdere fotonen. Dit molecuul gaat dan ook langzamer trillen. Als we ervan uitgaan dat het elektron direct naar de grondtoestand terugvalt, heeft dit foton dezelfde golflengte (en bevat het dus dezelfde energie) als het licht dat het molecuul heeft aangeslagen. Als het elektron echter in meerdere fases terugvalt, ontstaan er fotonen van verschillende golflengtes, waarbij geldt dat de totale energie gelijk is aan de energie die nodig was om het elektron aan te slaan. Dit gebeurt ook met de atomen van de aarde. Deze atomen zenden fotonen uit met een golflengte van infraroodstraling. Het overgrote deel van deze fotonen heeft dus een golflengte die veel langer is dan de golflengtes die de zon uitzendt, namelijk 15 μm . Dit verschil is geïllustreerd in de afbeelding hier rechtsboven.

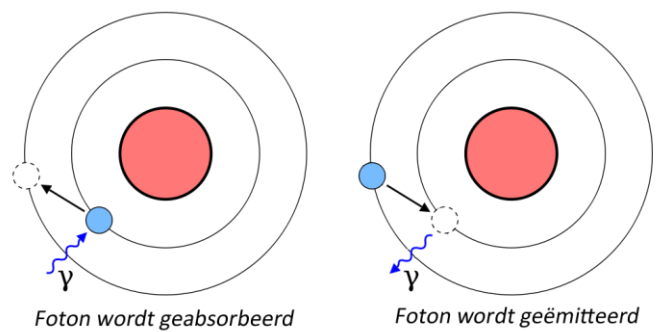


Fig. 15 Een atoom en zijn elektron

Bron: Wikipedia



Fig. 16 Het spectrum van de zon en van de aarde

Bron: Klimaatgek.nl

1.3.3 De absorptie van fotonen

Een ander effect van het absorberen van fotonen is dat de vibraties van moleculen worden beïnvloed. Het energieverschil tussen de verschillende vibraties is afhankelijk van de moleculen. De rotatie van de molecuul kan veranderen, maar ook de trilling tussen de atomen. Hiervoor is de dipoolbinding nodig. Bij deze verandering in vibratie verschuift dan de verdeling van de negativiteit, de elektrische lading, van het molecuul. De mate waarin dit verschoven wordt, bepaalt de intensiteit van de absorptie en dus de frequentie van de foton die wordt geabsorbeerd. Deze frequentie is gelijk aan de frequentie van de trilling van de binding.

1.3.4 Het opnieuw uitzenden van fotonen

Nadat de fotonen zijn geabsorbeerd worden ze direct weer geëmitteerd. Het absorberen van fotonen en emitteren ervan gebeurt in onze atmosfeer: daar absorberen moleculen van broeikasgassen de langgolvlige straling, gaan trillen en zenden de fotonen in exact die frequenties weer uit. Deze fotonen zenden ze alle kanten uit, dus zowel naar boven als naar onder, richting de aarde. Een deel van de straling die de aarde heeft uitgezonden gaat dus de aardatmosfeer uit en een deel wordt teruggekaatst om zo de aarde op te warmen. Dit kennen we als het broeikaseffect.

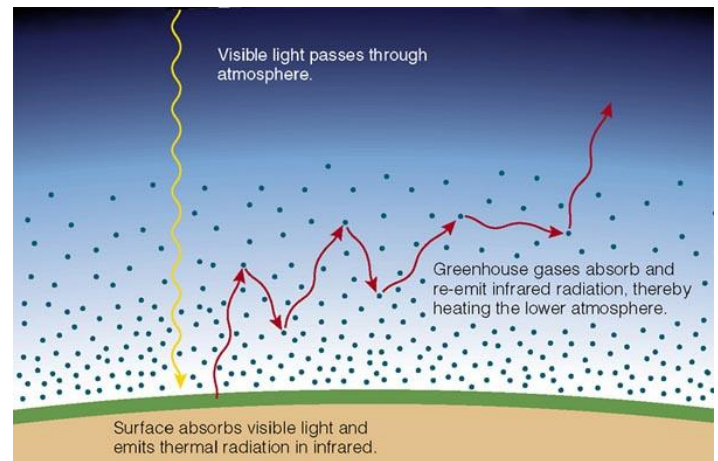


Fig. 17 Het opnieuw uitzenden van straling in de atmosfeer

Bron: University of Colorado

Des te hoger je in de atmosfeer bent, des te minder moleculen er om je heen zijn. Dit geldt ook voor broeikasgassen. Boven de 15 km zijn er zo weinig broeikasgassen nog over, dat de straling vrijwel ongehinderd weg kan gaan naar de ruimte. Bovendien bevindt een van de belangrijkste broeikasgassen, H_2O , zich voornamelijk in de troposfeer. Zo wordt slechts het onderste deel van de atmosfeer (en ook het aardoppervlak) verwarmd, maar niet de atmosfeer boven de troposfeer.

1.3.5 Absorptiespectra

Een absorptiespectrum is een spectrum waarin donkere lijnen voorkomen. Deze lijnen wijzen erop dat een bepaalde golflengte wordt geabsorbeerd. Doordat elk molecuul fotonen met andere frequenties absorbeert, behoren bij verschillende stoffen ook verschillende absorptiespectra. De absorptiespectra van enkele broeikasgassen zijn hiernaast weergegeven. Er valt te zien dat elke stof kenmerkende banden van absorptie heeft. Als je de grafieken neemt van al de stoffen die in de atmosfeer zitten en IR-straling absorberen, krijg je de onderste grafiek. Hierop is dus te zien bij welke golflengten er straling wordt geabsorbeerd. Ook valt er te zien dat er zo rond de $10\text{ }\mu\text{m}$ geen enkele stof licht absorbeert. Dit wordt het atmosferisch venster genoemd en valt zeer toevallig samen met de golflengte waarop de grootste hoeveelheid straling door de aarde wordt geëmitteerd. Dit betekent dus dat deze straling ongehinderd de ruimte in kan gaan.

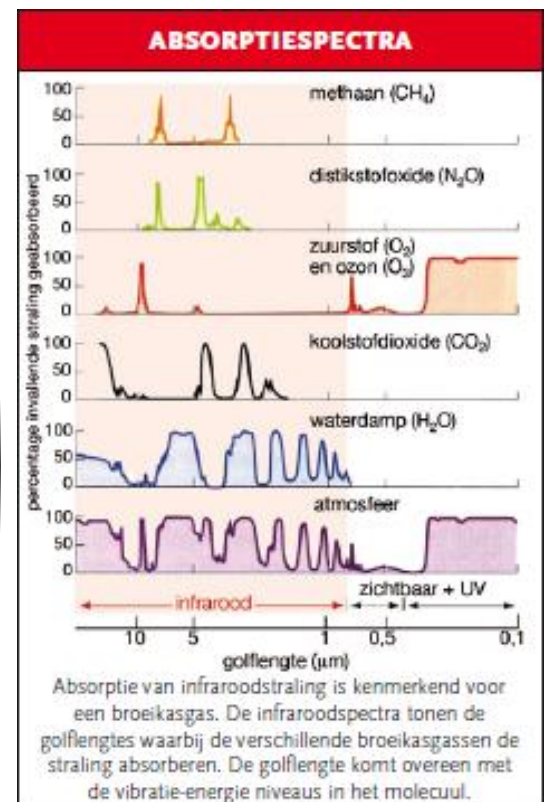


Fig. 18 Absorptiespectra

Bron: Chemische feitelijkheden

In de grafiek hiernaast valt de emissie van infraroodstraling door het systeem aarde (de aarde en de aardatmosfeer) te zien (de grillige lijn). Over het algemeen komt de grafiek overeen met die van een object met een temperatuur van 290 K ($\approx 17^\circ\text{C}$), bijna hetzelfde als de gemiddelde temperatuur op aarde, namelijk 288 K. Het dipje bij een golflengte van $10\text{ }\mu\text{m}$ (zie onderste schaal) wordt veroorzaakt door ozon. Op die

golflengten absorbeert ozon dus een deel van de straling die de aarde uitzendt. Hierdoor kan zo'n 30% van de straling niet naar buiten en wordt het weer naar de aarde teruggekaatst, zodat het de aarde op kan warmen. Ook is er een heel grote dip te zien tussen de $14\text{ }\mu\text{m}$ en $18\text{ }\mu\text{m}$. Deze wordt veroorzaakt door CO_2 . Zoals te zien valt, is de straling die hier weer teruggekaatst wordt naar de aarde vrij groot. Dit is dan ook de reden dat er overal minder CO_2 uitgestoten dient te worden. De straling met golflengten tussen de $14\text{ }\mu\text{m}$ en $18\text{ }\mu\text{m}$, en dat is veel, zoals je kunt zien aan de hoogte van de 300 K lijn, wordt teruggekaatst en warmt onze aarde op. Wat echter minder opvalt, is de dip tussen de 5 en $8\text{ }\mu\text{m}$. Hier absorbeert waterdamp de straling.

1.3.6 Water

Een watermolecuul bestaat uit één zuurstofatoom en twee waterstofatomen. De binding tussen deze atomen bestaat uit elektronen. De zuurstofatomen trekken echter harder aan deze elektronen dan de waterstofatomen. Daardoor is een watermolecuul aan de kant van het zuurstofatoom sterker geladen dan aan de kanten van de waterstofatomen. Hier is sprake van twee dipoolbindingen. Watermoleculen kunnen dus infraroodstraling absorberen. Water komt op een normale manier in de lucht: het water van de oceanen verdampt en komt zo in onze troposfeer terecht. Echt hoger dan de troposfeer komt het niet: 99,13% van de waterdamp blijft onder de 15 km. Een andere manier om in de lucht te komen is via uitbarstingen van vulkanen.

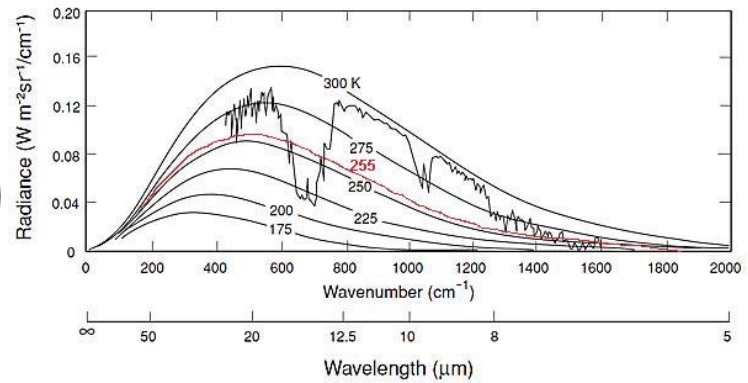


Fig. 19 Het emissiespectrum van het systeem aarde

Bron: K.N.Liou

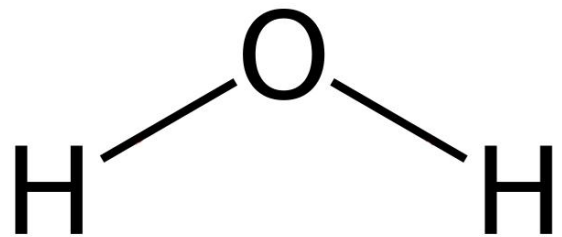


Fig. 20 Een watermolecuul

Bron: Wikipedia

In de grafiek hiernaast is het gedeelte van 5 t/m 8 μm vergroot. Duidelijk is te zien dat hier ook zeer veel straling wordt geabsorbeerd ten opzichte van de normale straling (de 'lijn' die loopt op de hoogte van 290 K). Deze straling die waterdamp tegenhoudt is volgens schattingen echter wel 66 tot 85% van de straling die door broeikasgassen wordt tegengehouden. Dit tegenover 3,618% door CO_2 . En aangezien slechts 3,225% hiervan door de mens in de atmosfeer is uitgestoten, heeft de mens, in de vorm van CO_2 , een effect op de totale opwarming van de aarde van 0,117% gehad. Van alle 33°C die de aarde door de broeikasgassen warmer wordt, komt 0,28% rechtstreeks door de mens, meegerekend de andere broeikasgassen. Hier zijn enige terugkoppelingen van waterdamp niet meegerekend. Bij een hogere temperatuur door een toename van CO_2 , kan de atmosfeer meer waterdamp opnemen. Deze verhoogde concentratie waterdamp zorgt dan ook weer voor meer teruggekaatste straling en warmt de aarde dus nog meer op. Als de temperatuur stijgt van 15°C naar 20°C , dan zal de hoeveelheid waterdamp die de lucht kan houden hierna stijgen met maar liefst 35%. Dit heeft dus een grote impact op de temperatuur op aarde: als de temperatuur door een toename van CO_2 met 1 graden zou stijgen, zou de temperatuur door de invloed van waterdamp met 1,6 graden stijgen. Ook blijft een koolstofdioxidemolecuul veel langer in de atmosfeer dan een watermolecuul (100 jaar tegenover de 9 dagen van water). Hierdoor heeft een koolstofdioxidemolecuul langer effect op de temperatuur op aarde dan waterdamp.

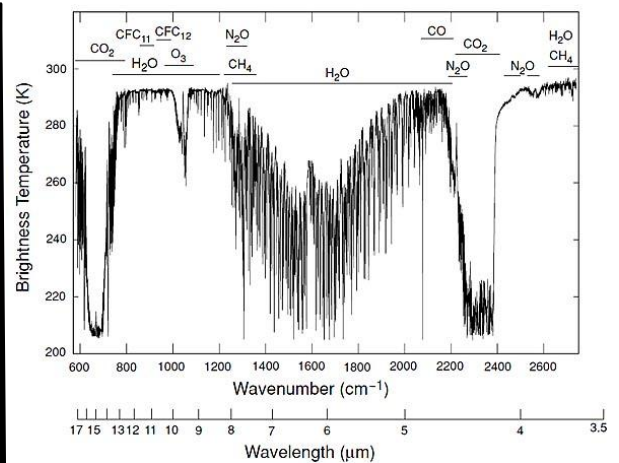


Fig. 20 Het spectrum van de aarde van 5 t/m 8 μm

Bron: K.N.Liou

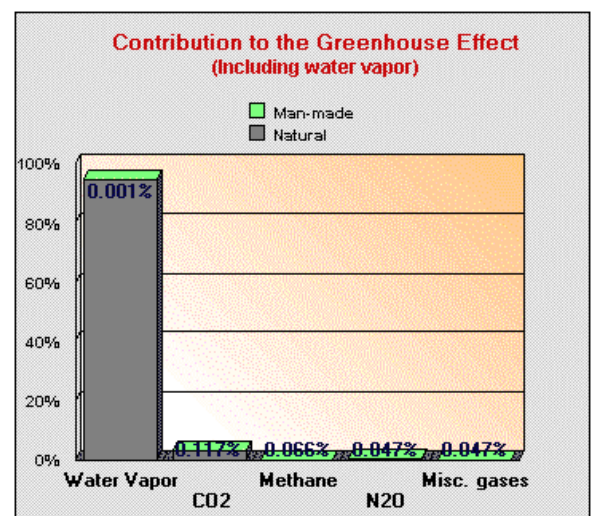


Fig. 21 Bijdrage aan broeikaseffect

Bron: Geocraft

1.3.7 Ozon

Ozon is een molecuul dat bestaat uit drie zuurstofatomen. Normaliter heeft een zuurstofatoom twee bindingen. Uit metingen blijkt echter dat ozon géén driehoek vormt. Dit betekent dus dat niet elke zuurstofatoom twee bindingen kan hebben. Om de buitenste twee zuurstofatomen twee bindingen te laten hebben, moet het middelste atoom 4 bindingen hebben. Dit is echter onmogelijk. Zo blijkt dat er één atoom is dat twee bindingen met het middelste atoom heeft en één atoom met één binding met het middelste atoom, zoals hiernaast geïllustreerd is. Elk puntje stelt een vrij elektron voor. Bij het

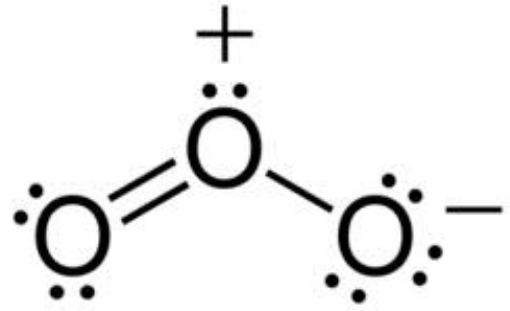


Fig 22. Een ozon molecuul

Bron: Wikipedia

rechteratoom zitten 3 vrije atoomparen, terwijl er bij de middelste zuurstofatoom maar één vrij atoompaar zit. Dit molecuul heeft dus een dipoolbinding (aangegeven met de min waar er een grotere negatieve lading is en met een plus waar een grotere positieve lading is). Deze twee atomen kunnen dus vibreren en infraroodstraling absorberen. Dit zorgt voor de absorptielijn die te zien is bij de 10 μm in figuur 20. Ozon absorbeert echter in totaal niet zoveel straling aangezien het vooral op tussen de 15 en 30 kilometer hoogte zit. Hier zijn er maar weinig deeltjes, en dus ook weinig ozon deeltjes per kubieke meter. Dit betekent dat er maar vrij weinig ozon is. Ozon absorbeert ook veel Uv-straling, waardoor er ook minder straling op de aarde valt.

Als er ultraviolet straling op een aantal zuurstofmoleculen valt, wordt ozon gevormd. Deze ozon bevindt zich in de ozonlaag tussen 15 en 30 kilometer hoogte. Het wordt over het algemeen afgebroken door moleculen met chloor- of broomatomen in het molecuul. Een voorbeeld hiervan is een CFK. Onder de ozonlaag bevindt zich ook ozon. Deze wordt over het algemeen gecreëerd door de reacties van stikstofoxiden, koolstof mono-oxide en vluchtige organische stoffen met zuurstof onder invloed van zonlicht. Veel van deze stoffen komen uit de uitlaat van auto's. Deze ozon wordt weer afgebroken door uv-straling en aldehyden. Zo kan deze ozon smog vormen.

Boven de zuidpool is er een ozongat: daar is zeer weinig ozon in de atmosfeer te vinden. Hierdoor koelt de stratosfeer af. De straalstroom, een westelijke passaat op grote hoogte, zou hierdoor zijn toegenomen. Deze stroom zou dan de warmere lucht, die hier normaal gesproken stroomt, hebben geblokkeerd.

1.3.8 Koolstofdioxide

Koolstofdioxide bestaat uit één koolstofatoom en twee zuurstofatomen. De moleculen liggen in één lijn en is dus, netto, niet dipolair. Toch trekken de zuurstofatomen harder aan de elektronen dan het koolstofatoom. Een koolstofdioxidemolecuul kan dus wél infraroodstraling absorberen maar kan slechts op drie manieren vibreren, zoals hiernaast weergegeven. De bovenste is koolstofdioxide in normale staat. De onderste vibratie absorbeert geen infraroodstraling. Hierbij verandert de negativiteit van het molecuul namelijk niet: de negativiteit blijft in het midden.

Zoals we allemaal wel weten komt er veel CO₂ in de lucht door de verbranding van fossiele brandstoffen. Andere, natuurlijke bronnen van CO₂ zijn vulkaanuitbarstingen, bosbranden en uitwisseling van CO₂ met de oceaan. Ook wij mensen stoten CO₂ uit, maar dit behoort tot de natuurlijke bronnen. Zo'n 0,039% van alle moleculen in de aardatmosfeer is een koolstofdioxidemolecuul. Dit percentage is echter niet hetzelfde als in de tijd dat we nog geen CO₂ uitstootten. Zo was het de afgelopen honderdduizenden jaren normaal dat in de tijd van een ijstijd dit percentage 0,018-0,021% was, en tussen de ijstijden in 0,028-0,030%. Dit laatste percentage is gelijk aan het percentage koolstofdioxide in de lucht voordat we CO₂ begonnen uit te stoten. Er is echter ook bewijs dat dit percentage miljoenen jaren geleden nog véél hoger is geweest. Zo zou het tussen 600 en 400 miljoen jaar geleden ongeveer 0,6% zijn geweest. Een toename van koolstofdioxide heeft echter geen recht evenredig verband met de toename van de temperatuur: De eerste 20 ppm (deeltjes per miljoen deeltjes) zorgen voor de grootste temperatuurstijging. Als er al 300 ppm in de atmosfeer zitten, zullen de volgende 20 ppm niet zo'n groot effect hebben als de eerste. Dit komt doordat al een groot deel van de infraroodstraling wordt geabsorbeerd door de koolstofdioxide die er al is. Als er dan nóg meer



Fig. 23 Een koolstofdioxide molecuul

Bron: Wikipedia

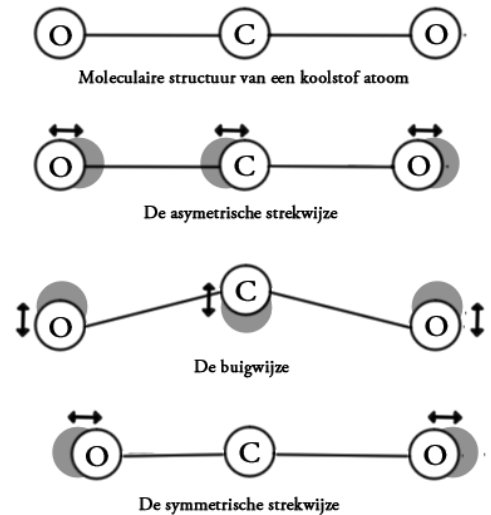


Fig. 24 De vibraties van koolstofdioxide

Bron: Derek Kverno

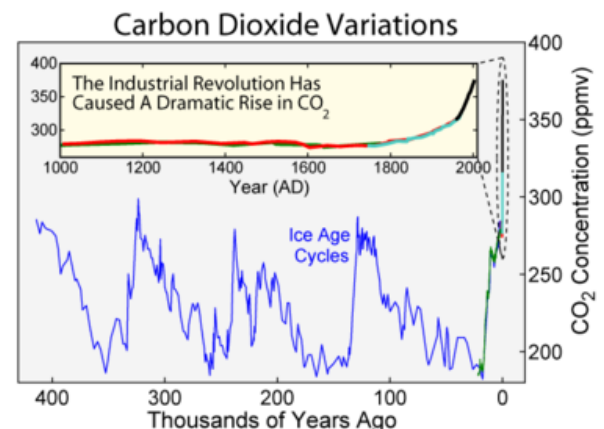


Fig. 25 Koolstofdioxide variaties Bron: Wikipedia

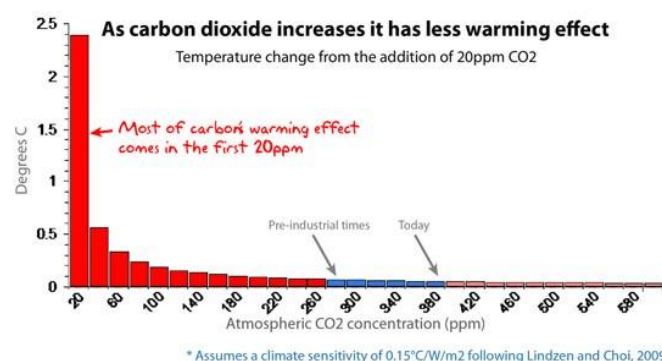


Fig. 26 Effectiviteit van een koolstofdioxide

Bron: Klimaatgek.nl

koolstofdioxide bij komt, is er niet veel infraroodstraling meer over om dit te absorberen. In totaal, dus inclusief terugkoppelingen, zou CO₂, volgens Petr Chylek, een opwarming van zo'n 1,1 °C teweeg brengen. Het IPCC, het internationale klimaatpanel van de VN had dit berekend op 2 tot 4,5 graden, maar hield er geen rekening mee dat in de afgelopen jaren de temperatuur ook is gestegen door een toename van andere stoffen die zonlicht weerkaatsen.

Koolstofdioxide absorbeert op meerdere plekken in het spectrum straling. De straling die het belangrijkste is voor het broeikas effect is de straling van 14 µm t/m 18 µm. Op dit stuk van het spectrum valt ook de top van de hoeveelheid straling per golflengte die de aarde uitzendt. CO₂ is dus een zeer belangrijk broeikasgas.

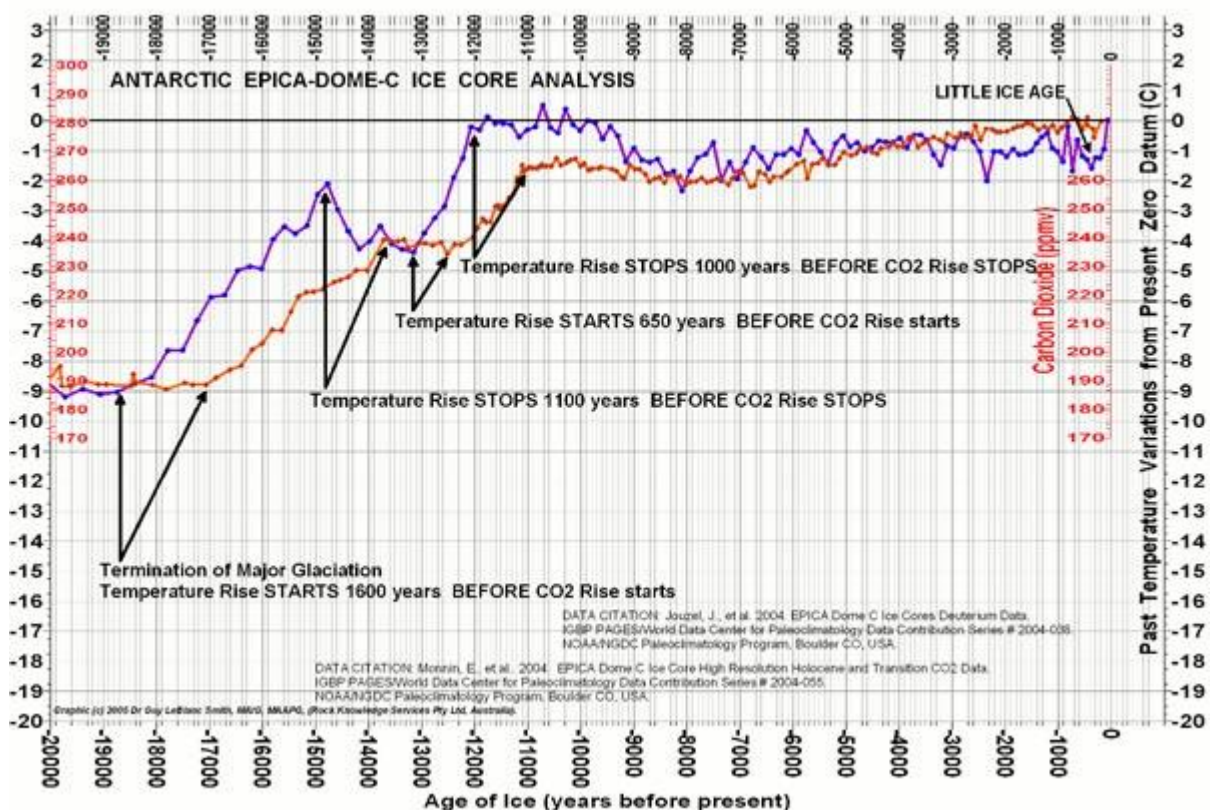


Fig. 27 De 'lag' van CO₂ t.o.v. de temperatuur

Bron: Wikipedia

Als we naar de afgelopen 20000 jaar kijken, lijkt CO₂ echter achter te lopen op de temperatuur. Deze zogeheten time lag is gemiddeld 800 jaar. Dit betekent dus waarschijnlijk dat de hoeveelheid CO₂ de temperatuur volgt en dat de temperatuur op aarde de concentratie koolstofdioxide beslist, en niet andersom. Dit zou komen door de fauna die, vooral in de toendragebieden, beter gedijt wanneer het warm is en zo meer CO₂ in de lucht uitstoot. Hoe meer CO₂ in de lucht, hoe warmer de temperatuur wordt en hoe beter de planten gedijen, hoe beter de fauna weer gedijen enz.

Een andere reden is dat bij een hogere temperatuur er minder CO₂ in de oceaan blijft. Een groot deel van de CO₂ is opgeslagen in onze oceanen. Wanneer de temperatuur van een oceaan stijgt, gaan de koolstofdioxidemoleculen harder bewegen en kunnen ze ontsnappen aan de krachten van het water die hun in het water houden. Zo komt er meer CO₂ in de atmosfeer die weer voor meer opwarming kan zorgen, waardoor er weer meer CO₂ in de lucht komt enz.

Methaan bestaat uit één koolstofatoom en vier waterstofatomen. Het molecuul is niet aan één kant elektrisch geladen. De bindingen in het molecuul zijn echter wel dipoolverbindingen. Hierdoor kan een methaanmolecuul IR-straling absorberen en wel met de golflengtes tussen de 7 en 8 µm.

1.3.8 Methaan

Een methaanmolecuul heeft veel meer effect op de temperatuur dan CO₂. Voor elke kilo methaan, heb je 25 kilo CO₂ nodig om in 100 jaar tijd een even grote opwarming te creëren. Maar methaan is in veel lagere concentraties in de atmosfeer aanwezig (per molecuul CH₄ zijn er 223 moleculen CO₂). Ook blijft het maar 8,4 jaar in de lucht, tegenover de 100 jaar van CO₂. Hierdoor heeft methaan minder lang effect. Over die periode van 8,4 jaar is methaan, per molecuul, echter wel veel belangrijker voor de temperatuur dan CO₂.

Methaan komt op vele manieren in de lucht door invloed van organismen: door bosbranden, micro-organismen, moeilijk te verteren voedsel en uitstoot van planten. Ook komt er methaan in de lucht door vulkanen, wat ervoor zorgde dat vele miljoenen jaren geleden de methaan concentraties in de lucht veel hoger waren. In tegenstelling tot koolstofdioxide, stagneert de groei van de concentratie methaan in de lucht op dit moment.

Er zit vooral veel methaan in de stratosfeer boven de tropen. Hier is de aarde warmer dan bijvoorbeeld bij de polen, dus zendt de aarde hier ook het meest infraroodstraling uit. Deze straling wordt dan weer teruggekaatst door methaan. Gezien deze verdeling over de aarde heeft methaan dus een iets grotere invloed op de temperatuur dan je in eerste instantie zou denken.

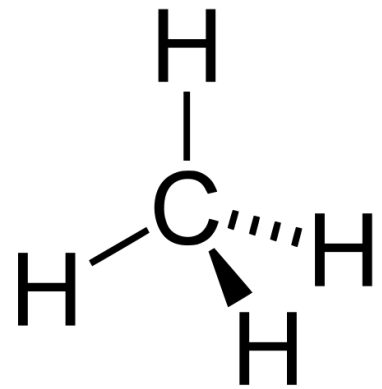


Fig. 28 Een methaan molecuul.
Bron: Wikipedia

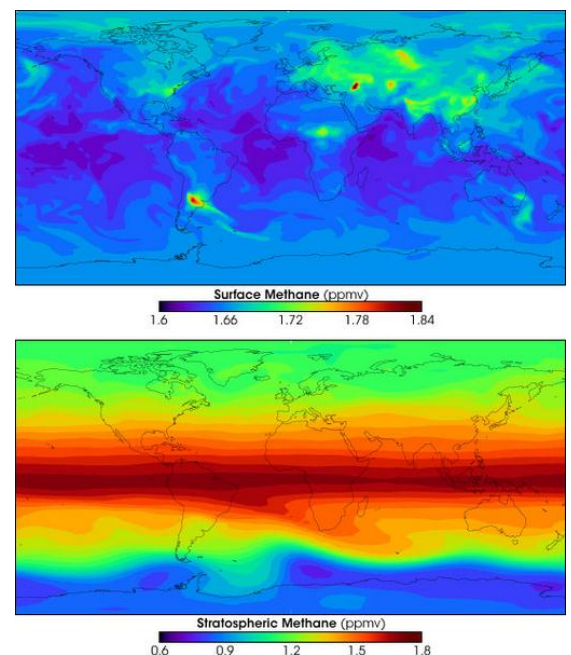


Fig. 29 Methaan aan het oppervlak en in de atmosfeer
Bron: Wikipedia

1.4 Stralingsbalans

Tot nu toe hebben we alle ingaande straling voor de aarde bekeken. Er geldt echter een stralingsbalans voor de aarde: wat er in gaat, moet er ook weer uit. De hitte die de aarde opneemt, gaat er ook weer uit. Dit gebeurt door middel van straling, convectie en verdamping.

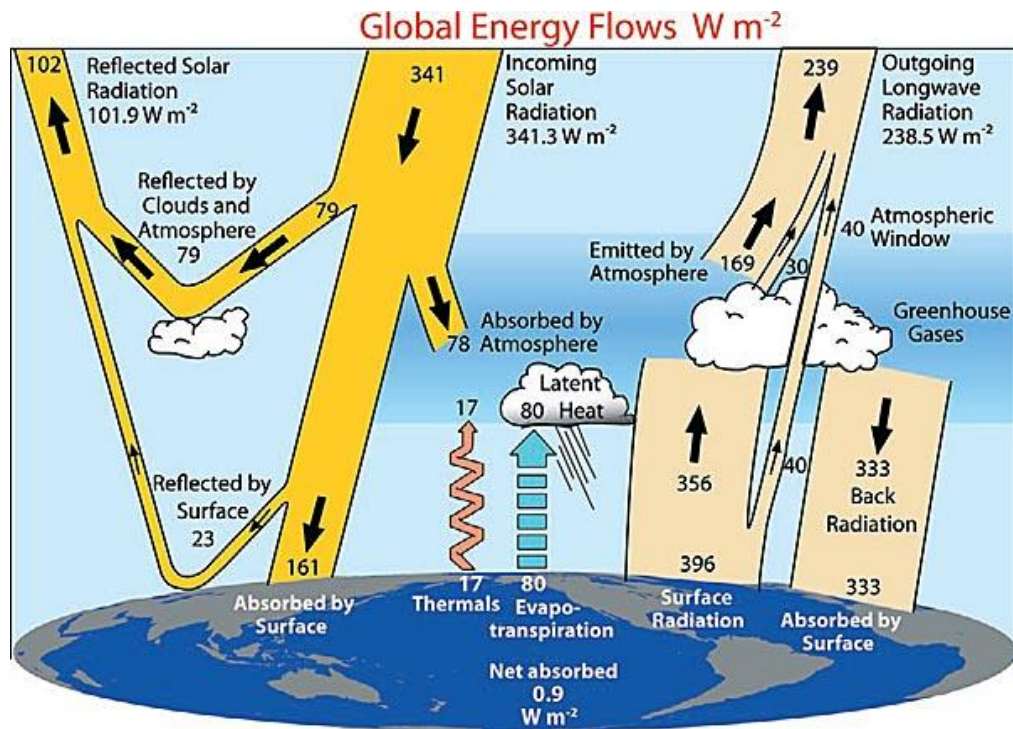


Fig. 30 De stralingsbalans

Bron: *Klimaatgek.nl*

Zoals te zien valt, krijgt het systeem aarde (het aardoppervlak + de aardatmosfeer) zijn straling binnen via zonnestraling. Door de aarde en de atmosfeer wordt in totaal 239 W/m^2 geabsorbeerd. Deze straling moet er dan ook weer uit, zoals rechtsboven is te zien.

Hiernaast valt hier een ander plaatje van te zien. Zwarte straling stelt kortgolvlige straling voor (zoals Uv-straling en zichtbaar licht), rood stelt langgolvlige straling voor (infraroodstraling) en de blauwe pijlen zijn de voelbare hitte (S.H.) en de latente hitte (L.H.). Dezen worden later nog uitgelegd. Van elke 100 Watt straling die de aarde ontvangt, wordt 30 Watt teruggekaatst. Ook straalt de aarde in totaal 70 W infraroodstraling uit. In dit plaatje valt goed de gelaagdheid van de atmosfeer te zien: infraroodstraling bereikt de troposfeer, waar een deel wordt opgenomen en weer wordt uitgezonden in de richting van de aarde en een deel naar de stratosfeer. In de stratosfeer wordt dan weer een deel van die straling geabsorbeerd en teruggekaatst naar de troposfeer en een deel naar de ruimte, waar de straling het systeem aarde verlaat.

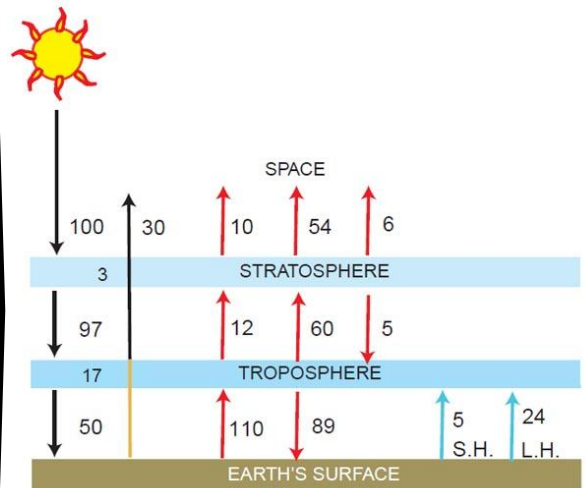


Fig. 31 Vereenvoudigde stralingsbalans
Bron: Klimaatgek.nl

Hiernaast wordt de uitstraling van langgolvlige straling van de aarde per gebied afgebeeld voor de maand april. Het is duidelijk dat dit niet overal gelijk is en dat de stralingsbalans dus ook niet voor elk gebied hetzelfde is. De stralingsbalans die op de vorige pagina is afgebeeld is een gemiddelde over de aarde over het hele jaar. In de tropen wordt zo bijvoorbeeld meer straling van de zon opgevangen en wordt er bovendien minder teruggekaatst (het albedo van tropisch regenwoud is 0,15, terwijl het gemiddelde van de aarde 0,3 is). Deze extra warmte kan niet de ruimte instralen omdat er veel wolken en waterdamp in de tropen is dat de infraroodstraling absorbeert en weer terugkaatst. Dit valt goed te zien in de groene plekken rond de evenaar. Deze warmte wordt dan via convectie en latente warmte naar andere plekken afgevoerd waar dan wel meer uitgestraald kan worden. Bovendien verschilt de uitstraling van infraroodstraling ook per maand. Zo straalt het noordelijke halfrond meer straling uit in onze zomer en het zuidelijke halfrond minder. Ook verplaatst zich het gebied van de weinig uitgestraalde infraroodstraling boven de tropen zich. De intertropische convergentiezone, de zone waar de passaten van het noordelijke halfrond en het zuidelijke halfrond bij elkaar komen, verplaatst zich in onze zomer verder naar het noorden. In deze zone zijn er ook veel wolken die dus de infraroodstraling tegenhouden.

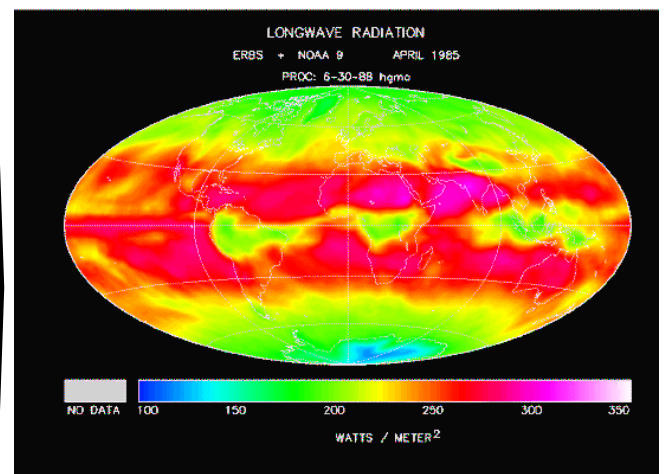


Fig. 32 IR-uitstraling van de aarde in april
Bron: Wikipedia

1.5 Convectie

Convectie is een mechanisme voor warmtestroming door het verplaatsen van materiaal. In de atmosfeer gaat het bij convectie dus om het verplaatsen van lucht. Dit kan op verschillende manieren plaatsvinden. In de atmosfeer bestaat convectie uit verticale stroming (het opstijgen en dalen van lucht) en horizontale stroming (het transporteren van warmte van de evenaar naar hogere breedten en van koele lucht naar de evenaar.) Deze twee vormen hebben echter wel erg veel met elkaar te maken.

1.5.1 Stijgende lucht

Warme lucht die bij de evenaar opstijgt, stroomt daarbij ook naar het noorden of zuiden, om later bij de keerkringen weer te dalen. Deze lucht stijgt op, doordat hij wordt verwarmd, waardoor de moleculen sneller gaan bewegen. Hierdoor gaan de moleculen steeds verder uit elkaar, de lucht zet uit en krijgt dus een kleinere dichtheid. Omdat de dichtheid van de lucht afneemt, wordt hij lichter dan de omringende lucht en stijgt hij op. De bovenliggende luchtlaag wordt steeds dunner, waardoor de lucht steeds minder druk van bovenaf ondervindt. De lucht gaat dus nog verder uitzetten. Omdat het uitzetten van de lucht energie kost, aangezien de moleculen sneller gaan bewegen, en die energie niet van buitenaf kan worden toegevoerd, wordt energie gebruikt die de lucht zelf al bevat. De lucht koelt steeds verder af, totdat deze een hoogte bereikt waarop haar dichtheid gelijk is aan die van de lucht erboven. Vanaf dit moment gaat de lucht weer dalen, waardoor ze weer inkrimpt en er dus energie vrijkomt. Deze energie komt vrij in de vorm van warmte en kan weer door de lucht worden opgenomen waardoor deze weer opwarmt en dus weer kan gaan stijgen. Dit is een van de oorzaken van het ontstaan van cellen in het luchtcirculatiesysteem van de aarde. Op deze manier ontstaan 3 soorten cellen: Hadleycellen, Ferrelcellen en polaire cellen.

De belangrijkste reden voor het bestaan van atmosferische circulatie is de opwarming door de zon. Deze is bij de evenaar gemiddeld het grootst en neemt af richting de polen. Door de atmosferische circulatie wordt er energie richting de polen getransporteerd. Dit zorgt voor een afname van de temperatuurgradiënt (in welke richting en hoe sterk de temperatuur verandert) tussen de evenaar en de polen.

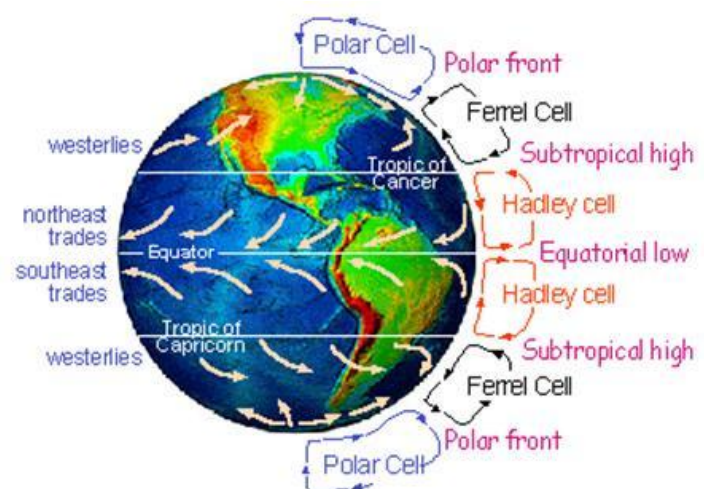


Fig. 33 Verschillende cellen op aarde

Bron: maps.unomaha.edu

1.5.2 Hadleycellen

Hadleycellen zijn luchtcirculatiecellen, waarin de lucht in de tropen opstijgt, vervolgens op een hoogte van 10-15 km naar de subtropen stroomt, daar weer afkoelt, daalt en vervolgens weer naar de tropen terugstroomt. Ze zijn vernoemd naar de ontdekker, George Hadley.

Omdat de temperatuur in de stratosfeer met de hoogte stijgt, komt de stijgende lucht daar tegen die warmer is en dus een lagere dichtheid heeft. Doordat de lucht dan niet verder kan stijgen, wordt deze naar de buitenkanten (dus naar het noorden en naar het zuiden) gedwongen. De lucht verliest zoveel warmte, dat hij in de subtropen (op ongeveer 30° NB en 30° ZB weer daalt. Uiteindelijk botst de lucht hier weer met het aardoppervlak of met de oceaan, waardoor hij ook hier weer naar het noorden en naar het zuiden wordt gedwongen.

De stroming van de lucht wordt verder bepaald, doordat de lucht vanuit het hogedrukgebied in de subtropen naar de lagedrukgebieden rond de evenaar en in de gematigde zones stroomt (rond de 60e breedtegraden). De lucht die dan richting de evenaar terugstroomt, maakt de Hadleycel compleet.

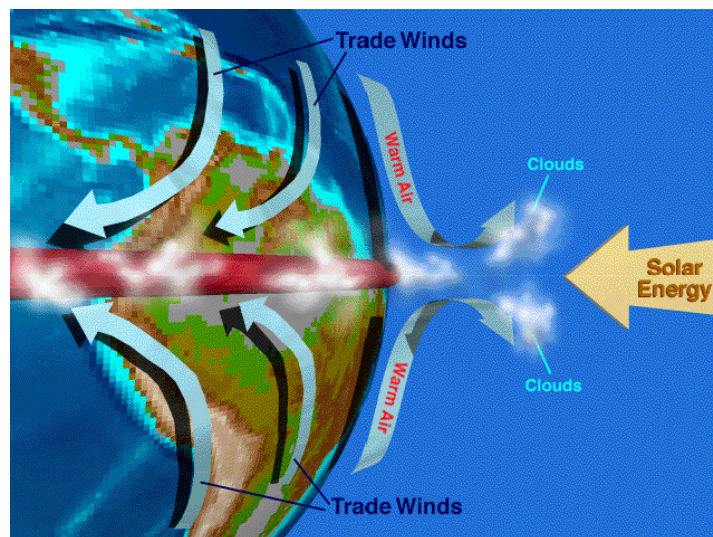


Fig. 34 Hadley cellen

Bron: webpages.uidaho.edu

In dit plaatje is goed te zien dat warme lucht bij de evenaar als gevolg van zonne-energie opstijgt en dan naar buiten beweegt (richting de subtropen). Hier daalt de lucht, die inmiddels is afgekoeld, weer en stroomt langs het oppervlak terug naar de evenaar. Dit zijn de passaten (Trade Winds).

Warme lucht verliest tijdens het stijgen dus warmte. Dit komt, buiten de genoemde oorzaak dat het verder uitzetten energie kost, doordat de lucht in de troposfeer van onderaf wordt verwarmd (als gevolg van warmte-uitstraling door het aardoppervlak), waardoor de lucht die verder van het aardoppervlak is, minder sterk wordt verwarmd dan de lucht dichtbij het aardoppervlak. Dit zorgt voor een relatieve afname van de temperatuur.

1.5.3 Polaire cellen

Polaire cellen zijn atmosferische cellen die zich tussen de Noordpool en ongeveer 60° NB én tussen de Zuidpool en ongeveer 60° ZB bevinden. Ze ontstaan doordat koude lucht vanuit de polen over het aardoppervlak naar de lagedrukgebieden richting de evenaar stroomt. Deze lagedrukgebieden ontstaan doordat rond de 60° breedtegraad de lucht genoeg is opgewarmd om weer te kunnen stijgen. Deze stijgt dan tot de tropopauze (in dit gebied op ongeveer 8 km hoogte). Hier wordt hij, net zoals bij de Hadleycellen naar de buitenkanten gedwongen en stroomt voor een deel weer terug naar de polen. Hier aangekomen is de lucht weer genoeg afgekoeld om te dalen en begint de circulatie weer opnieuw.

1.5.4 Ferrelcellen

Ferrelcellen zijn de atmosferische cellen die zich tussen de Hadleycellen en de polaire cellen bevinden. In tegenstelling tot de Hadley- en polaire cellen is dit echter een secundair verschijnsel dat zijn bestaan aan deze cellen te danken heeft. Ferrelcellen zijn geen gesloten systemen, maar bestaan uit atmosferische wervels (draaiende bewegingen in de atmosfeer). Omdat dit geen gesloten cellen zijn, zijn de atmosferische verschijnselen in deze cellen ook minder duidelijk. Zo is de overheersende windrichting dan wel uit het westen, maar kunnen er ook andere windrichtingen voorkomen, zoals uit het noorden. Ook is de stroming in deze cellen niet altijd even duidelijk omdat er geen sterke warmtebron voor de stijging van lucht, of een sterke koudebron voor de daling van lucht is. Ook zorgen de wervels aan het oppervlak ervoor dat de bovenstroming in de Ferrelcellen wordt verstoord.

1.5.5 Intertropische convergentie zone

De ligging van deze cellen is echter niet altijd constant. Dit komt omdat de intertropische convergentie zone (ITCZ) de hoogste stand van de zon met ongeveer 3 maanden achterstand, volgt. De ITCZ is de zone waar de passaten van het noordelijk en het zuidelijk halfrond elkaar tegen komen. In de ITCZ vindt de sterkste stijging van lucht plaats. Hierdoor verplaatsen ook de atmosferische cellen (vooral de Hadleycellen) zich door het jaar heen. Ook het weer in deze zone is erg wisselvallig. Soms komen er periodes voor, die enkele weken kunnen aanhouden waarin het windstil is of er maar een erg zwakke wind heerst.. Het is overigens wel over het algemeen een zone waar erg veel neerslag valt als gevolg van de opstijgende lucht. De regentijden in de tropen zijn dan ook het gevolg van de ligging van de ITCZ.

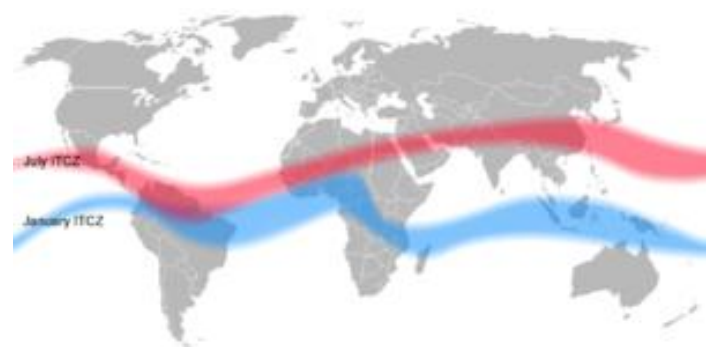


Fig. 35 De verschuiving van de ITCZ door het jaar heen.

Bron: Wikipedia

1.6 Verdamping

Verdamping is het overgaan van een stof van een vloeibare naar een gasvormige fase. Als we het met betrekking tot de aardatmosfeer over verdamping hebben, wordt hiermee de verdamping van water bedoeld. Als deze verdamping in de atmosfeer wegvalt, kan er ook geen neerslagvorming plaatsvinden. Hierdoor is de verdamping erg belangrijk in de waterkringloop.

1.6.1 Verdampingsenergie

Verdamping kan plaatsvinden doordat er aan een molecuul zo veel energie wordt toegevoegd dat deze snel genoeg gaat bewegen om aan de vloeibare toestand te ontsnappen. Het molecuul komt dan in gasvormige toestand. De energie die hiervoor nodig is wordt verdampingsenergie genoemd. Als een deel van een vloeistof verdampt, neemt de temperatuur van die vloeistof ook af, omdat de meest energierijke deeltjes verdampen en dus uit de vloeistof verdwijnen. Als er geen energie wordt toegevoegd, zal de verdamping ook stilvallen.

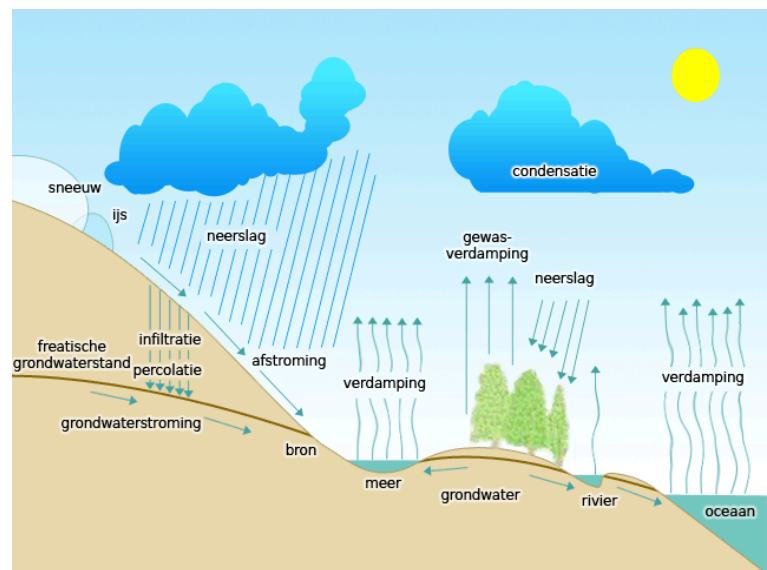


Fig. 36 De waterkringloop

Bron: Wikipedia

1.6.2 Herverdamping

Wanneer een molecuul later weer condenseert, komt de bij de verdamping opgenomen energie (dus de verdampingsenergie) weer vrij. Deze energie komt vaak vrij in de vorm van warmte. Dit noemt men condensatiewarmte of latente warmte. Latente warmte is echter eigenlijk een verzamelnaam voor de energie die nodig is voor een faseovergang of juist vrijkomt bij een faseovergang. Doordat er bij de condensatie warmte vrijkomt, kan stijgende lucht steeds verder stijgen als een deel van de waterdamp condenseert. De vrijgekomen warmte kan er dan voor zorgen dat de overige lucht verder uitzet, of dat een deel van het water dat door de condensatie is ontstaan weer verdampt. Dit is een mechanisme dat op aarde bijvoorbeeld erg duidelijk voorkomt in de tropen. Hier verdampt erg veel water in de regenwouden.

Een ander proces in de tropen dat van belang is bij de wolkvorming is het opnieuw verdampen van neerslag. Ongeveer 20 tot 50 % van de neerslag (in de vorm van regen), verdampt alweer tijdens het vallen, terwijl tot wel 70 % uiteindelijk weer herverdampst tot in de wolk.

1.6.3 Factoren

Factoren die een grote rol spelen bij verdamping:

- Aantal zonuren
- De wind
- Temperatuur
- Vochtigheidsgraad

1.6.4 Zonuren

Het aantal zonuren speelt een grote rol bij verdamping omdat de zon erg veel energie levert. Deze energie wordt gebruikt voor de verdamping van water. Als er dus veel zonuren zijn, is er een grote aanvoer van energie, waardoor er veel water kan verdampen.

1.6.5 Wind

Wind heeft op meerdere manieren invloed op de verdamping. Ten eerste transporteert hij warmte, die boven omliggende oppervlakken wordt opgebouwd, richting vegetatie. Dit zorgt ervoor dat de verdamping bij die vegetatie versneld wordt. Omdat vegetatie vaak veel water bevat, zorgt dit ervoor dat de totale verdamping versneld wordt. Verder zorgt wind ervoor dat de waterdamp wordt verplaatst. Hierdoor wordt de lucht rondom de verdampingsbron droger, waardoor de verdamping ook makkelijker gaat.

1.6.6 Temperatuur

De temperatuur heeft ook weer op meerdere manieren invloed op de verdamping. Ten eerste zorgt ook een hogere temperatuur weer voor meer energie. Zoals eerder besproken zorgt dit voor een hogere verdamping. Verder neemt de opnamecapaciteit van de lucht voor waterdamp ook toe bij een toenemende temperatuur. Hierdoor kan er meer water verdampen, doordat bij een zelfde hoeveelheid waterdamp de vochtigheidsgraad lager is.

1.6.7 Wolken

Wolken ontstaan als de waterdamp in opstijgende lucht tot waterdruppeltjes condenseert, of zelfs direct overgaat in ijskristallen. Deze faseovergangen zijn onder meer het gevolg van het verzadigd raken van de lucht, waardoor deze geen waterdamp meer kan bevatten. Omdat lucht bij een dalende temperatuur ook eerder verzadigd is, kan deze dus minder waterdamp bevatten en moet de waterdamp op een gegeven moment dus condenseren. Voor de condensatie of bevriezing van waterdamp zijn echter wel condensatiekernen nodig. Dit zijn aerosolen (stofdeeltjes) of ionen waar de waterdamp zich bij condensatie of bevriezing aan kan hechten. Als de ijskristallen of waterdruppels in de wolken met elkaar botsen, kunnen ze samenklonteren en worden de druppels en kristallen dus groter. Als ze op een gegeven moment groot en zwaar genoeg zijn vallen ze als neerslag omlaag.

1.6.8 Opwarmend of afkoelend?

De invloed van wolken is heel erg lastig te meten. Dit komt doordat ze zowel een warmte-isolerende werking hebben als een afkoelende werking. Ze hebben een warmte-isolerende werking doordat ze de uitstraling van warmte, in de vorm van langgolvlige infraroodstraling, belemmeren. En ze hebben een afkoelende werking doordat ze het albedo-effect vergroten. Dit komt doordat wolken wit zijn. Omdat witte oppervlakken het grootste deel van invallende straling terugkaatsen (een voorwerp is namelijk nooit 100% wit), zorgen wolken ervoor dat een groter deel van de invallende zonnestraling wordt teruggekaatst en het albedo-effect dus vergroot wordt. Vaak hebben lage, dikke wolken een afkoelende werking en hoge, dunne wolken een opwarmende werking. Dit komt doordat laaghangende, dikke wolken een erg hoge albedo hebben. Hoge, dunne wolken hebben een relatief laag albedo. Ze hebben wel een groter albedo dan het albedo dat er zou zijn indien er geen wolkvorming is. Maar dit effect is kleiner dan dat van het vasthouden van uitgaande straling, waardoor bij deze wolken vooral het versterkt vasthouden van uitgaande straling belangrijk is en deze wolken dus een opwarmend effect hebben. Het totale effect van wolken op de temperatuur op aarde is echter afkoelend.

Het terugkaatsende effect van wolken is het sterkst bij wolken die ontstaan in een gebied met erg veel condensatiekernen. Dit komt doordat het aanwezige water bij veel condensatiekernen vaak bestaat uit vele kleine druppeltjes, terwijl het bij weinig condensatiekernen juist bestaat uit weinig grotere druppels. Het albedo-effect van wolken met kleine waterdruppeltjes is groter dan het albedo-effect van wolken met grote waterdruppeltjes, omdat je bij meer kleine waterdruppeltjes een groter oppervlak hebt waarop het licht kan terugkaatsen. Verder duurt het bij wolken die ontstaan rondom veel condensatiekernen langer voordat de druppeltjes zijn uitgegroeid tot regendruppels. Hierdoor blijft de wolk langer bestaan en blijft het afkoelende effect langer in stand.

Dan is er nog een manier waarop wolken een afkoelend effect kunnen hebben. Dit geldt echter alleen voor een bepaald soort wolken: de cumulonimbus. Dit zijn wolken die laag in de atmosfeer beginnen, maar erg hoog en dicht kunnen zijn. In de tropen kunnen ze zelfs tot aan de tropopauze reiken en dus rond de 15 km hoog worden. In deze wolken kan zich een heat pipe vormen. Hierin kan waterdamp aan de warme kant (onderaan) verdampen, waarna het opstijgt en aan de koude kant (bovenin) weer condenseert, en de bij de verdamping opgenomen warmte weer vrijkomt. Omdat de wolk zo hoog is kan deze warmte bijna ongehinderd de ruimte in stralen, omdat er boven de tropopauze relatief gezien weinig broeikasgassen zijn.

1.6.9 Samenloop verdamping en convectie

Als gevolg van convectie en verdamping, daalt de gemiddelde temperatuur op aarde met 45°C . Dit is onder andere het gevolg van de afkoelende werking van de eerder benoemde heat pipes. Echter ook de convectiestromen (vooral die in de Hadleycellen) zijn erg belangrijk, omdat deze er ook voor zorgen dat grote hoeveelheden warmte-energie omhoog worden getransporteerd, waarna de uitstraling van warmte naar de ruimte een stuk makkelijker wordt. In de grafiek hiernaast is aangegeven

hoe de temperatuur op aarde nu is en hoe die zou zijn als er geen convectie en verdamping (het weer) zouden zijn. De gemiddelde temperatuur op aarde wanneer er geen weer zou zijn kunnen we echter niet meten. Daarom is dit een theoretische waarde die gebaseerd is op een berekening aan de hand van het model van het stralingstransport.

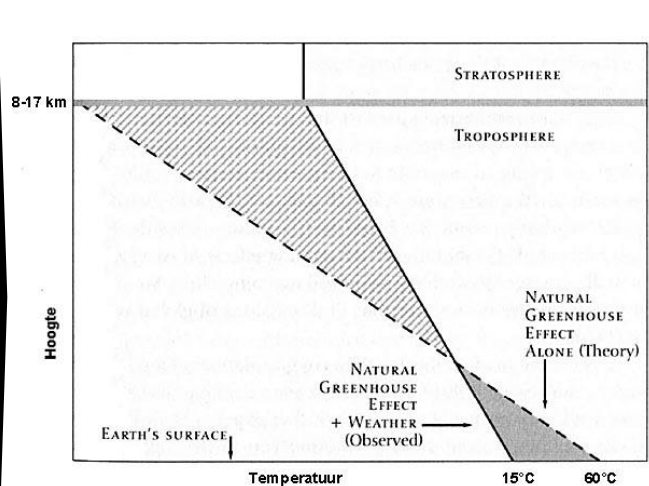


Fig. 37 Het weer maakt een groot verschil

Bron: Roy W. Spencer, *climate confusion*

1.6.10 De droogadiabaat

De werkelijke daling van de temperatuur bij een toenemende hoogte in de atmosfeer is ongeveer $6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Dit noemt men de 'lapse rate'. Als er geen sprake zou zijn van verdamping, maar de lucht alleen zou afkoelen doordat hij stijgt en daarbij uitzet, zou de lucht adiabatisch met $9,8^{\circ}\text{C}/\text{km}$ afkoelen. Adiabatisch betekent dat er geen uitwisseling van warmte met de omgeving plaatsvindt en de lucht dus alleen afkoelt door het uitzetten als gevolg van een lagere luchtdruk.

Deze afkoeling noemt men de droogadiabaat.

Dit is bijvoorbeeld het geval als een luchtbel boven een droog en donker oppervlak, zoals een weg, wordt verwarmd. Omdat de hoek van de droogadiabaat gemiddeld steiler is dan die van de lapse rate, zullen de droogadiabaat en de lapse rate op een bepaalde hoogte snijden. Dit is de maximale stijghoogte van de opgewarmde luchtbel. De warmte die op deze manier wordt getransporteerd noemen we voelbare warmte. In het plaatje hiernaast is duidelijk te zien dat de droogadiabaat en de lapse rate elkaar op een gegeven moment snijden.

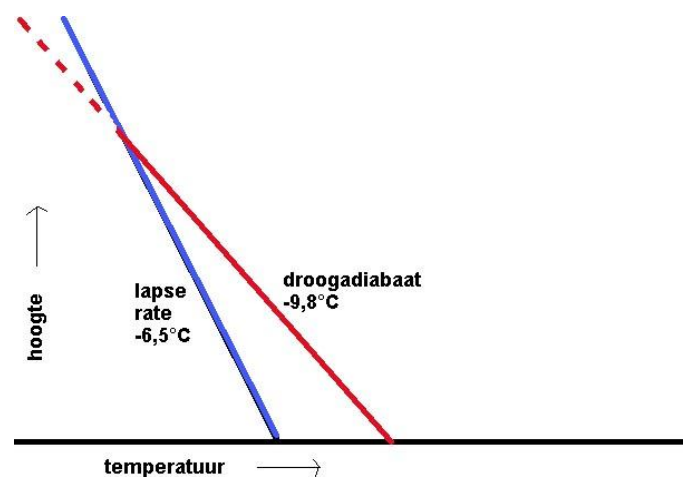


Fig. 38 De droogadiabaat tegenover de lapse rate

Bron: *Klimaatgek.nl*

1.6.11 De natadiabaat

Belangrijker voor het warmtetransport is echter de natadiabaat. Hierbij bevat de stijgende luchtbel waterdamp. Op een bepaalde hoogte zal deze waterdamp dan voor een deel condenseren. De condensatiewarmte die dan vrijkomt, zorgt ervoor dat de omringende lucht weer wordt opgewarmd en verder kan stijgen. Door voortdurende condensatie wordt de natadiabaat minder steil en zal deze de lapse rate niet snijden. Hierdoor kunnen erg hoge wolken ontstaan, die tot aan de tropospauze kunnen rijken en in de tropen dus wel ongeveer 17 km hoog kunnen worden. Op deze manier kan dus erg veel warmte naar boven worden getransporteerd in de atmosfeer, waardoor de temperatuur aan het aardoppervlak daalt, terwijl die op grotere hoogte minder is afgenomen ten opzichte van wanneer er geen weersverschijnselen zouden zijn. Deze warmte kan op die grote hoogte direct uitstralen naar de ruimte zonder obstructie door broeikasgassen. Boven oceanen vindt meer dan 90% van de afkoeling plaats via waterdamp. In de figuur hiernaast is erg duidelijk zichtbaar dat de natadiabaat en de lapse rate elkaar door de condensatiewarmte niet snijden, waardoor de wolken zo hoog kunnen worden.

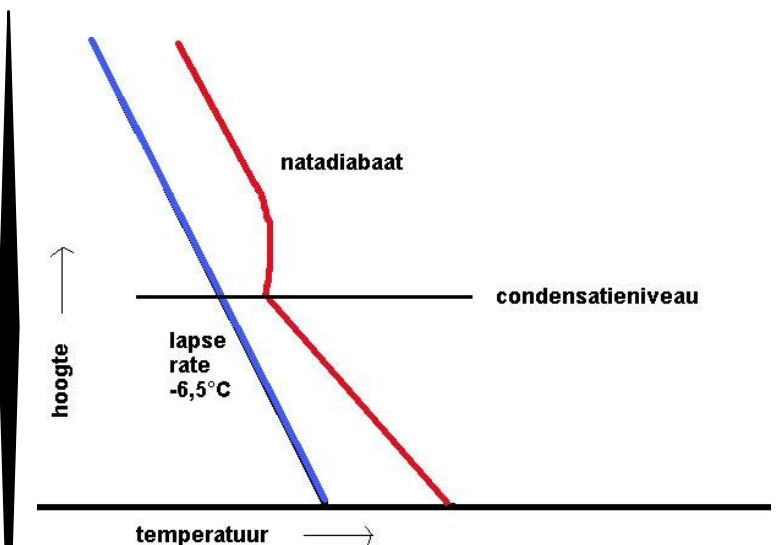


Fig. 39 De natadiabaat tegenover de lapse rate
Bron: Klimaatgek.nl

2.1 Uitleg van ons practicum

Hoe willen we nou gaan bekijken wat nou de grootste invloed heeft op de temperatuur aan het aardoppervlak? Doctor van Andel had een jaar voor zijn dood een zeer interessant proefje gedaan: hij nam een paar Petri schaaltjes en probeerde daarmee een aantal verschillende omstandigheden en factoren die van invloed zouden kunnen zijn op de temperatuur, te creëren. Hij mat vervolgens de temperatuur op gedurende 16 uur. Daarna moest hij stoppen omdat zijn dochter het gazon wilde maaien. Dit inspireerde ons om een gelijkaardig practicum op te zetten. Wij wilden onze meting langer laten lopen zodat we beter de opwarming konden bestuderen, maar ook de afkoeling.

De effecten die wij wilden bestuderen zijn de effecten van waterdamp, convector en van broeikasgassen. Helaas kunnen we variaties in de zon niet goed genoeg nabootsen om hier degelijke informatie uit te kunnen halen.

Voor het afkoelen van onze kommetjes is interessant: welke omgeving voert de warmte het snelst weg? Zou de waterdamp voor de meeste afkoeling zorgen, of misschien convector? En wat is het verschil tussen geen en wel broeikasgassen?

2.2 Opstelling

2.2.1 Algemene opstelling

We hebben de proef uitgevoerd met een opstelling die bij beide delen van het practicum uit 4 glazen bakjes bestond. Deze bakjes stonden op een witte ondergrond en er lagen watjes in, zodat er geen absorptie van zonlicht zou plaatsvinden, die het practicumresultaat zou kunnen beïnvloeden. We hebben met thermokoppels de temperatuur opgemeten. De seintjes die de thermokoppels gaven gingen naar een 'Ulab', een datalogger die de temperatuur meet gedurende een vooraf ingestelde tijd. Deze gegevens konden we dan later door middel van het programma Coach verwerken tot grafieken.

2.2.2 Waterdamp

We hebben ervoor gekozen om de verschillen die waterdamp maken te simuleren met het natmaken van de watjes. De rest van het water hebben we na het natmaken van de watjes uit het bakje geschud, zodat in elk bakje evenveel water aanwezig was.

2.2.3 Broeikaseffect

Om het broeikaseffect te simuleren hebben we net als Dr. Van Andel voor PE en PMMA gekozen. Een uitleg over deze stoffen komt later. Voor de bakjes met PE als bedekking, hebben we een diepvrieszak (dit is LDPE) over twee houten latjes gespannen, zodat we de bakjes eronder konden schuiven en de afstand tussen het bakje en de diepvrieszak ongeveer 1 mm was. Dit hebben we gedaan zodat het water dat verdampt er ook uit kan. De afstand is zo klein, omdat we op deze manier de convectie wel zo veel mogelijk willen verhinderen. Voor de bakjes met PMMA als bedekking hebben we hetzelfde gedaan, maar dan met PMMA (plexiglas) op de houten latjes. Ook hebben we nog een los wit plankje gebruikt, waar we de open bakjes op hebben gezet. Dit was dezelfde soort ondergrond als bij de andere bakjes, waardoor er hierdoor geen ongelijkheid in temperatuur in zou moeten zitten.

2.2.4 Convectie

Om convectie te simuleren hebben we ook open bakjes getest. Aangezien de andere bakjes zo goed als gesloten waren, kon de wind daar niet bij om de warme of koude lucht weg te voeren. Bij open bakjes is dit wel het geval.

2.2.5 Verdeling van de bakjes

We hebben ervoor gekozen om de proef in 2 delen te doen, omdat de ‘U-lab’ maar 4 aansluitingen had, waardoor we niet alle 6 de verschillende bakjes tegelijk konden meten. Op deze manier hoopten we door 2 referentiebakjes aan te houden, indirect alsnog alle 6 de bakjes met elkaar te kunnen vergelijken. We hebben de bakjes als volgt verdeeld:

Proefje 1	Proefje 2
PE droog	Geen bedekking droog
PE nat	Geen bedekking nat
PMMA droog	PMMA droog
PMMA nat	PE droog



Fig. 40 Dit zijn de opstellingen van beide practica. Links is een poging tot het uitvoeren van practicum 1 te zien. Tijdens dit proefpracticum regende het. Links in het plaatje is de witte plastic zak te zien waarin de Ulab zat, zodat hij niet nat werd. Rechts is het plaatje te zien van practicum 2

2.2.6 PE

PE staat voor polyetheen. Dit is een kunststof. Er zijn 2 soorten PE, namelijk hogedichtheidpolyetheen (HDPE) dat bij lage druk en met behulp van een katalysator wordt gemaakt en lagedichtheidspolyetheen (LDPE) dat bij hoge druk wordt gemaakt. HDPE bestaat voornamelijk uit lineaire ketens, terwijl LDPE vooral uit zeer sterk vertakte ketens bestaat.

LDPE is een vrij zachte, maar taaie stof. Het is waterafstotend en een goede isolator. Een erg belangrijke eigenschap van LDPE is dat het langgolvlige straling (bijvoorbeeld IR straling) doorlaat. Het is gevoelig voor UV straling, wat betekent dat het door UV straling wordt aangetast, het houdt het echter niet volledig tegen.

HDPE is, net zoals LDPE, een flexibele, maar taaie stof. Verder is HDPE thermisch belastbaar, UV- en weerbestendig, en isolerend. Het laat net zoals LDPE langgolvlige straling door. Ook HDPE is gevoelig voor UV straling en wordt dus door UV straling aangetast.

Wij hebben voor ons practicum gekozen voor LDPE, omdat de factoren die voor ons practicum van belang zijn overeenkomen en deze vorm handiger was om te gebruiken.

2.2.7 PMMA

PMMA staat voor polymethylmethacrylaat. Het is echter beter bekend als perspex of plexiglas. PMMA laat UV straling door, maar blokkeert IR straling. Het is erg stootvast, warmte-isolerend, heeft een lage dichtheid en is goed bewerkbaar. Ook is het erg goed bestand tegen lichts- en weersinvloeden.

2.2.8 Verwachtingen met betrekking tot het practicum

Op basis van deze gegevens is het te verwachten dat, op het moment dat de zon op de bakjes schijnt, de bakjes die met PMMA worden afgedekt het warmst zullen zijn, omdat hier de IR straling in de bakjes wordt gehouden. Ook zullen de bakjes met PE warmer worden dan het open bakje, omdat hier de convectie wordt tegengehouden. Hierdoor kan het bakje zijn warmte minder goed kwijt.

2.2.9 Problemen

Helaas hebben we enige problemen gekend met het doen van het proefje. We hadden de thermokoppels goed geijkt, dachten we, maar na de proefjes hadden we opnieuw gekeken of de thermokoppels gelijke temperaturen aangaven. Drie thermokoppels gaven ongeveer dezelfde temperatuur aan, de andere was 1,5 graden kouder. Wij weten zeker dat bij het tweede proefje de afwijkende thermokoppel bij het open droge bakje zat. Bij het eerste proefje denken wij dat het bij het droge bakje met PE zat.

2.3 Metingen

2.3.1 Practicum 1

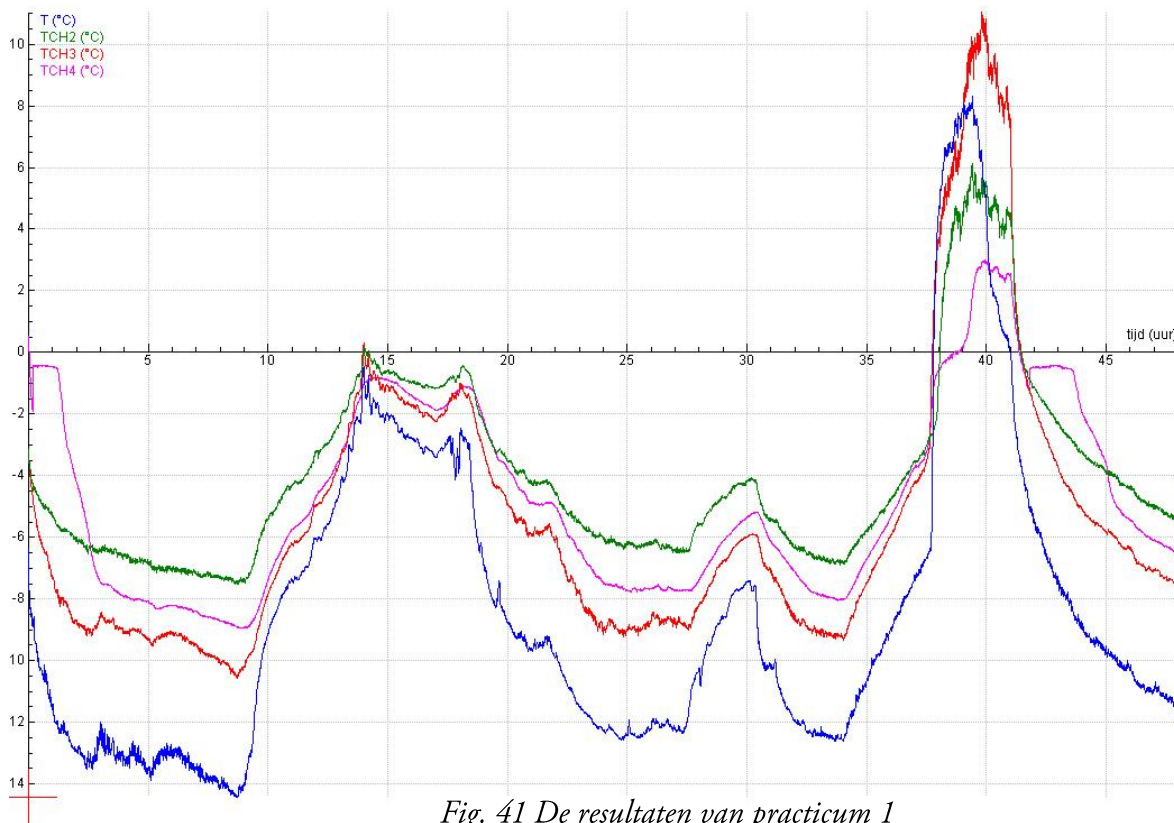


Fig. 41 De resultaten van practicum 1

We hebben dit practicum uitgevoerd van 8 februari 2012 22:30 uur t/m 10 februari 2012 22:30 uur. Gedurende de eerste dag was het bewolkt, de tweede dag helder.

In deze grafiek zijn:

Roze de grafiek van PMMA nat

Groen de grafiek van PE nat

Rood de grafiek van PMMA droog

Blauw de grafiek van PE droog (werkelijke temperatuur was waarschijnlijk 1,5 graden warmer)

2.3.2 Practicum 2

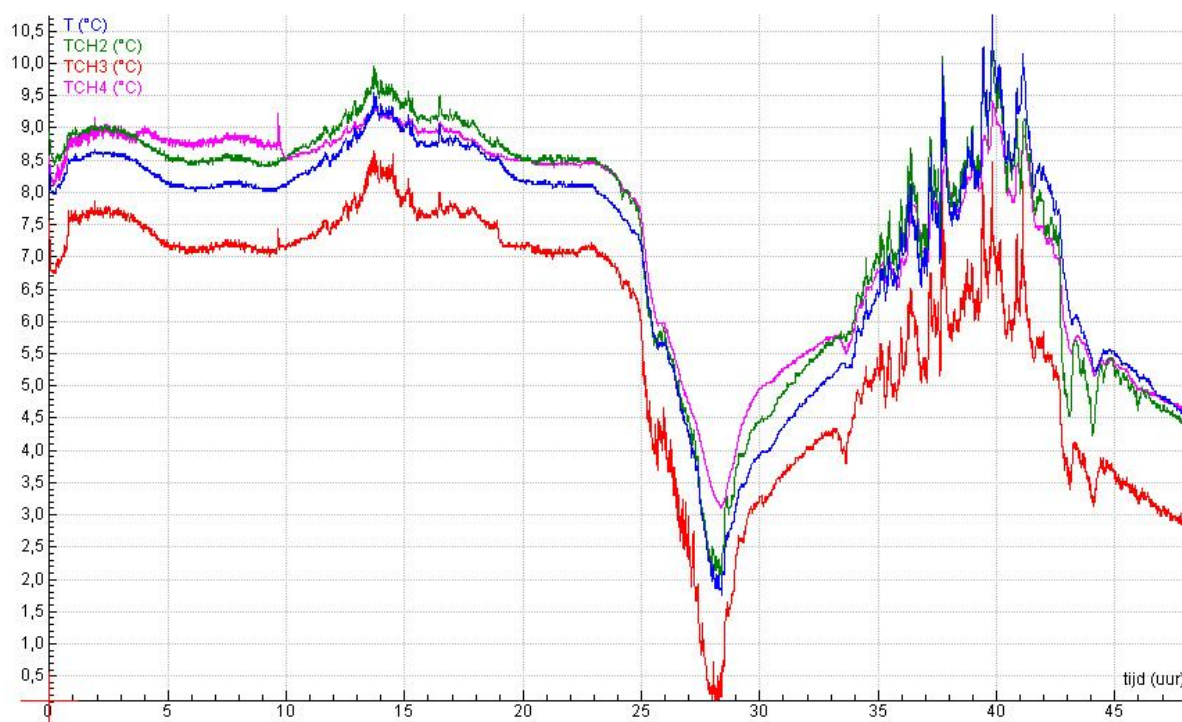


Fig. 42 De resultaten van practicum 2

We hebben dit practicum uitgevoerd van 23 februari 2012 22:30 uur t/m 25 februari 2012 22:30 uur. Gedurende de eerste dag was het bewolkt, op de tweede dag kwam de zon er af en toe door.

In deze grafiek zijn:

Roze de grafiek van Open nat

Groen de grafiek van PE droog

Blauw de grafiek van PMMA droog

Rood de grafiek van Open droog (werkelijke temperatuur was 1,5 graden warmer)

2.4 Analyse

2.4.1 Practicum 1

2.4.1.1 Kwaliteit van de meting

Onze grafiek lijkt vrij goed overeen te komen met wat het dichtstbijzijnde KNMI station (in Arcen) heeft gemeten (zie bijlage). De tweede middag komt in onze grafiek echter duidelijk boven de andere uit qua temperatuur, terwijl dit bij de werkelijke temperatuur niet is. Waarschijnlijk komt dit doordat op de tweede dag de zon veel harder scheen. De thermokoppels lijken dit heel duidelijk op te pikken. Op de tweede dag meten de thermokoppels temperaturen van boven de 0 graden, terwijl de temperatuur volgens de KNMI niet boven de 0 uit waren gekomen.

De roze grafiek lijkt een meetfout te tonen in het eerste anderhalve uur en tussen 42 en 44 uur.

De temperatuur blijft nagenoeg gelijk, terwijl dit totaal onlogisch is op deze tijdstippen.

Bovendien is de temperatuur waarop de grafiek constant is in beide gevallen even hoog.

2.4.1.2 Waterdamp

In de nacht (tussen 0 en 9 uur en tussen 22 en 33 uur in onze grafiek) zijn de grafieken van de schaaltes met een natte bodem (de groene en paarse grafieken) warmer dan de droge bakjes. Water geeft namelijk moeilijker warmte af aan de lucht dan andere materialen. In de middag, wanneer de zon op de bakjes schijnt, zijn de bakjes met water erin juist kouder dan de droge bakjes. Dit effect is op de eerste dag minder groot dan op de tweede omdat de luchtvochtigheid hoger was (zie bijlage). Het water kan dan namelijk verdampen en zo veel warmte meenemen. Het verschil bij de tweede dag is, ongeveer 7 graden 's middags en 1 graden 's nachts voor de PMMA bakjes. Opgeteld is dit 8 graden verschil. Na correctie is het verschil bij de PE bakjes, 's middags ongeveer 3,5 graden. Als je daar de 4,5 graden verschil die er 's nachts tussen de bakjes zit bij optelt, krijg je een verschil van 8 graden. Waterdamp maakt de bakjes dus zo'n 8 graden koeler overdag.

2.4.1.3 Broeikaseffect

Over de hele 48 uur lijkt er een constant verschil te zitten tussen de bakjes met PE en PMMA. Bij de natte bakjes (groen en paars) is dit verschil ongeveer 1 graden en bij de droge bakjes (rood en blauw), na correctie voor het foutje met de thermokoppels, 1,5 graden. PMMA behoort de warmste te zijn aangezien PMMA infraroodstraling tegenhoudt. Dit betekent dat de warmte niet weg zou kunnen gaan uit onze bakjes. Helaas is dit niet het geval bij de natte bakjes. Sterker nog, bij de natte bakjes is de PE constant warmer dan de PMMA, al is het maar 1 graden. Wel lijken de PE bakjes lichtelijk sneller af te koelen dan de PMMA bakjes, maar dit verschil is bijna niet merkbaar. Een mogelijke

verklaring voor het feit dat er bij de natte bakjes zo'n klein verschil zit tussen PE en PMMA is dat de waterdamp zich op de PMMA en PE gecondenseerd kunnen hebben. Daar zouden ze infraroodstraling omgebogen kunnen hebben naar de buitenkanten van de bakjes, waar de infraroodstraling er wel door kan. Of de waterdamp zou dan weer met de warmte die erin zit naar onder gevallen kunnen hebben, waardoor de warmte niet uit het bakje gevoerd wordt. Een verklaring voor het feit dat het natte bakje met PE constant warmer was, hebben we niet.

2.4.2 Practicum 2

2.4.2.2 De kwaliteit van de meting

Onze grafiek komt bijzonder goed overeen met de temperatuur die het KNMI in Arcen heeft gemeten op 10cm hoogte boven gras. Vooral als je bij het open bakje 1,5 graden optelt. Zie hieronder voor de vergelijking.

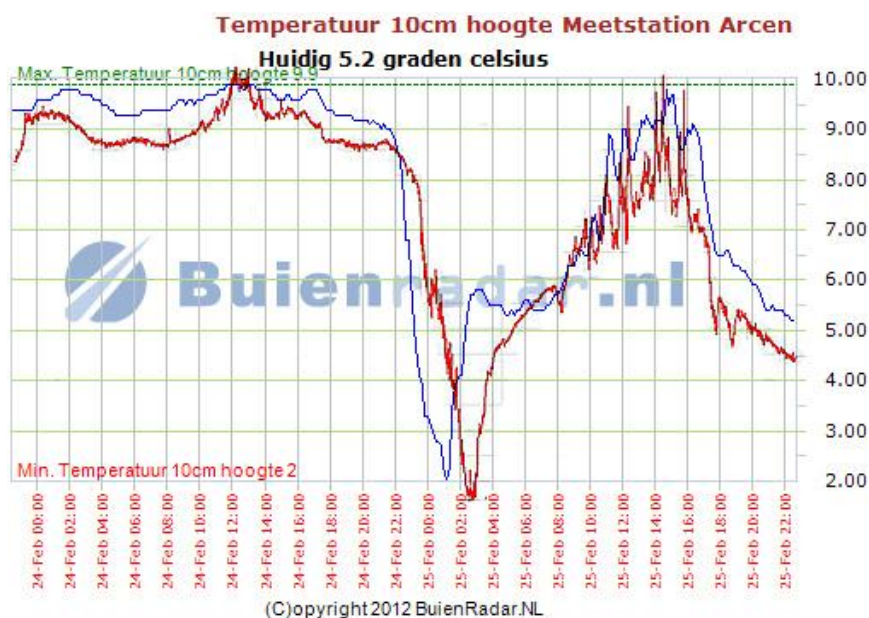


Fig. 43 Een vergelijking van onze resultaten met Arcens temperatuur

Bron: Buienradar & onze eigen metingen

2.4.2.2 Convectie

In de nacht waar het zo koud is geworden daalt de temperatuur van het open, droge bakje (de rode grafiek) harder dan de andere bakjes. Na de 1,5 graden correctie wordt het open bakje 0,5 graden kouder dan de gesloten bakjes. Het open bakje stond namelijk in contact met de open lucht. Rond dat tijdstip kwam er een koudefront aan. De gesloten bakjes houden dan hun warmte zo veel mogelijk vast, totdat de warmte via straling en geleiding weg gaat. Uiteraard stijgt de temperatuur dan ook harder wanneer er weer warme lucht voorbij komt. Dit verschil is kleiner bij het natte, open bakje (de roze grafiek). In de middag blijkt er een verschil te zitten van 0,5 graden tussen het open,

droge bakje en het bakje met PE (het afgedichte bakje dat alles doorlaat). In die middag kan het open bakje dus makkelijker de warmte kwijtraken en blijft het iets koeler.

2.4.2.3 Waterdamp

Op de eerste dag lijkt het bakje met de waterdamp moeilijker op te warmen. De reden hiervoor moet zijn dat er in de middag waterdamp gecreëerd is die dan weggevoerd wordt. Deze waterdamp voert de warmte mee (latente warmte). In de nacht die hierop volgt is de grafiek met waterdamp merkwaardig veel warmer dan de andere grafieken. Dit komt waarschijnlijk wederom doordat water moeilijker z'n warmte kwijt kan dan lucht. Vervolgens stijgt de temperatuur minder hard dan in het droge open bakje. De warmte die er gecreëerd wordt, wordt door het verdampte water meegevoerd. Op de tweede middag is het natte bakje even warm als beide afgesloten bakjes. Dit kunnen we niet verklaren. Door de waterdamp zou dit bakje juist kouder moeten zijn omdat het makkelijker zijn warmte kwijt kan. In de nacht is er een temperatuurverschil, na correctie, van anderhalve graden, in de middag geen enkele. Over het algemeen is het verschil dat waterdamp maakt, dat het in de middagen zo'n halve graden warmer is en in een nacht waar het sterk afkoelt, anderhalve graden.

2.4.2.4 Broeikaseffect

De eerste (bewolkte) dag is het bakje met PE (de groene grafiek) ongeveer 0,5 graden warmer dan het bakje met PMMA. Dit kan komen doordat de wolken het zonlicht slechter doorlaten en er juist voor zorgen dat er meer IR straling van de aarde wordt geabsorbeerd en weer gedeeltelijk naar de aarde wordt uitgezonden. Omdat PMMA niet doorlaatbaar is voor IR straling, wordt deze bij het PMMA buiten het bakje gelaten. PE laat IR straling echter wel door, waardoor dit bakje wel door deze straling wordt opgewarmd. Als er na ongeveer 25 uur een gebied met koude lucht voorbijkomt, wordt dit verschil kleiner en lopen de grafieken zelfs bijna gelijk. In dit gedeelte koelt het bakje met PMMA iets minder snel doordat de infraroodstraling van het bakje zelf het bakje niet uit kan. Dit verschil is echter vrij klein. Nadat de kou voorbij is getrokken warmt het bakje met PE harder op dan het bakje met PMMA. Wij denken dat dit wederom komt doordat de wolken infraroodstraling terugkaatst die het PMMA niet doorlaat. In de middag, wanneer de zon er zo af en toe doorheen komt, wordt dit verschil weer kleiner en gaan de grafieken nagenoeg gelijk lopen. Als je inzoomt, valt te merken dat het bakje met PMMA steeds een heel klein beetje warmer is dan het bakje met PE. Dit verschil is echter vrij klein. We hadden verwacht en gezien in het vorige practicum dat dit verschil groter zou zijn. Dit kan komen doordat de zon er maar af en toe door is gekomen en niet zoals bij het eerste practicum de hele tijd op de bakjes heeft geschinen. Ook in de tweede nacht koelt het PMMA bakje minder hard af. Het verschil tussen PE en PMMA is dus ongeveer 0,5 graden.

2.4.3 Conclusie van het practicum

Uit onze practica blijkt dat er maar een miniem verschil zit tussen PMMA en PE en dus ook tussen wel en niet broeikasgassen in onze atmosfeer. Bij het eerste practicum is het verschil 1 graden, bij het tweede slechts 0,5 graden. We kunnen dus concluderen dat het effect van broeikasgassen op microschaal bijzonder klein is.

Het effect van convectie is niet veel groter. Alleen in de middag, bij warmte, lijkt er een verschil van 0,5 graden te zitten tussen wel en geen convectie.

Het effect van waterdamp is veel groter, maar niet eenduidig. Bij ons eerste proefje is het verschil zo'n 8 graden, bij het tweede 1 graden.

Waar broeikasgassen een relatief klein tot geen effect hebben, en waar convectie ook maar een miniem verschil geeft, heeft waterdamp een groot effect op de temperatuur van onze bakjes. Als er verdamping plaats kan vinden, zijn de bakjes veel kouder als de zon er op schijnt, in de nacht heeft het een licht opwarmend effect.

De verschillen die in ons practicum te zien zijn, zijn relatief kleine verschillen doordat de bakjes niet volledig waren afgesloten, er niet veel zonuren waren (hoewel 10 februari de zonnigste dag van de maand was), er een hoge luchtvochtigheid was en doordat onze bakjes waarschijnlijk warmte geleid hebben, zodat de warmte naar buiten kon ontsnappen.

3 Conclusie

We hebben nu van drie van de vier factoren door middel van een simpel proefje weten te bepalen welke het sterkste effect heeft op de temperatuur op aarde. In ons practicum, dus op micro schaal, is gebleken dat waterdamp een grotere invloed op de temperatuur heeft dan broeikasgassen. Waterdamp geeft immers een verschil van 1 tot 8 graden tussen dag en nacht en broeikasgassen en convectie veel minder. Dit komt goed overeen met de theorie die we hadden. Waterdamp is heel belangrijk voor de temperatuur op het aardoppervlak. Waterdamp neemt de warmte mee naar boven waar de warmte gemakkelijker kan uitstralen. Waterdamp is echter ook een broeikasgas en helpt dus onze aarde opwarmen. Het is zelfs het meest actieve broeikasgas. Maar waterdamp kan ook wolken creëren en zo de aarde óf verder opwarmen óf afkoelen. De mate waarin dit gebeurt ligt aan de zon. Als de zon een zwak magnetisch veld heeft, zullen er meer lage wolken gevormd worden die onze aarde afkoelen. Echter ook de vervuiling van de lucht heeft invloed hierop. Als er veel vervuiling is, zijn er namelijk veel condensatiekernen en kunnen zich veel wolken vormen. Ook bestaan deze wolken dan uit veel waterdruppeltjes, waardoor het albedo relatief groot is ten opzichte van wolken die ontstaan rond weinig waterdruppeltjes. Ook bestaan deze wolken langer.

Wij denken dat de fluctuaties in de zon het grootste effect heeft op de temperatuur aan het aardoppervlak. Niet zo zeer omdat de temperatuur zeer laag zou zijn als er geen zon was, maar meer omdat het de motor achter het hele mechanisme is in onze aardatmosfeer. Als de zon zwak is, zal ze zowel meer wolken vormen als minder straling op de aarde zelf laten vallen. Als er minder straling op de aarde valt, zal er ook minder straling naar de broeikasgassen gestuurd worden. Deze broeikasgassen kunnen dan weer minder straling terugkaatsen.

Waterdamp lijkt daarna het grootste effect te hebben. Waterdamp kwam 'als beste uit de bus' in onze test en heeft meerdere mechanismes waarin het betrokken is.

Broeikasgassen komen naar onze mening op de derde plaats terecht. Ze bleken in onze test vrij weinig effect te hebben. Onze theorie geeft aan dat ze een behoorlijk groot effect moeten hebben en de aarde aardig moeten opwarmen, mede doordat een hogere temperatuur veroorzaakt door broeikasgassen, meer waterdamp laat verdampen, waardoor er meer broeikasgassen in de lucht komen die de aarde nog verder kunnen opwarmen. Wel kan er zo weer meer warmte mee naar boven gevoerd worden die dan kan uitstralen in de ruimte.

Convectie heeft vooral effect op de lokale temperatuur. De warmte wordt door middel van convectie van de ene naar de andere plek vervoerd, maar koelt niet echt het gehele aardoppervlak af. In de tropen is het effect van convectie echter het grootst. Daar is het het warmst en wordt de meeste warmte afgevoerd.

4 Bronnen

- Ackerman, S. (onbekend). The Earth's Radiation Energy Balance, <http://cimss.ssec.wisc.edu/wxwise/homerbe.html>.
- Acryplex (2010), PMMA, <http://www.acryplex.com/nl/materialen/polymethylmetacrylaat-pmma/>
- Akatherm (2011), pluspunten HDPE, - <http://www.akatherm.com/drainage/nl/pageid/drainage-specialist-drainage-systems-soil-waste-PE-drainage-benefits>.
- Anoniem (2012), aardatmosfeer, <http://nl.wikipedia.org/wiki/Aardatmosfeer> 06-02-'12.
- Anoniem (2011), atmospheric circulation, http://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_circulation 24-11-'11.
- Anoniem, Climate/humidity table, http://www.tis-gdv.de/tis_e/misc/klima.htm.
- Anoniem (2011). Aangeslagen toestand, http://nl.wikipedia.org/wiki/Aangeslagen_toestand 01-11-'11.
- Anoniem (2012), absorption spectrum, http://en.wikipedia.org/wiki/Absorption_spectroscopy#Absorption_spectrum 24-02-'12.
- Anoniem (2011). Albedo, <http://en.wikipedia.org/wiki/Albedo> 18-12-'11.
- Anoniem (2011). Algemene gaswet, http://nl.wikipedia.org/wiki/Algemene_gaswet 22-11-'11.
- Anoniem (2011). Atmospheric methane, http://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_methane 26-11-'11.
- Anoniem (2012), atmosphere of earth, http://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Earth 05-02-'12.
- Anoniem (2011). Broeikasgassen, <http://nl.wikipedia.org/wiki/Broeikasgassen> 28-10-'11.
- Anoniem (2011). Carbon dioxide in Earth's atmosphere, http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide_in_Earth%27s_atmosphere 06-12-'11.
- Anoniem, condensatiekernen, <http://www.meteoschoonebeek.nl/condensatiekernen>.
- Anoniem (2011), cumulonimbus, <http://nl.wikipedia.org/wiki/Cumulonimbus>, 24-9-'11.
- Anoniem(onbekend), earth's atmosphere, <http://science.nationalgeographic.com/science/earth/earths-atmosphere/>
- Anoniem (2011). Earth's energy budget, http://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s_energy_budget 12-12-'11.
- Anoniem (2011), enthalpy of vaporization, http://en.wikipedia.org/wiki/Enthalpy_of_vaporization 21-12-'12.

- Anoniem (2011), evaporatie, <http://nl.wikipedia.org/wiki/Evaporatie> 06-04-'11.
- Anoniem (2012), Februari 2012: van winter naar zacht, <http://www.weerplaza.nl/weerinhethetnieuws/artikel.asp?id=1029> 29-02-'12.
- Anoniem (onbekend), Global water cycle, <http://tes.jpl.nasa.gov/mission/globalwatercycle/>
- Anoniem (2011). Goff-Gratch equation, http://en.wikipedia.org/wiki/Goff-Gratch_equation 25-10-'11.
- Anoniem (2012), Greenhouse effect, http://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse_effect 05-02-'12.
- Anoniem (2012), Hadley cell, http://en.wikipedia.org/wiki/Hadley_cell 16-02-'12.
- Anoniem (onbekend) Het is niet bekend waardoor de aarde opwarmt, <http://www.alforto.nl/index.html?opwarm.html>
- Anoniem(onbekend), klimaatmodellen en wolkenvorming, http://home.tudelft.nl/fileadmin/UD/MenC/Support/Internet/TU_Website/TU_Delft_portal/Actueel/Nieuwsberichten/Persberichten_-_ARCHIEF/2007/doc/Klimaat_en_wolken.pdf.
- Anoniem (onbekend) www.klimaatportaal.nl
- Anoniem (onbekend) <http://www.knmi.nl/cms/content/19327/broeikaseffect>
- Anoniem (2011). Koolstofdioxide, <http://nl.wikipedia.org/wiki/Koolstofdioxide> 06-12-'11.
- Anoniem (2011). Kosmische straling, http://nl.wikipedia.org/wiki/Kosmische_straling 25-08-'11.
- Anoniem (2012), LDPE, <http://nl.wikipedia.org/wiki/LDPE> 14-01-'12.
- Anoniem (2011). Magnetic field, http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_field 26-10-'11.
- Anoniem (2011). Methaan, <http://nl.wikipedia.org/wiki/Methaan> 25-10-'11.
- Anoniem (2012). Milankovitch Cycles, http://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch_cycles 24-01-'12.
- Anoniem (2011). Nevelvat, <http://nl.wikipedia.org/wiki/Nevelvat> 23-09-'11.
- Anoniem (2011). Noctilucent cloud, http://en.wikipedia.org/wiki/Noctilucent_cloud 19-10-'11
- Anoniem (2010), If carbon didn't warm us, what did?, <http://joannenova.com.au/2010/02/if-carbon-didn%E2%80%99t-warm-us-what-did/> 26-02-'10
- Anoniem (2002), Infrared spectroscopy: Theory, <http://orgchem.colorado.edu/hndbksupport/irtutor/IRtheory.pdf>.
- Anoniem (2011). Intercontinental convergence zone, http://en.wikipedia.org/wiki/Intertropical_Convergence_Zone 16-12-'11.
- Anoniem (2011). Opbouw van de aarde, http://nl.wikipedia.org/wiki/Opbouw_van_de_Aarde 27-01-'12.

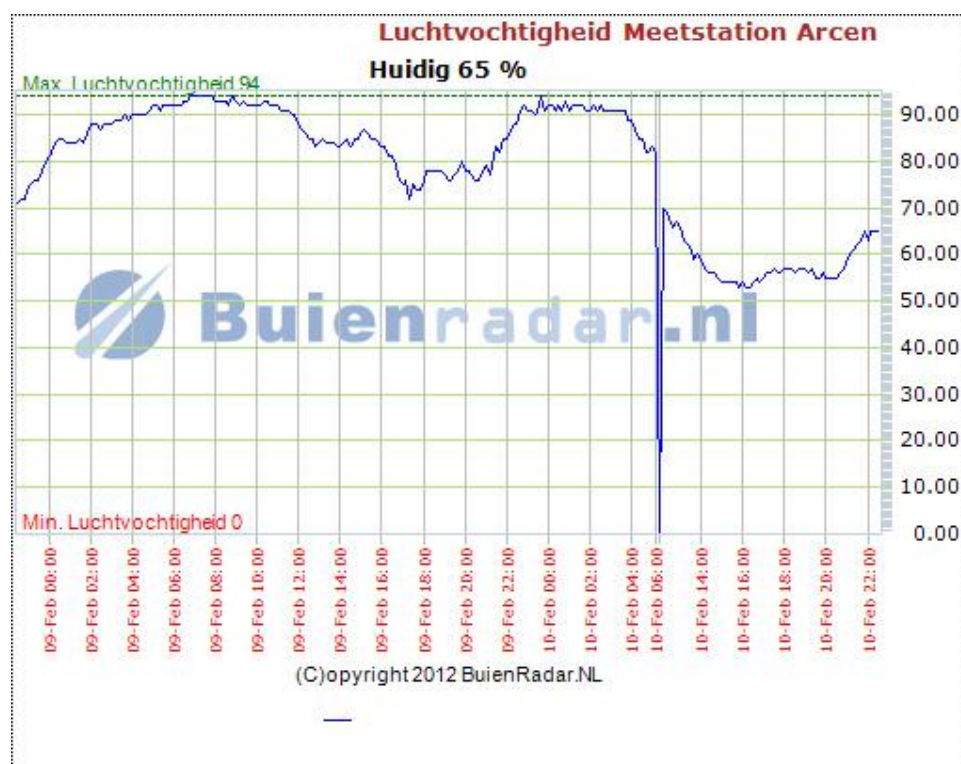
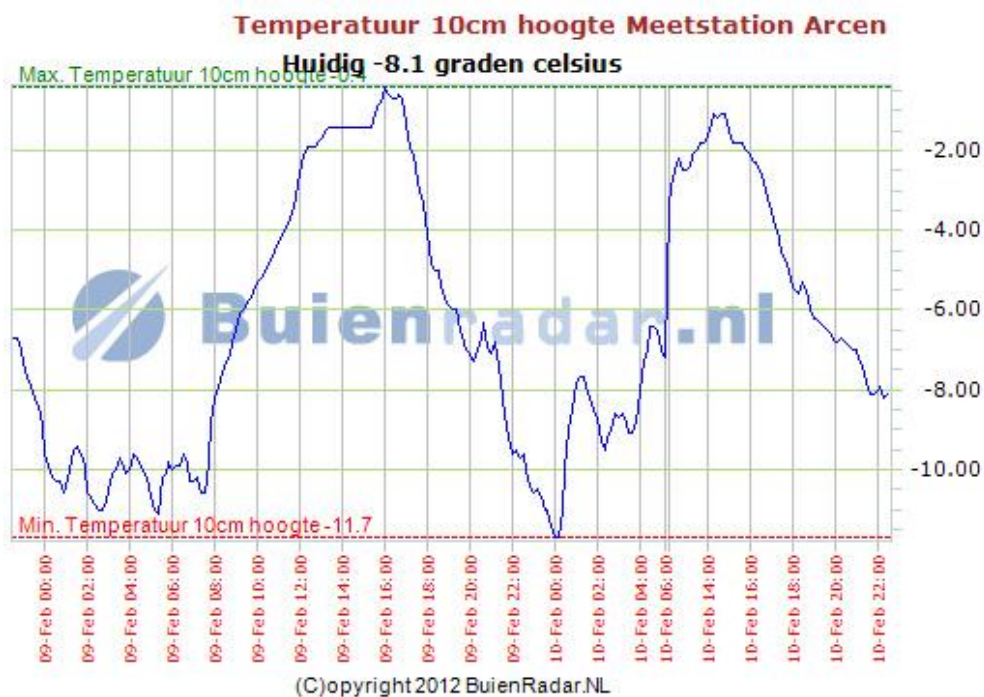
- Anoniem (2011). Ozone, <http://en.wikipedia.org/wiki/Ozone> 27-11-'11.
- Anoniem (onbekend), ozonlaag, <http://www.milieuloket.nl/9353000/1/j9vvhurbs7rkq9/vhurdyxqgmyq>
- Anoniem (2012), passaat, <http://nl.wikipedia.org/wiki/Passaat> 12-02-'12.
- Anoniem (2011), polaire cel, http://nl.wikipedia.org/wiki/Polaire_cel 02-09-'12.
- Anoniem (2012), Polyetheen, <http://nl.wikipedia.org/wiki/Polyetheen> 13-02-'12.
- Anoniem (2011), polymethylmethacrylaat, <http://nl.wikipedia.org/wiki/Polymethylmethacrylaat> 7-12-'11
- Anoniem (2011). Properties of water, [http://en.wikipedia.org/wiki/Water_\(molecule\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Water_(molecule)) 07-12-'11.
- Anoniem (2011). Proton-Proton chain reaction, http://en.wikipedia.org/wiki/Proton-proton_chain 11-10-'11.
- Anoniem (2011). Rayleighverstrooiing, <http://nl.wikipedia.org/wiki/Rayleighverstrooiing> 10-09-'11.
- Anoniem (2011). Solar cycle, http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cycle 25-10-'11.
- Anoniem (2011). Solar variation, http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_variation 12-09-'11.
- Anoniem (2011). Sunlight, <http://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight> 24-10-'11.
- Anoniem (onbekend), The basics of evaporation and evapotranspiration <http://ag.arizona.edu/pubs/water/az1194.pdf>.
- Anoniem, Water in the tropical atmosphere, http://clivac.eri.ucsb.edu/classes/Tropical_meteorology/classes_ucsb/water_in_atmosphere/Water%20in%20the%20Tropical%20Atmosphere.ppt#266,10,2) The energy for evapotranspiration is provided by solar radiation: available in large quantities in the tropics.
- Anoniem (2011), Verdampingswarmte, <http://nl.wikipedia.org/wiki/Verdampingswarmte> 19-07-'11.
- Anoniem (2012). Wrijving, <http://nl.wikipedia.org/wiki/Wrijving> 24-01-'12.
- Anoniem (2011). Water vapor, http://en.wikipedia.org/wiki/Water_vapor 07-12-'11.
- Anoniem (2011). Wet van Planck, http://nl.wikipedia.org/wiki/Wet_van_Planck 27-07-'11.
- Anoniem (2011). Zonnewind, <http://nl.wikipedia.org/wiki/Zonnewind> 23-20-'11.
- Anoniem (2011). Zuurstofisotopen-analyse, <http://nl.wikipedia.org/wiki/Zuurstofisotopen-analyse> 16-06-'09.
- Ariaens, D. e.a. (2006), Terra, Aardrijkskunde voor de tweede fase VWO, tekstboek A.
- Berendsen, H. J. A. (2005), Landschap in delen: overzicht van de geofactoren.
- Brinkman, E. (2007), 'koolstofdioxide', in: chemische feitelijkheden, editie 54, nummer 240, november 2007, http://www.chemischefeitelijkheden.nl/Uploads/Magazines/Koolstofdioxide-240_3.pdf

- Brinkman, E. (2007). 'Trillende moleculen', in: Chemische feitelijkheden, 54, november 2007, 4-5 (http://www.chemischefeitelijkheden.nl/Uploads/Magazines/Koolstofdioxide-240_3.pdf).
- Buienradar (2012). Weergrafiek meetstation Arcen, <http://buienradar.nl/weergrafiek.aspx?bron=227-2-2012>.
- Crok, M. (2008), 'Verkoelende blik op het klimaat', in NWT, 4, april, 46-53.
- Driesen, M. (2006). De Zon, <http://users.telenet.be/kosmonet/astronomie/zon.html> 15-02-'06.
- Hieb, M. (2007). Water Vapor Rules the Greenhouse System, http://www.geocraft.com/WVFossils/greenhouse_data.html, 02-03-'07.
- KNMI, verdamping, <http://www.knmi.nl/cms/content/34791/verdamping>.
- Kooi, H.O. van der (2008). Hoeveel infrarood absorbeert kooldioxide eigenlijk?, <http://www.ascentie.dds.nl/broeikas/absorptie.htm> oktober 2008.
- Kowoma.de (2009), earth's atmosphere, <http://www.kowoma.de/en/gps/additional/atmosphere.htm> 19-4-'09.
- Kverno, D. (onbekend) Oscillations and Resonance in a Carbon Dioxide Laser, <http://www.phy.davidson.edu/stuhome/derekk/resonance/pages/main.htm>.
- Luhr, J. F. (ed.), vert.: Beekman, G. & Buissonjé, B. de & Echternach, E. & Heukels, P. (2008) 'Aarde', Singapore.
- Marshak, S. (2001), Earth, portrait of a planet
- Miskotte, k. (2005) NLC's: een geheimzinnig verschijnsel, http://www.koenmiskotte.nl/nlc/nlc_page.htm 19-06-'05.
- Moebius, E. (2005). Amount of Energy the Earth Gets from the Sun, http://helios.gsfc.nasa.gov/qa_sun.html#sunenergymass januari, 2005.
- Mortensen, L. Oxfeldt (reg.) (2007), documentaire 'The cloud mystery', Kopenhagen: TV2 (Denmark): http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=ANMTPF1blpQ#! 24-07-'11.
- Rörsch, A. (2011), de fysica achter het broeikaseffect, <http://climategate.nl/author/a-rorsch/>, 30-7-'11.
- Siebesma, P. (2010), verstoorde wolken in een opwarmend klimaat, http://www.knmi.nl/cms/content/89749/verstoorde_wolken_in_een_opwarmend_klimaat, 22-10-'10
- Sigmund, P. (2010), wat beweegt de atmosfeer?, http://www.knmi.nl/cms/content/80274/wat_beweegt_de_atmosfeer, 27-4-'10 .
- Spencer, R. W. (2008), climate confusion, New York
- Stammen, P. (2000), satellietinstrumenten meten gat in de ozonlaag, <http://www.kennislink.nl/publicaties/satellietinstrumenten-meten-gat-in-de-ozonlaag>, 01-09-'00
- Stanford Linear Accelerator Center (onbekend). High Energy Cosmic Rays and the Sun <http://www2.slac.stanford.edu/vvc/cosmicrays/crsun.html>.

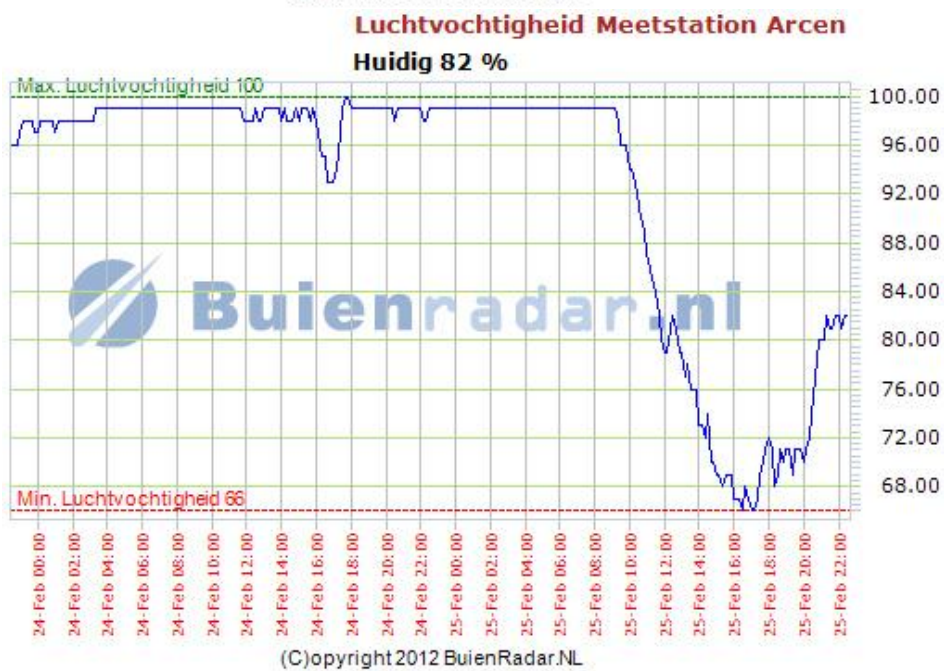
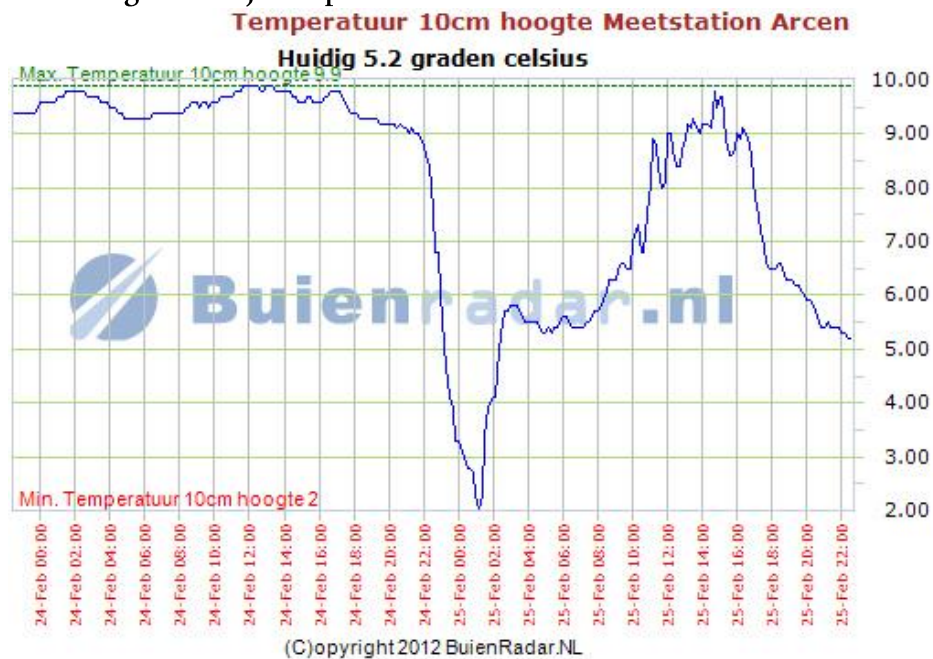
- Vos, R. de (2009). De Zon, http://www.klimaatgek.nl/cms/?Nieuwe_inzichten:De_zon 26-12-'09.
- Vos, R. de (2009), De thermostaat hypothese, http://www.klimaatgek.nl/cms/?Nieuwe_inzichten:De_thermostaat_hypothese, 26-12-'09.
- Vos, R. de (2010). Gedrag van belangrijkste broeikasgas waterdamp is onzeker, <http://www.klimaatgek.nl/archief%202010.html> 11-11-'10.
- Vos, R. de (2010). CO2 sensitivity, http://www.klimaatgek.nl/cms/?De_feiten:CO2_sensitivity 19-11-'10.
- Vos, R. de (2010), Latente warmteflux, http://www.klimaatgek.nl/cms/?Nieuwe_inzichten:Latente_warmteflux, 21-5-'10
- Vos, R. de (2011). Broeikastheorie, http://www.klimaatgek.nl/cms/?De_feiten:Broeikastheorie 27-05-'11.
- Vos, R. de (2011). CO2 in het verleden, http://www.klimaatgek.nl/cms/?De_feiten:CO2_in_het_verleden 27-05-'11.
- Vos, R. de (2010) Gedrag van belangrijkste broeikasgas waterdamp is onzeker <http://www.klimaatgek.nl/archief%202010.html> 11-11-'10.
- Vos, R. de (2011), klimaatmodellen, http://www.klimaatgek.nl/cms/?De_feiten:Klimaatmodellen, 12-12-'11.
- Vos, R. de (2011). Zonnecycli, http://www.klimaatgek.nl/cms/?Nieuwe_inzichten:Zonnecycli 09-08-'11.
- Vos, R. de (2011), wolken, http://www.klimaatgek.nl/cms/?De_feiten:Wolken, 12-12-'11
- Wetherill, G. W. & Alexander, C. M.O'D (2011). Meteorite, <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/378148/meteorite/259018/Cosmic-ray-exposure-ages-of-meteorites> 27-10-'11.

5 Bijlagen

5.1 Weersomstandigheden tijdens practicum 1



5.2 Weersomstandigheden tijdens practicum 2



6 Logboeken

6.1 Logboek Sjors

Datum	Tijd (in min.)	Wat?
20-6-2011	30	gesprek met meneer De Vos
27-7-2011	65	lezen artikel broeikastheorie
5-9-2011	30	met Bob overleggen en hoofd- en deelvragen bedenken
6-9-2011	50	plan van aanpak maken
21-9-2011	15	gesprek met meneer Heil
27-10-2011	150	werken aan hoofdstuk 1
30-10-2011	35	werken aan hoofdstuk 1
1-11-2011	20	werken aan hoofdstuk 1
2-11-2011	120	gesprek met meneer De Vos en werken aan hoofdstuk 1
3-11-2011	40	informatie zoeken over atmosfeer en afkoelende werking convectie en verdamping
6-11-2011	45	informatie zoeken over afkoelende werking convectie en verdamping
9-11-2011	60	informatie zoeken over broeikasgassen
13-11-2011	35	informatie zoeken en stukje schrijven over absorptiespectra
14-11-2011	45	informatie zoeken en stukje schrijven over absorptiespectra
15-11-2011	50	gesprek met Bob over voortgang en practicum en boeken zoeken over het klimaat
"	60	informatie zoeken en stukje schrijven over absorptie(spectra)
16-11-2011	60	gesprekken met meneer de Vos en meneer Heil
17-11-2011	30	inzetten proef practicum
18-11-2011	50	opruimen proef practicum, informatie zoeken absorptie
20-11-2011	95	informatie zoeken + stukje schrijven convectie
24-11-2011	15	proberen grafieken proef practicum te maken
3-12-2011	60	informatie zoeken + stukje schrijven convectie
4-12-2011	120	informatie zoeken + stukje schrijven convectie
7-12-2011	45	gesprek met meneer de Vos en uitleg U-lab, resultaten proef practicum bekijken
9-12-2011	125	inzetten proef practicum 2 en werken aan hoofdstuk convectie
10-12-2011	105	werken aan hoofdstuk convectie + informatie zoeken over verdamping
"	15	opruimen proef practicum 2
11-12-2011	30	proberen meetgegevens practicum te verwerken + informatie zoeken over verdamping + convectie
13-12-2011	30	informatie zoeken over verdamping
14-12-2011	110	verwerken meetgegevens proef practicum 2 en werken aan hoofdstuk verdamping

16-12-2011	130	verwerken meetgegevens proef practicum 2 en werken aan hoofdstuk verdamping
17-12-2011	125	informatie zoeken over verdamping
21-12-2011	40	gesprekken met meneer de Vos en meneer Heil
23-12-2011	90	werken aan hoofdstuk verdamping
24-12-2011	90	werken aan hoofdstuk verdamping
27-12-2011	120	werken aan hoofdstuk verdamping
28-12-2011	60	werken aan hoofdstuk verdamping, proberen thermokoppels te ijken.
30-12-2011	120	werken aan hoofdstuk verdamping
2-1-2012	95	werken aan hoofdstuk verdamping + achtergrondinformatie practicum
3-1-2012	120	werken aan achtergrondinformatie practicum
7-1-2012	10	bronvermeldingen samenvoegen
8-1-2012	50	werken aan hoofdstuk verdamping
10-1-2012	30	ijken thermokoppels
18-1-2012	135	gesprek met meneer de Vos en inzetten practicum deel 1
21-1-2012	15	opruimen practicum deel 1
24-1-2012	65	invoeren gegevens practicum deel 1 en inzetten herhaling
26-1-2012	35	opruimen practicum deel 1 en controleren stralingsbalans
27-1-2012	95	invoeren gegevens practicum deel 1.2, met meneer Heil kijken waar het probleem zit + proberen op te lossen en inzetten practicum deel 1.3
28-1-2012	155	controleren en verwerken gecontroleerde versie
29-1-2012	80	controleren
30-1-2012	20	proberen gegevens practicum 1.3 in te voeren
1-2-2012	55	gesprek met meneer de Vos en inzetten practicum 2,1
6-2-2012	30	resultaten practicum 2.1 verwerken
8-2-2012	40	inzetten practicum 1.4
13-2-2012	20	verwerken meetgegevens practicum 1.4
22-2-2012	65	verbeteren bronvermelding
23-2-2012	30	inzetten practicum 2.2
25-2-2012	240	bespreken practicum, afmaken bronvermelding, beschrijven proefopstelling, controleren werkstuk
26-2-2012	300	opruimen practicum 2.2, controleren werkstuk
27-2-2012	120	bespreken practicum, eigen conclusies op papier zetten
28-2-2012	45	bespreken practicum en controleren conclusie
29-2-2012	35	gesprek met meneer de Vos
4-3-2012	60	controleren analyse, plaatjes zoeken

Totaal
74 u 20 min

6.2 Logboek Bob

Datum	Tijd (in min.)	Wat?
20-6-2011	30	Gesprek met meneer De Vos
23-6-2011	60	Lezen artikel over Broeikaseffect en onderzoek Dr. Van Andel
5-9-2011	30	Overleg over onderwerp/hoofdvragen/deelvragen
6-9-2011	50	Overleg over uitvoering practicum, taakverdeling
"		Ondertussen onderzoek Dr. Van Andel herlezen
6-9-2011	80	Informatiebronnen gezocht
20-9-2011	25	Verdiepen in onderzoek Van Andel (andere bronnen bekijken)
21-9-2011	15	Gesprek met meneer Heil en De Vos over het proefje
25-10-2011	85	Bronnen zoeken en stukje schrijven over de zon
26-10-2011	95	Bronnen zoeken en stukje schrijven over de zon
27-10-2011	170	Bronnen zoeken en stukje schrijven over de zon
29-10-2011	45	Bronnen zoeken en stukje schrijven over de zon
1-11-2011	35	Bronnen zoeken en stukje schrijven over broeikasgassen
1-11-2011	10	PMMA en PE uitzoeken
2-11-2011	25	Gesprek met meneer De Vos
3-11-2011	25	Fouten verbeterd (bronnen onder de afbeeldingen gezet)
7-11-2011	35	Verder bronnen zoeken voor de zon
8-11-2011	45	Meer info over zon en over de baan van de zon zoeken
9-11-2011	80	Info over broeikasgassen en straling gezocht en stukje geschreven
14-11-2011	80	Info over broeikasgassen en straling gezocht en stukje geschreven
15-11-2011	15	Praten met Sjors over wie wat nog gaat doen
15-11-2011	35	Boeken zoeken in de bibliotheek over het onderwerp
15-11-2011	30	Boek van de bibliotheek doorspitten op bruikbare gegevens
16-11-2011	60	Gesprekken met meneer de Vos en Heil en uitleg over materiaal
16-11-2011	105	Bronnen gezocht en stukje geschreven over positie aarde + lichte aanpassingen aan rest hoofdstuk zon
17-11-2011	40	Boek Atmospheric Science doorgekeken naar bruikbare informatie
22-11-2011	75	Tekst verbeteren/vergemakkelijken + Sjors' tekst erin plakken
23-11-2011	35	Sjors' tekst erin plakken + stukje extra erbij schrijven
24-11-2011	35	Stukje kwantummechanica gelezen + molecuul vibraties geschreven
3-12-2011	35	Stukje over broeikasgassen geschreven en stuk verbeterd
4-12-2011	175	Stuk over broeikasgassen geschreven + berekening wet Goff-Gratch
7-12-2011	15	Gesprek met mr. De Vos
7-12-2011	85	Stuk over ozon geschreven en vorige teksten lichtjes bewerkt
8-12-2011	135	Stuk over ozon, waterdamp en koolstofdioxide geschreven
10-12-2011	45	Stukje over koolstofdioxide
13-12-2011	85	Stukje over methaan geschreven
14-12-2011	65	Stukje over albedo geschreven en over Svensmark gelezen
18-12-2011	55	Gezocht naar meer onderwerpen op klimaatgek.nl

20-12-2011	15	Bronnen zoeken
21-12-2011	45	Gesprek met mr. De Vos en mr. Heil en regelen extra thermokoppels
21-12-2011	20	Bronnen zoeken
23-12-2011	20	To-do-list voor het practicum opgesteld
30-12-2011	20	Artikel uit oude NWT gelezen
3-1-2012	160	Stuk over broeikasgassen en over stralingsbalans geschreven
5-1-2012	135	Aan stralingsbalans gewerkt + filmpjes over kosmische straling bekeken
23-1-2012	40	Gesprek met mr. De Vos
24-1-2012	50	Loggen van de meting + meer info over Van Andel's proefje opgezocht
25-1-2012	25	Van Andel's uitleg van Miskolczi's theorie
"	60	Verbeteringen aangebracht en De Jager opgezocht
"	75	Lezen van Sjors' stukje en controleren
28-1-2012	45	Lezen van Sjors' stukje en controleren
29-1-2012	210	Eigen stuk verbeteren en alles in elkaar zetten
1-2-2012	15	Gesprek met mr. De Vos
2-2-2012	25	Toevoeging geschreven over CO2 in de oceanen
16-2-2012	15	Gesprek met mr. De Vos
23-2-2012	125	Alles in elkaar gezet en voorpagina, inhoud en inleiding gemaakt. Zo ook layout veranderd
25-2-2012	390	Alles in elkaar zetten en lay-out veranderen
26-2-2012	355	Controleren/doorlezen en bewerken van werkstuk
27-2-2012	100	Analyseren van het tweede practicum
28-2-2012	190	Analyseren van de practica + conclusies schrijven
29-2-2012	90	Plaatjes perfectioneren
1-2-2012	35	Gesprek met mr. De Vos
4-3-2012	140	Controleren/doorlezen en bewerken van werkstuk en logboeken toevoegen
6-3-2012	120	De resultaten van de controles in het werkstuk verwerken & compleet maken.
Totaal		
77 u 45 min		