

---

**Computerondersteund modelleren**  
**Natuurkunde**

# **Broeikas Aarde: een leefbare temperatuur**

**Docentenhandleiding**

**Universiteit Utrecht**

**Cdβ** Centrum voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen

**Computerondersteund modelleren**  
**Natuurkunde**  
**Broeikas Aarde: een leefbare temperatuur**  
**Docentenhandleiding**

Koos Kortland

© 2002 Centrum voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen (Cd $\beta$ ),  
Universiteit Utrecht

Deze publicatie mag in ongewijzigde vorm worden verveelvoudigd en verspreid ten behoeve van niet-  
commercieel gebruik in het onderwijs, mits met vermelding van deze bepaling en van het bovenstaande copyright.  
Voor alle andere vormen van openbaarmaking is schriftelijke toestemming van de Universiteit Utrecht vereist.

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Basismodel</b>	<b>6</b>
	Stappen	6
	Aandachtspunten	7
<b>3</b>	<b>Model Aarde zonder atmosfeer</b>	<b>9</b>
	Stappen	9
	Test	10
	Onderzoek	11
	Aandachtspunten	11
<b>4</b>	<b>Model Aarde met atmosfeer</b>	<b>13</b>
	Stappen	13
	Test	15
	Onderzoek	15
	Aandachtspunten	16
	Presentatie	16
<b>5</b>	<b>Planning</b>	<b>18</b>



# 1 Inleiding

In het project *Broeikas Aarde: een leefbare temperatuur* worden in het werkplan (paragraaf 2 van het leerlingenmateriaal) drie tussenproducten gedefinieerd. Deze tussenproducten zijn bedoeld om enerzijds het werken van de groep leerlingen te structureren en om anderzijds de docent de gelegenheid te bieden de voortgang van dat werken te beoordelen. De bespreking van elk tussenproduct kan worden gezien als een 'go/no go moment'.

## **Docentenhandleiding**

In deze docentenhandleiding geven we een overzicht van de modellen die achtereenvolgens in de drie tussenproducten worden verwacht, samen met enkele aandachtspunten voor de bespreking (paragraaf 2 t/m 4). Dit overzicht wordt afgesloten met een ruwe tijdsplanning voor de uitvoering van dit project (paragraaf 5).

## 2 Basismodel

Het eerste tussenproduct betreft het basismodel van een voorwerp waaraan enerzijds warmte wordt toegevoerd en dat anderzijds warmte afgeeft aan zijn omgeving. De vraag is welke invloed dat heeft op de temperatuur van het voorwerp.

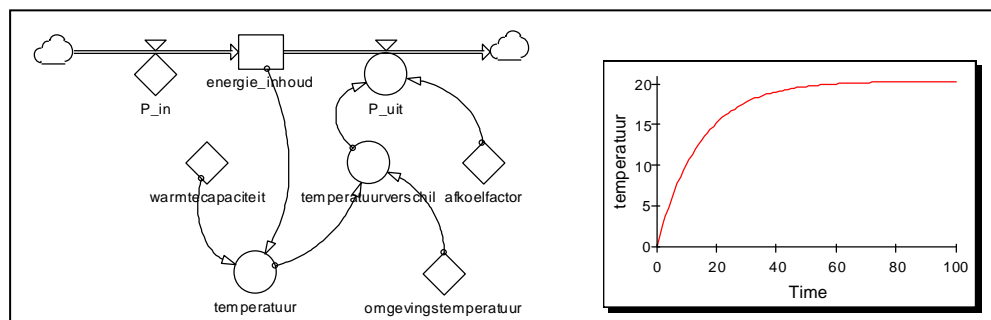
### Stappen

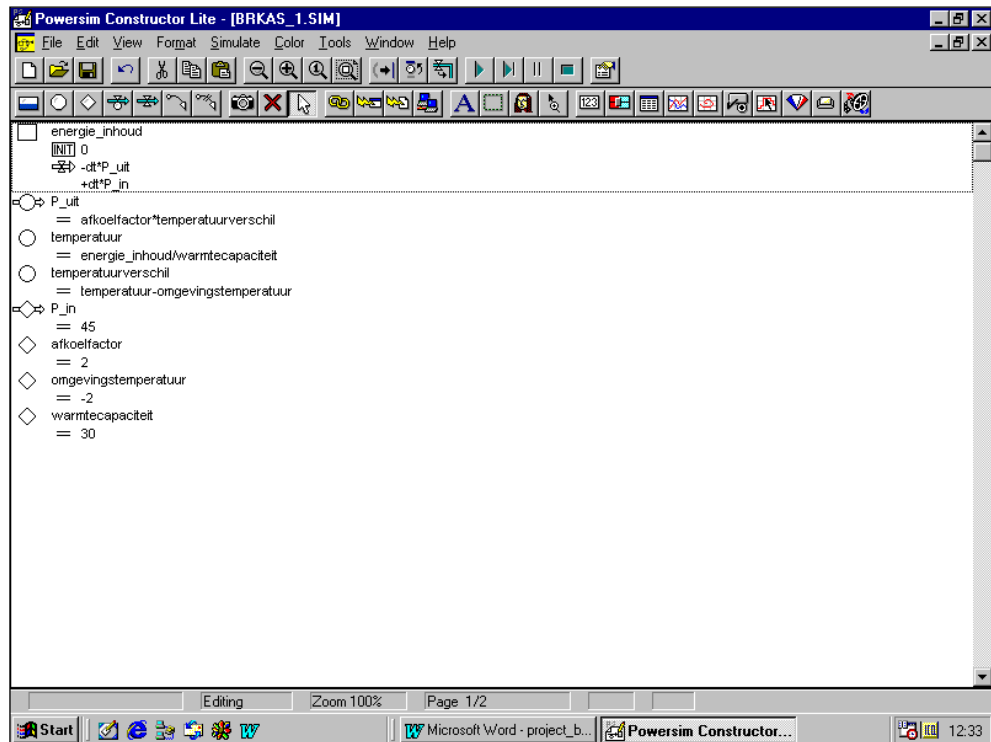
- Er is sprake van energiestromen (warmte) het voorwerp in en uit, dus de voorraadgrootheid is iets als *energie\_inhoud* van het voorwerp.
- Deze *energie\_inhoud* bepaalt de *temperatuur* van het voorwerp via de *warmtecapaciteit* van het voorwerp:  $temperatuur = energie\_inhoud / warmtecapaciteit$ .

Formeel is dit fysisch niet helemaal correct. De energie-inhoud van een object zou je fysisch kunnen 'vertalen' met inwendige energie. Bij een temperatuur  $T = 0$  K is deze inwendige energie volgens de gangbare definitie ongelijk aan nul: de totale kinetische energie van de moleculen is dan nul, en de totale vanderwaalsenergie van de moleculen zit dan op zijn/haar minimum – maar dit minimum heeft een negatieve waarde omdat het gebruikelijk is om de vanderwaalsenergie van de moleculen op nul te stellen als deze zich op een oneindig grote afstand van elkaar bevinden. De daarvan afgeleide, gangbare redenering gaat dan ook standaard uit van energieveranderingen en temperatuurstijgingen, en niet van absolute waarden. Toevoer van energie (warmte) aan een voorwerp veroorzaakt niet een temperatuur, maar een *temperatuurstijging* volgens  $Q = C \cdot \Delta T = C \cdot (T_e - T_b)$ . Hierin is  $Q$  de toegevoerde warmte,  $C$  de warmtecapaciteit, en  $\Delta T$  de (resulterende) temperatuurstijging met  $T_e$  als eindtemperatuur en  $T_b$  als begintemperatuur. Voor de leerlingen is het bovengeschetste 'probleem' rond inwendige energie en temperatuur echter (nog) onbekend. De volgende redenering zal daardoor voor hen wel acceptabel zijn. Als we starten met een begintemperatuur  $T_b = 0$  K, is de eerdergenoemde formule te schrijven als  $Q = C \cdot T_e$ . Of korter:  $Q = C \cdot T$ . Hierin is  $T$  dan de (absolute) temperatuur die het voorwerp krijgt als gevolg van een warmtetoever  $Q$ . Deze warmtetoever kunnen we zien als energie die het voorwerp is ingegaan – en dus inmiddels in het voorwerp 'opgeslagen' moet liggen (in wat voor vorm dan ook). Dus: de energie-inhoud van het voorwerp. Voor het modelleren kan zo worden uitgegaan van een lineair verband tussen *energie\_inhoud* en *temperatuur* van het voorwerp, met de *warmtecapaciteit* als evenredigheidsconstante.

- Warmtetoever en -afgifte worden gedefinieerd als hoeveelheid warmte per tijdseenheid: als vermogen dus. Modelgrootheden:  $P_{in}$  en  $P_{uit}$ .
- De warmte-afgifte is recht evenredig met het *temperatuurverschil* tussen voorwerp en omgeving (reële praktijksituatie bij bijvoorbeeld woningverwarming en temperatuurregeling menselijk lichaam):  $P_{uit} = afkoelfactor * temperatuurverschil$ , met  $temperatuurverschil = temperatuur - omgevingstemperatuur$ . De evenredigheidsconstante *afkoelfactor* zegt iets over de mate van warmte-isolatie: hoe beter de warmte-isolatie is, des te kleiner is de afkoelfactor. In deze evenredigheidsconstante zit overigens ook de oppervlakte van het voorwerp verwerkt. Die oppervlakte kan natuurlijk ook als afzonderlijke grootheid worden opgenomen:  $P_{uit} = afkoelfactor * oppervlakte * temperatuurverschil$ .
- De warmtetoever mag als constant worden verondersteld (benadering van eerdergenoemde reële praktijksituaties).

Deze stappen leiden tot het in figuur 1 weergegeven model, waarin overigens niet is gewerkt met reële praktijkwaarden. Dat komt in de modellen van de Aarde zonder en met atmosfeer wel.





Figuur 1 – Model van een voorwerp met in- en uitgaande energiestroom en daaruit resulterende temperatuur.

Uit eerdere ervaringen blijkt dat veel leerlingen – als ze niet op het hierboven beschreven spoor worden gezet – er voor kiezen om te werken met een basislijn van temperatuur als voorraadgrootte en temperatuurverandering (toename/afname) als in- en uitstroomgrootte – zie het eerste aandachtspunt voor de bespreking van het eerste tussenproduct. Een dergelijk model is weergegeven in figuur 2.

### Aandachtspunten

Voor de bespreking van dit eerste tussenproduct kan gedacht worden aan:

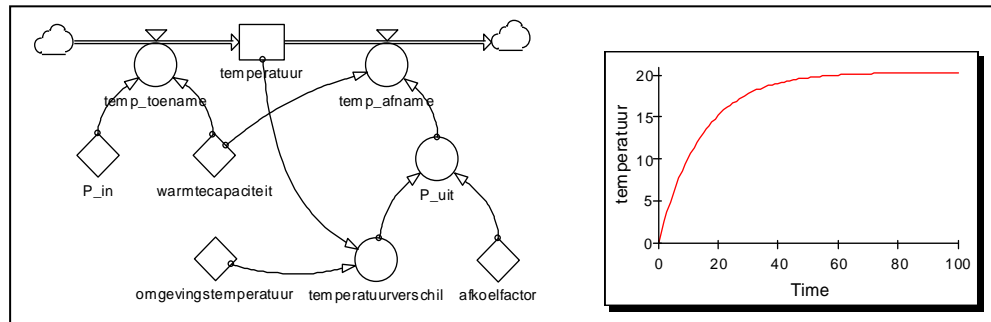
- Begrijpen van de relaties in het model: wat zal er met de ‘evenwichtstemperatuur’ gebeuren als...  $P_{in}$  groter of kleiner wordt, de *afkoelfactor* (of k-waarde) groter of kleiner wordt, de *omgevingstemperatuur* groter of kleiner wordt enzovoort.

Uit eerdere ervaringen is gebleken dat leerlingen er relatief vaak voor kiezen om in dit soort modellen te werken met een basislijn van temperatuur als voorraadgrootte en temperatuurverandering (toename/afname) als in- en uitvoergrootte. Daar is geen bezwaar tegen, maar het maakt deze modellen voor fysici wat lastig te lezen. In het leerlingenmateriaal probeert paragraaf 4 over het modelleren van warmte en temperatuur de leerlingen op het spoor van een basislijn met energie-inhoud en energiestromen te zetten.

- De vraagstelling voor het vervolg van dit project – iets als het bouwen van een model van de stralingsbalans van de Aarde zonder en met atmosfeer en het uitvoeren van wat onderzoek met die modellen. Daarbij kan gevraagd worden naar de relatie met het basismodel: wat stellen  $P_{in}$  en  $P_{uit}$  van het basismodel voor in een model van de Aarde, van welke factoren hangen die  $P_{in}$  en  $P_{uit}$  in zo’n model van de Aarde af? Met dergelijke vragen is te controleren of de eerder opgegeven achtergrondliteratuur in paragraaf 3 van het leerlingenmateriaal in grote lijnen is begrepen.
- Het werkplan voor het vervolg van dit project, dat de volgende elementen zou moeten bevatten: het ontwerpen, bouwen en testen van een model van de Aarde zonder en met atmosfeer, en het uitvoeren van een onderzoek met deze modellen naar de invloed van veranderende omstandigheden aan het aardoppervlak en in de atmosfeer op de evenwichtstemperatuur. Het testen van het model van de Aarde zonder atmosfeer kan door dit model los te laten op een of meer andere planeten zonder atmosfeer in ons zonnestelsel (bijvoorbeeld Mars). Het testen van het model van de Aarde met atmosfeer kan door vergelijking met de reële omstandigheden op de huidige Aarde.

Uit eerdere ervaringen is gebleken dat het uitvoeren van het genoemde onderzoek met de

modellen nogal eens achterwege blijft, of in elk geval dat de onderzoeksresultaten niet worden weergegeven.



Figuur 2 – Model van een voorwerp met een basislijn van temperatuur als gevolg van temperatuuroename en -afname. In dit model zijn de beide temperatuurveranderingen als in- en uitstroomgrootte gedefinieerd als  $temp\_toename = P\_in/warmtecapaciteit$  resp.  $temp\_afname = P\_uit/warmtecapaciteit$ . De overige rekengrootheden en constanten zijn identiek aan die in het model van figuur 1.



### 3 Model Aarde zonder atmosfeer

Het tweede tussenproduct betreft een model van een Aarde zonder atmosfeer. Daarbij gaan we uit van de energiestromen in figuur 4 van paragraaf 3 over fysische modellen van een Aarde zonder en met atmosfeer in het leerlingmateriaal.

#### Stappen

- De energie-instroom  $S$  is ook hier constant:  $S = \frac{1}{4} \cdot S_z$ . Hierin is  $S_z$  de zonneconstante. Dus:  $\text{instraling} = \text{factor} \cdot \text{zonneconstante}$ , met  $\text{factor}$  gedefinieerd als  $\frac{1}{4}$  en zonneconstante gedefinieerd als  $1,4 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ . Echter, een deel van deze instraling ter grootte van  $\alpha \cdot S$  wordt direct gereflecteerd, afhankelijk van de waarde van het albedo  $\alpha$ :  $\text{reflectie} = \text{albedo} \cdot \text{instraling}$ , met  $\text{albedo}$  gedefinieerd als 0,3. De toename  $P_{\text{in}}$  van de energie-inhoud van de Aarde wordt dan gegeven door het verschil van  $\text{instraling}$  en  $\text{reflectie}$ :  $P_{\text{in}} = \text{instraling} - \text{reflectie}$ .

De grootte  $\text{reflectie}$  kan ook worden opgevat als een uitstroom. Voor de werking van het model lijkt dat weinig uit te maken: het rekenen levert dezelfde resultaten. Maar ook fysisch gezien is er geen bezwaar tegen: je kunt de reflectie opvatten als een energiestroom die niet door de Aarde wordt geabsorbeerd (zoals nu in het model), of als een energiestroom die weliswaar op het aardoppervlak terecht komt maar onmiddellijk ongewijzigd weer richting heelal verdwijnt.

- De energie-uitstroom bestaat alleen uit  $\text{uitstraling}$  (na absorptie) ter grootte  $\sigma T^4$ . Hierin is  $T$  de  $\text{temperatuur}_{\text{aarde}}$  en  $\sigma$  de constante van Stefan-Boltzmann met een waarde van  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ . Dus:  $\text{uitstraling} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \text{temperatuur}_{\text{aarde}}^4$ . De afname  $P_{\text{uit}}$  van de energie-inhoud van de Aarde wordt dan gegeven door de  $\text{uitstraling}$ :  $P_{\text{uit}} = \text{uitstraling}$ .

Uit het eerste model moeten nu dus de grootheden temperatuurverschil, omgevings-temperatuur en afkoelfactor worden verwijderd. Deze grootheden hebben namelijk betrekking op een andere praktijksituatie.

- De  $\text{temperatuur}_{\text{aarde}}$  wordt bepaald door de  $\text{energie-inhoud}$  en de  $\text{warmtecapaciteit}$   $C$ , net als in het vorige model. Dus:  $\text{temperatuur}_{\text{aarde}} = \text{energie-inhoud} / \text{warmtecapaciteit}$ . Met de aannames in paragraaf 3 van het leerlingmateriaal over dikte en samenstelling van de standaarddaarlag komen we uit op  $C = 6,5 \cdot 10^5 \text{ J/K}$ .

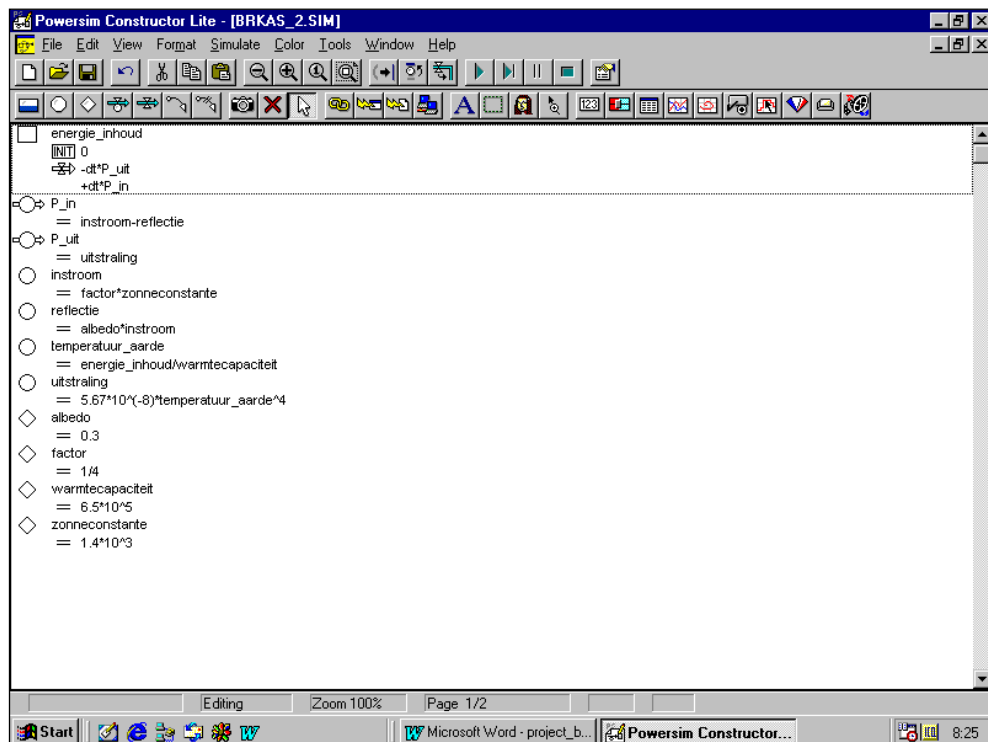
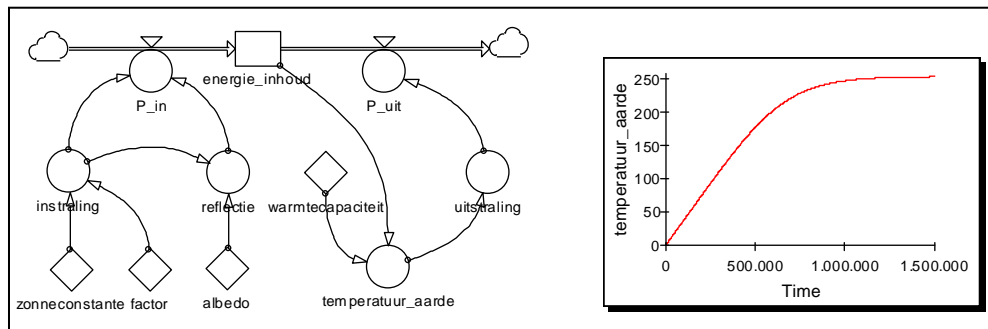
Deze berekening van  $C$  loopt via volume aardlag ( $V = A \cdot d = 0,2 \text{ m}^3$ ) naar volume water en zand bij een verhouding van 2:1 (0,133 resp. 0,067  $\text{m}^3$ ) naar massa water en zand via de respectievelijke dichtheid ( $m = \rho \cdot V = 133$  resp. 107 kg) naar warmtecapaciteit water en zand via de respectievelijke soortelijke warmte ( $C = m \cdot c = 5,6 \cdot 10^5$  resp.  $8,6 \cdot 10^4 \text{ J/K}$ ).

- Het runnen van dit model moet uitkomen op een aardtemperatuur  $T$  die duidelijk onder de waarde van 273 K (ofwel 0 °C) ligt.

De bovenstaande stappen leiden tot het in figuur 3 weergegeven model van een Aarde zonder atmosfeer.

Hierbij moet nog worden opgemerkt dat door het gebruik van realistische waarden voor het succesvol runnen van het model de tijdschaal en de tijdstap moeten worden aangepast. De in figuur 3 weergegeven run is gedaan bij een tijdschaal van 1.500.000 en een tijdstap van 1.000. Het opwarmen van het aardoppervlak lijkt dan in een dag of 17 plaats te vinden. Voor een stukje aardoppervlak van 1  $\text{m}^2$  en 20 cm diepte is dat wel voorstelbaar, voor de Aarde als geheel minder. We houden hierbij natuurlijk geen rekening met het opwarmen van de Aarde ‘van buitenaf’: tijdens het proces van opwarmen wordt vanuit de in temperatuur stijgende oppervlaktelaag voortdurend warmte afgegeven naar dieper gelegen lagen. Tenminste, als we de Aarde in eerste instantie opvatten als een materiebolk met een temperatuur van 0 K. Voor een dergelijke Aarde is de ‘opwarmtijd’ tot de evenwichtstemperatuur is bereikt uiteraard veel langer dan de hierboven genoemde 17 dagen. Voor de uiteindelijk bereikte evenwichtstemperatuur maakt dat allemaal echter niets uit.

De gemiddelde aardtemperatuur komt uit op 256 K (– 17 °C). Dat komt goed overeen met de verwachting. Overigens moet hierbij worden opgemerkt dat een albedo van 0,3 in dit model zeker niet realistisch zal zijn. De reflectie van zonnestraling wordt voor een groot deel veroorzaakt door wolken – en die zijn er niet op een Aarde zonder atmosfeer. Een albedo van 0,1 – 0,2 lijkt realistischer voor een kale planetaire steenklomp.



Figuur 3 – Model van een Aarde zonder atmosfeer.

### Test

Een eerste test van dit model bestaat natuurlijk uit het antwoord op de vraag of het een evenwichtstemperatuur oplevert, en of die in de buurt van de verwachtingen ligt. Dat is beide het geval. Echter, de temperatuur van een Aarde zonder atmosfeer is niet in de literatuur te vinden. Het model is dan te testen door het los te laten op een andere planeet zonder atmosfeer in ons zonnestelsel: Mars.

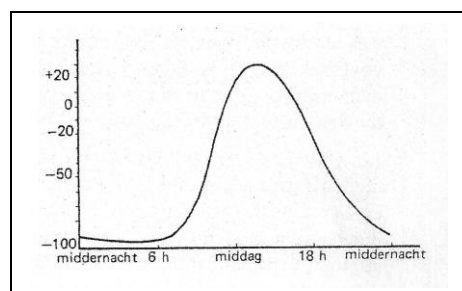
**Mars** – Volgens de tabel over het planetenstelsel in BINAS staat Mars op een afstand  $r$  van  $0,228 \cdot 10^{12}$  m van de Zon (of: 1,524 maal de afstand Aarde-Zon), heeft het planeetoppervlak een albedo  $\alpha$  van 0,15 en is de gemiddelde oppervlaktetemperatuur 300 K. In het model moeten nu de volgende twee grootheden worden aangepast aan de situatie op Mars: de zonneconstante  $S_z$  en het albedo  $\alpha$ . De zonneconstante  $S_z$  is omgekeerd kwadratisch evenredig is met de afstand  $r$  tussen Zon en planeet. Met  $S_{z,A} = 1,4 \cdot 10^3$  voor de Aarde en een 1,524 maal zo grote afstand  $r$  tot de Zon wordt de zonneconstante voor Mars:  $S_{z,M} = 1,4 \cdot 10^3 / 1,524^2 = 6,0 \cdot 10^2$  W/m<sup>2</sup>. Samen met een albedo  $\alpha$  van 0,15 levert het model dan een gemiddelde oppervlaktetemperatuur van 218 K. Dit is aanmerkelijk minder dan de in BINAS genoemde waarde. Deze waarde betreft echter de gemiddelde temperatuur overdag, en zal dus hoger liggen dan het daggemiddelde. Meer volledige gegevens over de temperatuur op Mars zijn te vinden in Bodifée *et al* (1977) op pg. 157: bij de gebruikte zonneconstante en albedo komt de gemiddelde planeettemperatuur volgens de theorie uit op 218 K (zie figuur 4) – en dat is in overeenstemming met de met het model gevonden waarde. Op pg. 193 in dezelfde bron is te zien dat een maximumtemperatuur van 300 K overdag een redelijke waarde is, maar dat 's nachts de temperatuur rond de 173 K ligt (zie

figuur 5). Volgens deze gegevens zal het daggemiddelde dan zo'n 220 à 230 K zijn. De conclusie kan dus zijn dat het model voldoet voor planeten zonder atmosfeer (en zonder inwendige warmtebron zoals de planeet Jupiter – maar dit terzijde).

**Bron** – Bodifée, G., T. Dethier & E. Wojciulewitsch (1977), *Algemene Sterrenkunde*. Groningen: Wolters-Noordhoff.

Planeet	$S_z$ (W/m <sup>2</sup> )	$\alpha$	$T$ (K)
Mercurius	9300	0,06	443
Venus	2680	0,61	260
Aarde	1390	0,34	252
Mars	600	0,15	218
Jupiter	52	0,41	108
Saturnus	15	0,42	79
Uranus	3,8	0,45	55
Neptunus	1,5	0,54	42

Figuur 4 – De planeettemperatuur  $T$  onder de aanname van een afwezigheid van een atmosfeer volgens Bodifée et al (1977; pg. 157).



Figuur 5 – De oppervlaktetemperatuur gedurende een Mars-etmaal voor een plaats op de evenaar volgens Bodifée et al (1977; pg. 193).

### Onderzoek

Een onderzoek naar de invloed van veranderende omstandigheden aan het aardoppervlak kan bij een model van de Aarde zonder atmosfeer alleen betrekking hebben op de zonneconstante en het albedo.

**Zonneconstante** – Welke invloed heeft een verandering van de zonneconstante (of: de zonneactiviteit) op de evenwichtstemperatuur? Een afname of toename van de zonneactiviteit zou moeten leiden tot een lagere resp. hogere evenwichtstemperatuur. Met een variatie  $0,03 \cdot 10^3$  W/m<sup>2</sup> (2%) zou de gemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak volgens het model variëren van 255 tot 257 K. Dus: een afname of toename van de zonneactiviteit met 2% leidt tot een temperatuurdaling resp. temperatuurstijging van ca. 1 K.

**Albedo** – Bij een gemiddelde temperatuur ruim onder 0 °C mag worden verwacht dat de Aarde voornamelijk bestaat uit rots en ijs. Dat zou een lagere waarde van het albedo betekenen, met als gevolg een hogere evenwichtstemperatuur. Een albedo van 0,3 levert een temperatuur van 256 K. Voor een albedo van (bijvoorbeeld) 0,2 levert het model een temperatuur van 265 K. Dus: inderdaad een hogere evenwichtstemperatuur. Deze onderzoeksresultaten vormen overigens ook een onderdeel van het testen van het model: levert het model inderdaad bij variaties in grootheden als zonneconstante en albedo een verandering van de evenwichtstemperatuur in de verwachte richting? Gezien het bovenstaande kan het antwoord op die vraag bevestigend zijn.

### Aandachtspunten

Voor de bespreking van dit tweede tussenproduct kan gedacht worden aan:

- Controleren van het model: ontwerp en resultaat ( $T = 256$  K).
- Begrijpen van de relaties in het model: wat zal er met de 'evenwichtstemperatuur' gebeuren als... de zonneconstante en/of het albedo groter of kleiner wordt – gekoppeld aan de resultaten van het onderzoek met het model.
- Het realiteitsgehalte van het model – gekoppeld aan de resultaten van het testen van het model door het los te laten op een echte planeet zonder atmosfeer (bijvoorbeeld Mars). Het spreekt natuurlijk voor zich dat het model voor een Aarde met atmosfeer niet reëel is – maar dat is dan ook de volgende stap in het modelleren van de stralingsbalans van de Aarde.
- Als voorbereiding op die volgende stap kan gevraagd worden naar de ideeën over de hoofdstructuur van dit nieuwe model. Dat zou – op grond van het oude model en het fysische dubbellaag-model uit paragraaf 3 van het leerlingmateriaal – een antwoord moeten opleveren als: twee gekoppelde basislijnen met energie-inhoud en energiestromen voor het aardoppervlak en de atmosfeer. Eventueel kan dan nog iets verder worden doorgevraagd: wat is er dan van het oude model van het aardoppervlak nog bruikbaar, en wat gaat er in dat model veranderen? En waar zitten die koppelingen tussen aardoppervlak en atmosfeer? Het antwoord op deze vragen volgt uit een vergelijking tussen figuur 4 en 6 uit paragraaf 3 van het leerlingmateriaal. Als leerlingen met het beantwoorden van dit

soort vragen problemen hebben, is deze paragraaf nog onvoldoende bestudeerd. En dan vormt dat een concrete vervolgpdracht.

## 4 Model Aarde met atmosfeer

Het derde tussenproduct betreft een model van een Aarde met atmosfeer. Daarbij gaan we uit van de energiestromen in figuur 6 van paragraaf 3 over fysische modellen van een Aarde zonder en met atmosfeer in het leerlingenmateriaal.

Door het toevoegen van een atmosfeer verandert het model van de Aarde uit figuur 3 in eerste instantie niet. Dat is te zien aan een vergelijking van de energiestromen in het fysisch model van een Aarde zonder en met atmosfeer in figuur 4 en 6 van het leerlingenmateriaal. Er komt in het model nu alleen een tweede ‘voorwerp’ bij: de atmosfeer. In het model betekent dat een tweede ‘lijn’ voor de atmosfeer met een energie-inhoud, een energie-instroom en -uitstroom, en een resulterende temperatuur. De twee delen van het model (Aarde en atmosfeer) zijn volgens het fysische model alleen gekoppeld via de energie-uitstraling van de Aarde naar de atmosfeer en de energie-uitstraling van de atmosfeer naar de Aarde.

### Stappen

- De energie-instroom van de atmosfeer is de energie-uitstraling van de Aarde:  $\sigma T^4$ . Dit is de eerste koppeling aan het model van de Aarde zonder atmosfeer:  $instraling\_atm = uitstraling$ . Echter, een deel van deze energie-instroom ter grootte van  $(1 - \varepsilon) \cdot \sigma T^4$ , wordt direct door de atmosfeer doorgelaten, afhankelijk van de absorptie-/emissiecoëfficiënt  $\varepsilon$ :  $transmissie\_atm = (1 - abs\_coef) \cdot instraling\_atm$ . met  $abs\_coef$  gedefinieerd als 0,78. De toename  $P\_in\_atm$  van de energie-inhoud van de atmosfeer wordt dan gegeven door het verschil van  $instraling\_atm$  en  $transmissie\_atm$ :  $P\_in\_atm = instraling\_atm - transmissie\_atm$ . Dit is dus vergelijkbaar met wat er in het model van de Aarde zonder atmosfeer gebeurt, alleen is hier nu sprake van transmissie in plaats van reflectie.

De grootte  $transmissie$  kan overigens – net als  $reflectie$  in het model van een Aarde zonder atmosfeer – ook worden opgevat als een uitstroom vanuit de atmosfeer.

- De energie-uitstroom van de atmosfeer bestaat alleen uit uitstraling (na absorptie) ter grootte  $\varepsilon \cdot \sigma T_A^4$ , met  $T_A$  de  $temperatuur\_atm$  – maar dat dan tweemaal: naar het heelal en terug naar de Aarde. Dus:  $uitstraling\_atm = 2 \cdot abs\_coef \cdot 5,67 \cdot 10^{(-8)} \cdot temperatuur\_atm^4$ . De afname  $P\_uit\_atm$  van de energie-inhoud van de atmosfeer wordt dan gegeven door de  $uitstraling\_atm$ :  $P\_uit\_atm = uitstraling\_atm$ . De helft van deze  $uitstraling\_atm$  vormt echter een nieuwe energie-instroom voor de Aarde. Dit is de tweede koppeling aan het model van de Aarde zonder atmosfeer. De toename  $P\_in$  van de energie-inhoud van de Aarde moet nu dus opnieuw worden gedefinieerd, namelijk als  $P\_in = instraling - reflectie + 0,5 \cdot uitstraling\_atm$ . Op deze manier wordt de door de atmosfeer naar de Aarde uitgestraalde energie volledig geabsorbeerd door het aardoppervlak en daarop dus niet voor een deel gereflecteerd. We gaan er dan van uit dat reflectie aan het aardoppervlak alleen optreedt voor het kortgolvlige (zon)licht en niet voor de langgolvlige warmtestraling. Dit lijkt een redelijke aanname.

Uit eerdere ervaringen blijkt dat het modelleren van de uitstraling van de atmosfeer lastig kan zijn. In dat geval wordt de uitstraling vanuit de atmosfeer naar het heelal ‘vergeten’ en loopt de temperatuur van de atmosfeer – en als gevolg daarvan de temperatuur van het aardoppervlak – te hoog op.

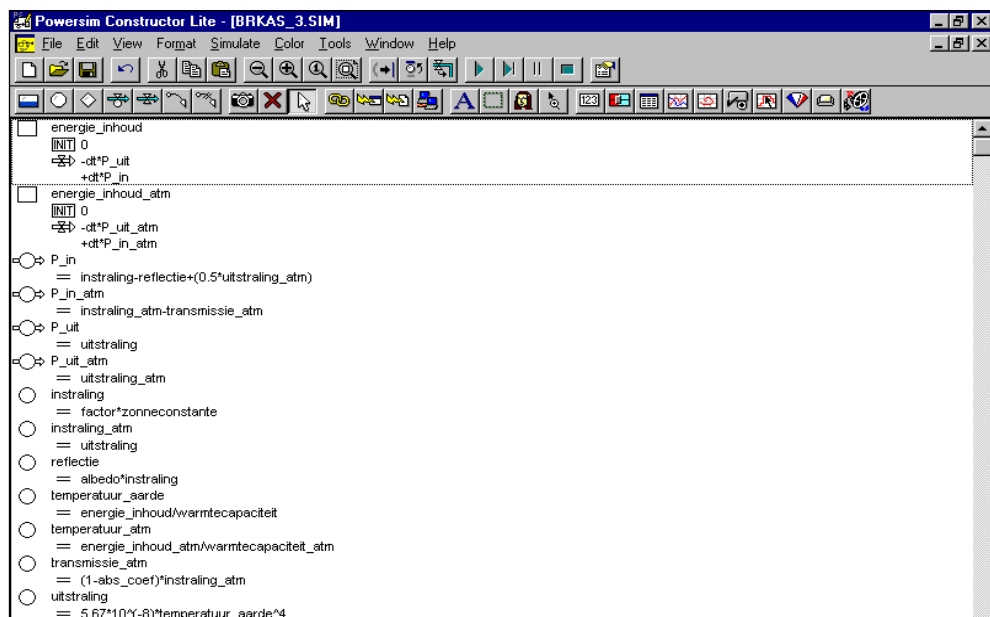
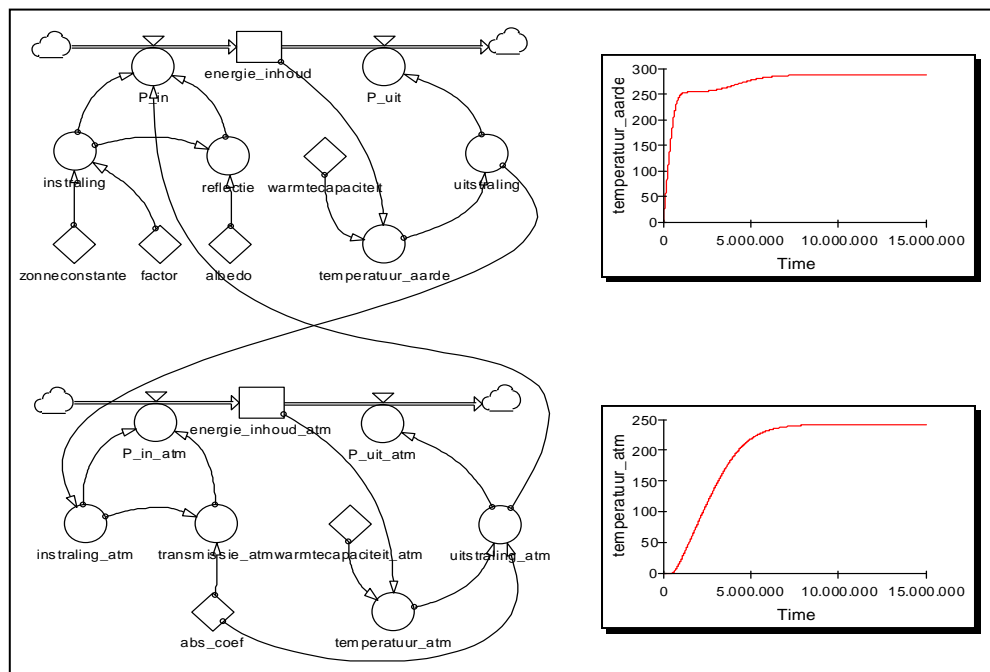
- De temperatuur  $T_A$  van de atmosfeer wordt – net als in het vorige model – bepaald door de energie-inhoud en de warmtecapaciteit  $C$ , maar nu van de atmosfeer:  $temperatuur\_atm = energie\_inhoud\_atm / warmtecapaciteit\_atm$ . Er moet dus nu een schatting worden gemaakt van de warmtecapaciteit van de atmosfeer. De meest eenvoudige benadering is een luchtkolom met een dwarsdoorsnede-oppervlak van  $1 \text{ m}^2$  (dus: boven de standaarddaardlaag) en een hoogte van bijvoorbeeld  $10 \text{ km}$ . Dus: een volume  $V$  van  $1,0 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ . Met de waarde van de dichtheid  $\rho$  ( $1,3 \text{ kg/m}^3$ ) en de soortelijke warmte  $c$  ( $1,0 \cdot 10^3 \text{ J/(kgK)}$ ) van lucht komt de warmtecapaciteit dan uit op  $C = \rho \cdot V \cdot c = 1,3 \cdot 10^7 \text{ J/K}$ . Daarmee houden we enerzijds geen rekening met de afname van dichtheid en soortelijke warmte met toenemende hoogte (waardoor de warmtecapaciteit lager zou uitkomen), maar anderzijds ook niet met het ‘uitwaaiëren’ van de luchtkolom die eigenlijk een deel van een kegel is (waardoor de warmtecapaciteit hoger zou uitkomen). In het model is voor  $warmtecapaciteit\_atm$  een – van het voorgaande afwijkende – waarde van  $3 \cdot 10^6 \text{ J/K}$  ingevoerd: een soort van arbitraire correctiefactor  $\frac{1}{4}$  die de exponentiële afname van de dichtheid met de hoogte in rekening zou kunnen brengen. Een fysisch correcte bepaling van zo’n correctiefactor is nogal lastig,

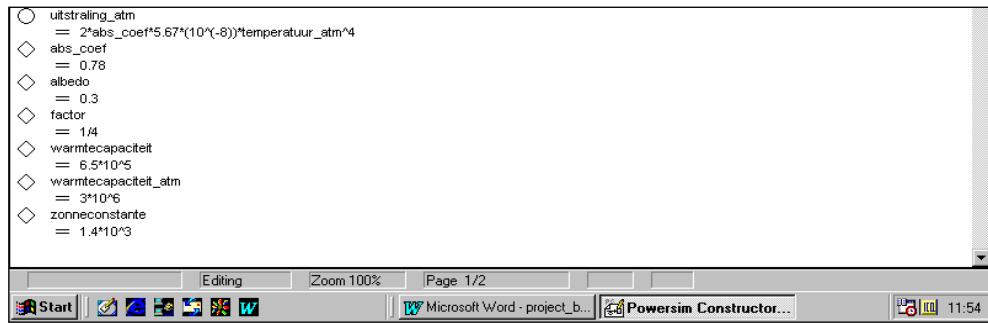
en gaat (voor leerlingen) veel te ver.

Overigens is de waarde van de warmtecapaciteit volstrekt irrelevant in dit model, althans voor zover het gaat om de uiteindelijke evenwichtstemperatuur. Enkele malen runnen van het model van een Aarde zonder atmosfeer met verschillende waarden van  $C$  laat zien dat de grootte van de warmtecapaciteit alleen invloed heeft op de snelheid waarmee de temperatuur vanaf 0 K naar zijn evenwichtswaarde stijgt, en niet op die evenwichtswaarde zelf. Datzelfde geldt dan ook voor de atmosfeer.

- Het runnen van dit model moet uitkomen op een aardtemperatuur  $T$  die duidelijk boven de waarde van 273 K (ofwel 0 °C) ligt. In BINAS staat voor de gemiddelde aardtemperatuur overdag een waarde van 295 K (+22 °C). In de eerder genoemde bron (Bodifée et al, 1977) vinden we een gemiddelde oppervlaktetemperatuur van 288 K (+15 °C). Uit BINAS is ook af te leiden dat de atmosfeertemperatuur  $T_A$  lager zal moeten zijn – in de onderste 10 km van de atmosfeer gemiddeld iets in de orde van 250 à 260 K (zo'n -20 °C).

De bovenstaande stappen leiden tot het in figuur 6 weergegeven model van een Aarde met atmosfeer.





Figuur 6 – Model van een Aarde met atmosfeer.

Voor het runnen van het model is weer een aanpassing van de tijdschaal en de tijdstap nodig. Beide zijn in het model van figuur 6 een factor 10 groter dan in het model van figuur 3. De aanwezigheid van een atmosfeer leidt kennelijk tot een langere ‘opwarmtijd’, wat niet onlogisch lijkt.

### Test

Het model levert een gemiddelde aardtemperatuur van 290 K (+ 17 °C). Dat komt goed overeen met de verwachting. Ook de gemiddelde atmosfeertemperatuur van 244 K (–29 °C) is volgens verwachting, zij het wat aan de lage kant.

Een andersoortige test van dit model is een run met een absorptie-/emissiecoëfficiënt  $\varepsilon = 0$ . Dat levert een simulatie van een Aarde zonder atmosfeer. Logisch, want dan is er in de atmosfeer geen absorptie van door de Aarde uitgezonden warmtestraling.

### Onderzoek

Met dit model is te onderzoeken hoe het systeem Aarde-atmosfeer reageert op veranderingen in zonneconstante, albedo en absorptie-/emissiecoëfficiënt. In figuur 7 staat een samenvatting van de resultaten van het onderzoek met het model.

$S_z$ (W/m <sup>2</sup> )	$\varepsilon$	$\alpha$	$T$ (K)	Situatie
$1,40 \cdot 10^3$	0,78	0,3	290,1	Standaard
$1,37 \cdot 10^3$	0,78	0,3	288,5	Zonneactiviteit lager
$1,43 \cdot 10^3$	0,78	0,3	291,6	Zonneactiviteit hoger
$1,40 \cdot 10^3$	0,80	0,3	291,3	Grotere concentratie broeikasgassen:
$1,40 \cdot 10^3$	0,80	0,25	296,4	• met minder sneeuw en ijs
$1,40 \cdot 10^3$	0,80	0,35	286,0	• met meer bewolking

Figuur 7 – Samenvatting van de resultaten van het onderzoek met het model van figuur 6: de oppervlaktetemperatuur  $T$  afhankelijk van variaties in zonneactiviteit  $S_z$ , absorptie-/emissiecoëfficiënt  $\varepsilon$  en albedo  $\alpha$ .

**Zonneconstante** – Het effect van de al eerder genoemde variatie van 2% in zonneactiviteit op de temperatuur aan het aardoppervlak kan ook met dit model worden bepaald. Dat blijkt nu een temperatuurvariatie van zo’n 1,5 K op te leveren. De aanwezigheid van een atmosfeer levert dus een versterking van de temperatuurvariatie als gevolg van een veranderende zonneactiviteit op.

**Absorptie-/emissiecoëfficiënt** – Een toename van broeikasgassen in de atmosfeer zal leiden tot een stijging van de absorptie-/emissiecoëfficiënt  $\varepsilon$ , en daardoor een naar verwachting hogere oppervlaktetemperatuur. Bij een toename van de absorptie-/emissiecoëfficiënt  $\varepsilon$  met ruim 2% (van 0,78 naar 0,80) levert het model een ruim 1 K hogere oppervlaktetemperatuur. Dat is dus in elk geval wat betreft de richting van het effect volgens verwachting. De gegevens om de verandering van  $\varepsilon$  te koppelen aan een verandering in concentratie broeikasgassen in de atmosfeer ontbreken helaas. Het is dus niet mogelijk om het realiteitsgehalte van de temperatuurstijging als gevolg van een versterkt broeikaseffect te beoordelen op grond van de literatuur – waarbij overigens ook moet worden bedacht dat de ‘officiële’ klimaatmodellen ook een grote variatie laten zien van mogelijke temperatuurstijgingen. Eén van de factoren die daarbij een rol spelen is een afname van het oppervlak aan sneeuw en ijs en een toename van de bewolking bij een



stijgende temperatuur. Dus: een verandering van het albedo van de Aarde.

**Albedo** – Minder sneeuw en ijs betekent een afname, meer bewolking betekent een toename van het albedo – met een nog hogere resp. lagere temperatuur als gevolg. Het is niet duidelijk welke albedoverandering zal overheersen. Een netto-daling van het albedo  $\alpha$  (van 0,3 naar 0,25) in het model levert bij  $\varepsilon = 0,80$  een extra temperatuurstijging van 5 K (bovenop de al eerder berekende 1 K). Een netto-stijging van het albedo (van 0,3 naar 0,35) in het model levert een temperatuurdaling van zo'n 5 K, en dus een netto-temperatuurdaling van 4 K.

De vraag in hoeverre deze effecten van een versterkt broeikaseffect realistisch zijn moet helaas onbeantwoord blijven. Wel wordt uit dit onderzoek duidelijk dat veranderende omstandigheden aan het aardoppervlak en in de atmosfeer tot tegengestelde effecten leiden.

### Aandachtspunten

Voor de bespreking van dit derde tussenproduct kan gedacht worden aan:

- Controleren van het model: ontwerp en resultaat ( $T = 290$  K en  $T_A = 244$  K).
- Interpreteren van de relatie tussen het verloop van de aardtemperatuur  $T$  en het verloop van de atmosfeertemperatuur  $T_A$  in de tijd: waarom blijft de atmosfeertemperatuur in het begin vrijwel constant (0 K), waarom blijft de aardtemperatuur 'even' later tijdens het opwarmen van de atmosfeer vrijwel constant (ruwweg 250 K)?
- Begrijpen van de relaties in het model: wat zal er met de 'evenwichtstemperatuur' gebeuren als... de zonneconstante en/of de absorptie-/emissiecoëfficiënt en/of het albedo groter of kleiner wordt – gekoppeld aan de resultaten van het onderzoek met het model rond het effect van veranderingen aan het aardoppervlak en in de atmosfeer.
- Het realiteitsgehalte van het model – gekoppeld aan de test- en onderzoeksresultaten. Gezien deze resultaten is het model heel redelijk te noemen. Maar uit figuur 7 in paragraaf 3 van het leerlingenmateriaal blijkt dat er nog wel wat verdere detailleringen mogelijk zijn, zoals het toevoegen van de absorptie van zonnestraling in de atmosfeer en het warmte-transport van het aardoppervlak naar de atmosfeer via verdamping. Als er op dit moment nog voldoende tijd over is kunnen de leerlingen het model op deze punten nog verder verbeteren. Dat is overigens niet eenvoudig, omdat daarbij het aantal onderscheiden energiestromen toeneemt en bovendien moet worden gezocht naar nieuwe definities van relaties op grond van de in de betreffende figuur gegeven grootte van de energiestromen. Een duidelijke beperking van het model is dat het niet verder gaat dan een gemiddelde van de temperatuur over de Aarde als geheel.

### Presentatie

Als deel van het derde tussenproduct wordt ook gevraagd om een opzet voor het verslag en/of de presentatie over dit project als geheel.

**Verslag** – Het verslag kan – om de daarin te investeren tijd te beperken – in principe bestaan uit niet meer dan een bundeling van de drie tussenproducten, waar nodig aangepast aan het resultaat van de voortgangsbesprekingen en aangevuld met een antwoord op de vraag wat het nut van het ontwerpen van dit soort computermodellen is. En dat laatste is dan iets als: klimaatonderzoek, voorspellen van klimaatveranderingen door verdere versterking van het broeikaseffect, doorrekenen van toekomstscenario's.

**Presentatie** – In de presentatie zullen dezelfde elementen als in het verslag voorkomen, maar vooral van belang daarbij is de mate van diepgang. Een overweging daarbij is dat het publiek – de medeleerlingen – zeker niet geïnteresseerd zal zijn in allerlei details van het model. Bij het beoordelen van de opzet van de presentatie zou daarom gelet kunnen worden op de volgende punten:

- Indicatie van de vraagstelling.
- Uitleg van het ontwerp van de beide modellen van de Aarde (zonder en met atmosfeer) op hoofdlijnen.

Uit eerdere ervaringen blijkt overigens dat 'op hoofdlijnen' voor leerlingen lastig te zijn. Bij het eerste model is dat niet meer dan iets als een constante energie-instroom van de Zon op de Aarde veroorzaakt een toename van de energie-inhoud en daarmee een temperatuurstijging van de Aarde, wat op zijn beurt weer leidt tot een temperatuurafhankelijke energie-uitstroom door afgifte van warmtestraling door de Aarde naar het heelal met uiteindelijk een evenwichtstemperatuur als gevolg. De hoofdlijnen van het tweede model zijn daarna nog sneller te schetsen: twee lijnen met energie-instroom, energie-inhoud en energie-



uitstroom – een voor het aardoppervlak en een voor de atmosfeer – die aan elkaar gekoppeld zijn doordat de atmosfeer een deel van de energie-uitstroom van de Aarde absorbeert, daardoor in temperatuur stijgt en daarmee voor een energie-instroom van de atmosfeer op de Aarde zorgt met uiteindelijk een hogere evenwichtstemperatuur als gevolg. Dus: kwalitatieve relaties, en geen details over formules en constanten waarmee de verschillende energiestromen te berekenen zijn.

- Overzicht van de testresultaten en een indicatie van het realiteitsgehalte van de beide modellen, eventueel met een indicatie van de richting waarin het laatste model nog verder ontwikkeld zou kunnen worden.
- Overzicht van de onderzoeksresultaten met de beide modellen (of alleen het laatste model), gekoppeld aan voorstelbare veranderingen in de samenstelling van het aardoppervlak en de atmosfeer.
- Indicatie van het nut van het ontwerpen van dit soort computermodellen.

Een onderdeel van de presentatie is het met de beamer of op het digibord tonen van de ontworpen modellen en het demonstreren van het resultaat dat het runnen van die modellen oplevert.

## 5 Planning

Hieronder een suggestie voor een ruwe planning van dit deelproject met een drietal aftekenmomenten (of go/no go beslissingen, uitgaande van een voor het deelproject beschikbare periode van 9 weken.

Week	Activiteit	Aftekenmoment
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lezen projectbeschrijving (paragraaf 1 van het leerlingenmateriaal).</li> <li>• Zoeken en samenvatten informatie over stralingsbalans van de Aarde en het broeikaseffect.</li> <li>• Lezen achtergrondinformatie over fysische modellen van een Aarde zonder en met atmosfeer (paragraaf 3 van het leerlingenmateriaal).</li> </ul>	
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vragen opstellen over projectbeschrijving en achtergrondinformatie, en overleg met projectbegeleider – als dat nodig is.</li> <li>• Lezen achtergrondinformatie over modelleren van warmte en temperatuur (paragraaf 4 van het leerlingenmateriaal).</li> <li>• Werken aan tussenproduct 1: basismodel voor warmte en temperatuur, opstellen vraagstelling en werkplan.</li> </ul>	
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voortgangsbespreking met projectbegeleider over tussenproduct 1.</li> <li>• Werken aan tussenproduct 2: model van Aarde zonder atmosfeer ontwerpen en bouwen.</li> </ul>	Go / no go
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Werken aan tussenproduct 2: ontworpen model testen en onderzoeken.</li> </ul>	
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voortgangsbespreking met projectbegeleider over tussenproduct 2.</li> <li>• Werken aan tussenproduct 3: model van Aarde met atmosfeer ontwerpen en bouwen.</li> </ul>	Go / no go
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Werken aan tussenproduct 3: ontworpen model testen en onderzoeken.</li> </ul>	
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Werken aan tussenproduct 3: opzet verslag/presentatie maken.</li> <li>• Voortgangsbespreking met projectbegeleider over tussenproduct 3.</li> </ul>	Go / no go
8	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Werken aan verdere verbetering van het model van Aarde met atmosfeer – als de tijd dat toelaat.</li> <li>• Werken aan verslag/presentatie.</li> </ul>	
9	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presentatie houden</li> <li>• Verslag inleveren</li> </ul>	