

In *NVOX* van september 2002 schreven wij onder de titel ‘Leren door zelf modelleren’ over het gebruik van computermodellen in de klas. In dat artikel stond een korte beschrijving van een drietal modules voor leren modelleren bij achtereenvolgens natuurkunde, scheikunde en biologie en van het afsluitende leerlingproject rond het centrale thema ‘Systeem Aarde’. In dit artikel beschrijven we de opzet van en de ervaringen met één van de deelprojecten in dit leerlingproject: *Broeikas Aarde – een leefbare temperatuur*.

Een praktische opdracht voor computerondersteund modelleren Broeikas Aarde

Koos Kortland¹, Elwin Savelsbergh¹, Kees Hooyman² & Robert Wielinga³

¹ Cdβ, Universiteit Utrecht

² St. Bonifatiuscollege, Utrecht

³ St. Gregorius College, Utrecht

Inleiding

Als leerlingen de basisbeginselen van computerondersteund modelleren eenmaal onder de knie hebben, kunnen ze deze techniek gebruiken om zich verder in de vakinhoud te verdiepen. Eén van de mogelijkheden is het maken van modellen in samenhang met het bestuderen van theorie. De leerling kan dan in het model tot uitdrukking brengen wat hij of zij geleerd heeft, en omgekeerd zal het voor het maken van het model nodig zijn om verder de theorie in te duiken. Deze insteek hebben we genomen bij het leerlingproject ‘Systeem Aarde’.

Binnen dit overkoepelende thema zijn vijf deelprojecten ontwikkeld. Twee van deze projecten zijn vooral fysisch van aard, één heeft een biologische insteek, één is vooral chemisch en een laatste project hangt in tussen biologie en natuurkunde. De deelprojecten zijn ook los van elkaar te gebruiken, bijvoorbeeld als een praktische opdracht.

In dit artikel bespreken we één van de fysische deelprojecten: *Broeikas Aarde – een leefbare temperatuur*. In dit deelproject gaat het om het maken van computermodellen van de temperatuur op een Aarde zonder en met atmosfeer. Het eerste model maakt het belang van het broeikaseffect in de atmosfeer voor een leefbare temperatuur op onze planeet zichtbaar. Met het tweede model is te onderzoeken in hoeverre de gemiddelde temperatuur op Aarde verandert als gevolg van veranderende omstandigheden aan het aardoppervlak en in de atmosfeer. Het onderliggende fysische proces is de warmtetoevoer aan en warmteafgifte van een voorwerp en de gevolgen daarvan voor de temperatuur van het voorwerp – in dit geval de Aarde.



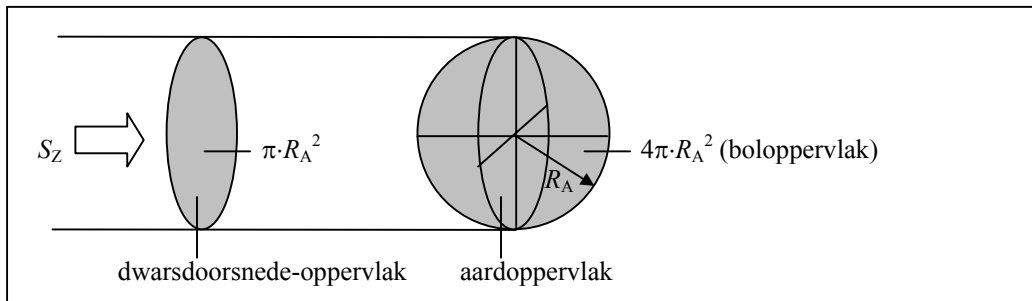
Figuur 1 – Bij een Aarde met atmosfeer zorgt de Zon voor een leefbare temperatuur.

Fysische modellen

In het deelproject ontwerpen, bouwen en testen de leerlingen computermodellen op basis van

een leerlingtekst waarin een tweetal eenvoudige fysische modellen van een Aarde zonder en met atmosfeer wordt beschreven. In beide fysische modellen wordt de energietoevoer aan de Aarde bepaald door de zonneconstante S_Z met een waarde van $1,40 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$.

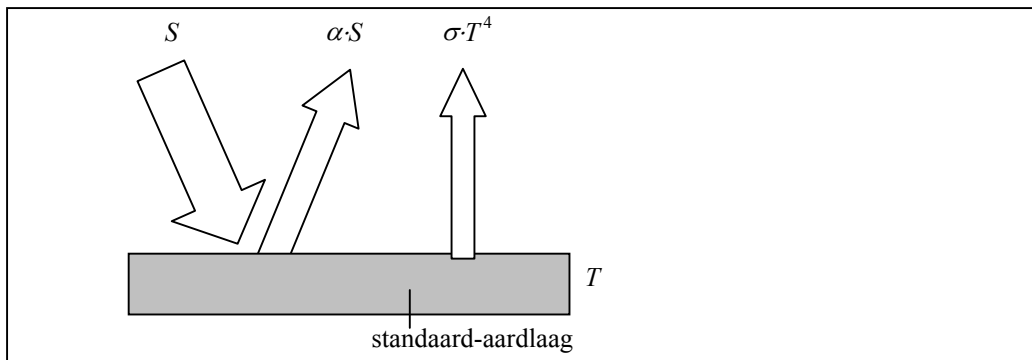
In figuur 2 is te zien dat het op de Aarde invallende stralingsvermogen P_{in} wordt gegeven door het product van de zonneconstante en het cirkelvormige dwarsdoorsnede-oppervlak van de Aarde. Dit stralingsvermogen ‘verspreidt’ zich echter – gemiddeld genomen – over het volledige, bolvormige aardoppervlak. De ‘gemiddelde zonneconstante’ S is dan het quotiënt van het invallende stralingsvermogen en het volledige aardoppervlak. Voor dit invallende stralingsvermogen S op een ‘gemiddeld aardoppervlak’ van 1 m^2 blijkt dan te gelden: $S = \frac{1}{4} \cdot S_Z$. Het geabsorbeerde stralingsvermogen zorgt voor een temperatuurstijging, waardoor het aardoppervlak infraroodstraling gaat uitzenden. Het naar het heelal uitgestraalde vermogen P_{uit} per m^2 wordt gegeven door de stralingswet van Stefan-Boltzmann: $P_{\text{uit}} = \sigma T^4$. Hierin is T de temperatuur van het aardoppervlak.



Figuur 2 – Het op Aarde invallende stralingsvermogen van de Zon wordt bepaald door het cirkelvormige dwarsdoorsnede-oppervlak van de Aarde, terwijl dit stralingsvermogen zich gemiddeld genomen verspreidt over het bolvormige aardoppervlak.

Aarde zonder atmosfeer. Het fysisch model van een Aarde zonder atmosfeer is weergegeven in figuur 3. We gaan daarbij uit van een standaard-aardlaag van 1 m^2 met een diepte van $0,2 \text{ m}$ en een samenstelling van $\frac{2}{3}$ water en $\frac{1}{3}$ land. Op deze standaard-aardlaag valt een stralingsvermogen S in, waarvan een deel direct wordt teruggekaatst door het aardoppervlak. Dit is het gereflecteerde stralingsvermogen $\alpha \cdot S$. De grootte α is de reflectiecoëfficiënt van het aardoppervlak: het *albedo*.

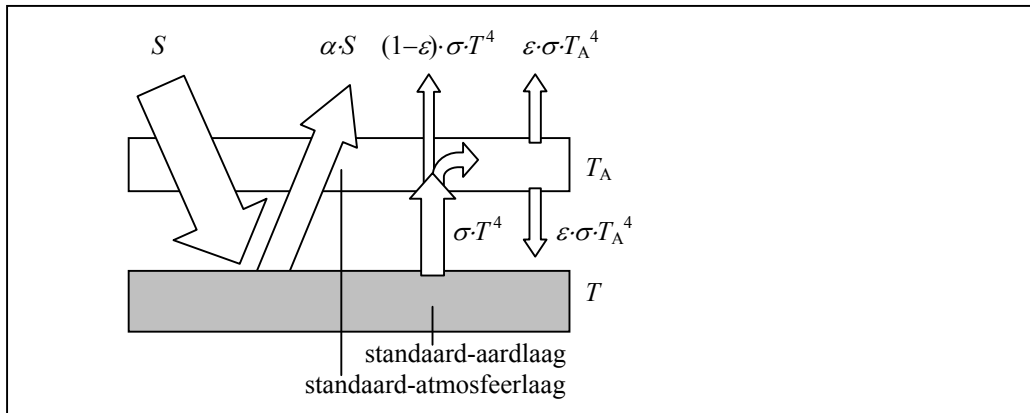
Naast het gereflecteerde stralingsvermogen is er ook sprake van een uitgestraald vermogen σT^4 volgens de stralingswet van Stefan-Boltzmann. Dit vermogen wordt uitgestraald in de vorm van infraroodstraling (of: warmtestraling).



Figuur 3 – Fysisch model van een Aarde zonder atmosfeer.

Aarde met atmosfeer. Het fysisch model van een Aarde met atmosfeer is weergegeven in figuur 4. Hierin wordt de atmosfeer voorgesteld door een tweede laag boven de standaard-aardlaag. Deze standaard-atmosfeerlaag laat zowel het invallende stralingsvermogen S als het direct door het aardoppervlak gereflecteerde stralingsvermogen $\alpha \cdot S$ ongehinderd door. Met andere woorden: we nemen aan dat de atmosfeerlaag de kortgolvlige zonnestraling niet absorbeert.

Dat geldt echter niet voor de door de Aarde uitgezonden langgolvlige infraroodstraling. Het uitgezonden stralingsvermogen σT^4 wordt voor een deel door de atmosfeerlaag geabsorbeerd. De mate van absorptie wordt bepaald door de absorptiecoëfficiënt ε van de atmosfeer. Het door de atmosfeer geabsorbeerde stralingsvermogen is dan $\varepsilon \sigma T^4$, zodat het door de atmosfeer doorgelaten stralingsvermogen gelijk is aan $(1-\varepsilon) \cdot \sigma T^4$. Het door de atmosfeer geabsorbeerde stralingsvermogen zorgt voor een temperatuurstijging van de atmosfeer, zodat ook deze infraroodstraling gaat uitzenden. Maar dit gebeurt in twee richtingen: naar het heelal, en terug naar de Aarde. In beide gevallen is dit door de atmosfeer uitgezonden stralingsvermogen $\varepsilon \sigma T_A^4$, met ε de emissiecoëfficiënt (in grootte gelijk aan de absorptiecoëfficiënt) en T_A de temperatuur van de atmosfeer.

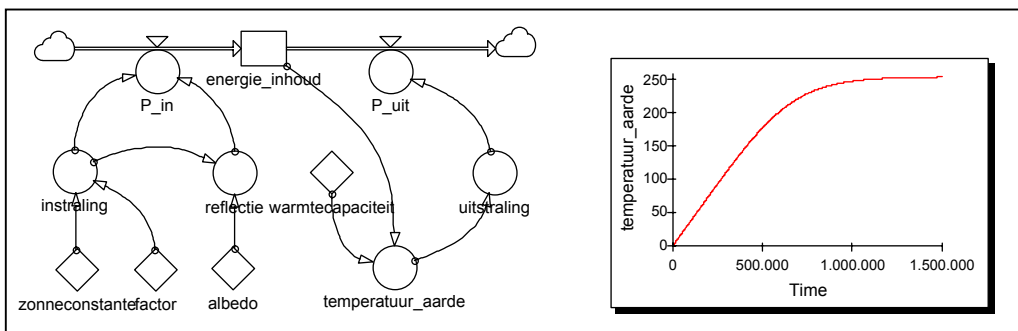


Figuur 4 – Fysisch model van de Aarde met atmosfeer.

Computermodellen

De gegeven fysische modellen van een Aarde zonder en met atmosfeer worden door de leerlingen verwerkt tot computermodellen.

Aarde zonder atmosfeer. Het computermodel van een Aarde zonder atmosfeer is weergegeven in figuur 5. In dit model wordt de energie-inhoud E_{inh} van de standaard-aardlaag bepaald door het in- en uitgestraalde vermogen P_{in} en P_{uit} . De absolute temperatuur T van het aardoppervlak wordt berekend met $T = E_{inh}/C$. Hierin is C de warmtecapaciteit van de standaard-aardlaag. In figuur 5 is ook het resultaat van het rekenwerk zichtbaar: een evenwichtstemperatuur van 256 K (-17°C) bij een gemiddelde albedo α van 0,3. Dat is in overeenstemming met de verwachting dat de temperatuur op een Aarde zonder broeikaseffect aanzienlijk lager is dan de gemiddelde temperatuur op de huidige Aarde. Het model is verder te testen door het los te laten op een andere planeet zonder atmosfeer in ons zonnestelsel: Mars. Na correctie voor een grotere afstand tot de Zon en het albedo van het marsoppervlak levert het model een gemiddelde oppervlaktetemperatuur van 218 K. Dat klopt redelijk met het daggemiddelde van 220 à 230 K uit de literatuur.



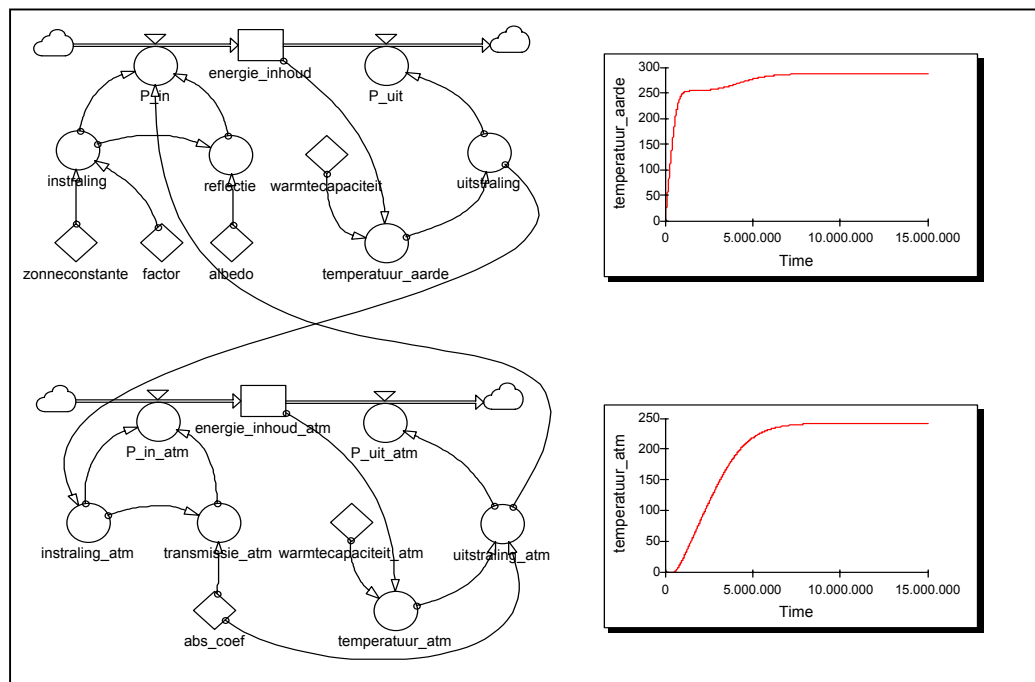
Figuur 5 – Computermodel van een Aarde zonder atmosfeer.

Met het model is nu na te gaan welke invloed veranderingen in de zonneconstante en het albedo hebben op de gemiddelde temperatuur bij het aardoppervlak.

Aarde met atmosfeer. Het computermodel van een Aarde met atmosfeer is weergegeven in figuur 6. In vergelijking met het model van figuur 5 is nu een tweede 'lijn' voor de atmosfeer met een energie-inhoud en een in- en uitgaand vermogen toegevoegd. 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.

In figuur 6 is ook weer het resultaat van het rekenwerk zichtbaar: een evenwichtstemperatuur van 290 K (+17 °C) bij een albedo α van 0,3 en een absorptie-/emissiecoëfficiënt ε van 0,78. Dat komt goed overeen met de verwachting.

Na deze fase van ontwerpen, bouwen en testen kunnen de leerlingen hun model gebruiken om te onderzoeken hoe het systeem Aarde-atmosfeer reageert op veranderingen in zonneconstante, albedo en absorptie-/emissiecoëfficiënt. Een toename van broeikasgassen in de atmosfeer zal leiden tot een stijging van de absorptie-/emissiecoëfficiënt. Volgens het model leidt een toename van 2% tot een ruim 1 K hogere oppervlaktetemperatuur. Maar bij een hogere temperatuur zal het oppervlak aan sneeuw en ijs afnemen en de bewolking toenemen. Het eerste leidt tot een lagere en het tweede tot een hogere albedo. Het is niet duidelijk welke albedoverandering zal overheersen. Leerlingen kunnen verschillende waarden voor het albedo uitproberen. Een albedovariatie van 0,05 (rond de huidige waarde 0,3) levert volgens het model een temperatuurdaling resp. -stijging van zo'n 5 K. De geschetste effecten van verandering in de absorptie-/emissiecoëfficiënt en het albedo illustreren de onzekerheden in de huidige 'officiële' klimaatmodellen.



Figuur 6 – Computermodel van een Aarde met atmosfeer.

Ervaringen

Het deelproject is in eerste versie uitgetoetst met drie groepen leerlingen 5-VWO. Hieronder gaat we kort in op de ervaringen met het ontwerpen en testen van de modellen en het uitvoeren van een onderzoek.

Ontwerpen. Het ontwerpen en bouwen van een computermodel van een Aarde zonder

atmosfeer aan de hand van het gegeven fysische model bleek voor elk van de drie groepen relatief eenvoudig. Twee van de drie groepen nemen als 'basislijn' in het model de voorraadgrootte temperatuur, met een temperatuurstijging resp. temperatuuurdaling als in- en uitvoergrootheden. Deze in- en uitvoergrootheden kunnen worden gekarakteriseerd als het quotiënt van vermogen en warmtecapaciteit. Op zich is deze benadering werkbaar, maar blijkt voor een natuurkundige in eerste instantie wat lastig te 'lezen'.

Voor een Aarde met atmosfeer was het ontwerpen een stuk lastiger. Bij elk van de drie groepen bestaat het model (zoals verwacht) uit twee gekoppelde basislijnen: een voor het aardoppervlak en een voor de atmosfeer. Volgens een van de groepen was hierbij vooral lastig het maken van een onderscheid tussen 'wat bij het aardoppervlak hoort en wat bij de atmosfeer'. In de uiteindelijk geproduceerde computermodellen gaat het in meer of mindere mate mis bij het modelleren van de energie-uitstraling door de atmosfeer: alles gaat terug naar de Aarde, of de helft gaat terug naar de Aarde maar dan wordt de uitstraling van de andere helft naar het heelal vergeten. Met andere woorden: het lijkt er wel op, maar helemaal goed is het niet... Hierbij was duidelijk hulp nodig van de begeleidende docent.

Testen. Bij twee van de drie groepen ontbreekt een reflectie op het eerste computermodel, al zegt een van die groepen wel dat de gevonden evenwichtstemperatuur 'heel laag [is], omdat de aarde geen atmosfeer heeft om de warmte vast te houden' – maar dat is wel heel voor-de-hand-iggend. De derde groep zegt daar iets meer over: 'Voor de aarde is deze temperatuur natuurlijk onrealistisch, omdat de aarde een atmosfeer heeft, en waar een groot deel van de warmte blijft hangen (zie model 2). Voor andere planeten is deze temperatuur een stuk realistischer, omdat die geen atmosfeer hebben. Dus voor die planeten, klopt het model een stuk beter.' Daarbij doelen ze – gezien eerdere formuleringen – nadrukkelijk op andere planeten zonder atmosfeer in ons zonnestelsel. Of het model voor die planeten inderdaad een stuk beter klopt is echter door deze groep niet gecontroleerd.

Ook een reflectie op het tweede model ontbreekt, afgezien van de opmerking dat het tweede model 'realistischer is', maar toch ook 'weer niet helemaal correct, omdat de gemiddelde temperatuur op aarde lager ligt dan onze gevonden temperatuur.'

Onderzoek. Het model van een Aarde met atmosfeer leent zich goed voor een onderzoek naar het effect van veranderende omstandigheden aan het aardoppervlak en in de atmosfeer op de 'evenwichtstemperatuur'. Een dergelijk onderzoek is echter door geen van de groepen echt uitgevoerd.

Conclusie

De leerlingen zijn – na het doorwerken van de in een eerder artikel in NVOX beschreven natuurkundemodule voor computerondersteund modelleren van kracht en beweging – redelijk, en met enige hulp goed in staat om op basis van de gegeven fysische modellen van een Aarde zonder en met atmosfeer computermodellen te ontwerpen. Na het ontwerpen en bouwen van die modellen zijn ze echter nogal snel tevreden met hun product: er is sprake van een niet meer dan nogal oppervlakkige test van de modellen. En van het uitvoeren van een onderzoek met deze modellen – toch één van de redenen om ze te ontwerpen – is nauwelijks sprake. Ook bij de andere deelprojecten blijkt het onderdeel 'onderzoek' het minst uit de verf te komen. Misschien is de rol van zo'n computermodel als uitdrukking van bestaande kennis en als 'werkhypothese' voor vervolgonderzoek voor de leerlingen nog moeilijk te begrijpen.

Toch is het lesmateriaal voor dit deelproject in tweede versie nauwelijks veranderd. De aanpassing is beperkt gebleven tot een extra startonderdeel over het modelleren van dynamische processen op het gebied van warmte en temperatuur – een onderdeel dat leerlingen op het spoor zet van een 'basislijn' van energie-inhoud met een in- en uitstroom van energie. Wel is er in de tweede versie sprake van een duidelijker planning met een drietal tussenproducten als basis voor een voortgangsbespreking met de begeleidende docent. In zo'n bespreking komt dan steeds het begrijpen van het ontworpen model, het testen van en het onderzoeken met het model aan de orde. Elke bespreking wordt afgesloten met een vraag naar de volgende stappen die de leerlingen bij de uitvoering van het deelproject nu denken te gaan zetten, gevolgd door een 'go' of 'no-go' beslissing van de docent. Een duidelijk aandachtspunt is de begeleiding door de docent tussen deze voortgangsbesprekingen door. Verschillende groepen leerlingen werken

zelfstandig in de les, maar ook in tussenuren en thuis aan het door hen gekozen deelproject. Dat maakt het voor de docent lastig om te zien waarmee ze bezig zijn, en om hen goed te kunnen helpen als ze ergens vastgelopen zijn. De leerlingen zijn dan vaak al een heel eind op weg in een bepaalde richting, en je moet als docent eerst heel goed kijken wat ze nu eigenlijk gedaan hebben. Dat vraagt tijd en inspanning, terwijl de leerlingen graag snel verder willen. Maar aan de andere kant is dit voor de docent ook wel weer een leuke uitdaging.

Met deze tweede versie van het deelproject *Broeikas Aarde – een leefbare temperatuur* zal naar verwachting goed te werken zijn. De leerlingen waren bij de eerste versie over het algemeen goed zelfstandig en gemotiveerd bezig, en konden ter afsluiting hun werk voldoende duidelijk aan de rest van de klas presenteren – de ene groep wat meer, de andere wat minder. Met de duidelijker structuur van de tweede versie van het materiaal kan ook de inhoudelijke kant van het deelproject meer aandacht krijgen: het gebruik van bekende begrippen als energie, vermogen, warmte en temperatuur voor het ontwerpen en onderzoeken van eenvoudige klimaatmodellen. En dit materiaal is nu voor iedereen beschikbaar...

Projectinformatie

Het lesmateriaal van het Project Computerondersteund Modelleren is te vinden op de website van het Centrum voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen:

<http://www.cdbeta.uu.nl/model>

In het kader van dit artikel gaat het daarbij om het deelproject *Broeikas Aarde – een leefbare temperatuur* en de bijbehorende *docentenhandleiding*. Zowel de genoemde documenten als de benodigde software (Powersim) zijn vanaf deze website binnen te halen voor eigen gebruik in het onderwijs. Voor toegang tot het docentendeel van deze website (en dus de docentenhandleiding) is een wachtwoord nodig.

Voor aanvragen van het wachtwoord, en voor vragen over, commentaren op en ervaringen met dit materiaal: j.kortland@phys.uu.nl