

Naar een gevalideerd modelbegrip

W. de Vos en T. van der Valk

CD- β

Universiteit Utrecht

Summary

Secondary school students are expected to understand what models are and how they are used in scientific research. Textbooks, however, tend to present various specific models without offering an explicit description, in general terms, of models and their use in science. Besides, models are not normally situated in a research context in textbooks. This raises the question of how models are actually used by scientists in their research activities.

This article reports the results of a study into the use of models by 26 scientific researchers, working in a wide variety of natural sciences. The researchers answered a questionnaire based on a description in seven statements of models and their use (Van Driel, 1999). The responses show that, in general, a large majority of the 26 scientists recognize and accept these statements. In some cases, further analysis seems necessary. The study contributes to making available for science education a validated description, in general terms, of (the use of) models in the natural sciences.

1. Inleiding

Een leerling die het voortgezet onderwijs doorloopt komt nogal wat modellen tegen: kringloopmodellen bij zowel aardrijkskunde als biologie en economie, deeltjesmodellen van de materie bij natuurkunde en bij scheikunde, schaalmodellen in allerlei soorten (van zon, aarde en maan als het om een zonsverduistering gaat, van de bouw van de cel, van een tuibrug, van een longblaasje, enzovoort), en modellen van processen als elektrische stroomgeleiding, diffusie en osmose, adsorptie, oxidatie, maar ook van bevolkingsgroei en van een tornado. En dan zijn er computermodellen en rekenmodellen.

Het is begrijpelijk dat er in ons land regelmatig artikelen over het onderwijzen van modellen verschijnen (Dieks, 1999; Doorman en Gravemeijer, 1999; Van Driel, 1997, 1999; Drijver, 1998; Gravemeijer 1999; Jordens, 1998; Kramers-Pals, 1999; Van Oers, 1999; Pieters, 1997; Vollebregt e.a., 1999). In ons artikel komt de vraag aan de orde welke algemene beschrijving, expliciet dan wel impliciet, van modellen en van het werken ermee in het onderwijs gangbaar is en of die beschrijving voldoende overeenkomt met de natuurwetenschappelijke realiteit. Daarbij beperken we ons tot (het onderwijzen van) het gebruik van modellen in een context van natuurwetenschappelijk onderzoek.

Het modelbegrip verbindt de betavakken met elkaar. In het project BPS (Bèta Profielen in het Studiehuis, zie Hummelen e.a., 2000) van de Universiteit Utrecht werken de natuurwetenschappelijke en de wiskundesecties van een aantal scholen aan een betere coördinatie van hun onderwijs in de bètavakken in de Tweede Fase. Het werken met modellen in de betavakken is één

van de thema's waaraan in dat project aandacht wordt besteed. Daarom hebben wij ons verdiept in het modelbegrip, met name in het gebruik van modellen bij natuurwetenschappelijk onderzoek. Immers, in de betaprofielen, zeker in het vwo, moeten modellen gezien worden in relatie tot natuurwetenschappelijk onderzoek en juist het onderzoek, het leren onderzoeken, staat immers in die betaprofielen, naast het leren ontwerpen, volop in de belangstelling. Het poldermodel en de modelwoning, en ook het geldkringloopmodel uit de economie laten we daarom in dit artikel buiten beschouwing. Dat geldt ook voor het gebruik van modellen bij het ontwerpen, bijvoorbeeld in de technologie.

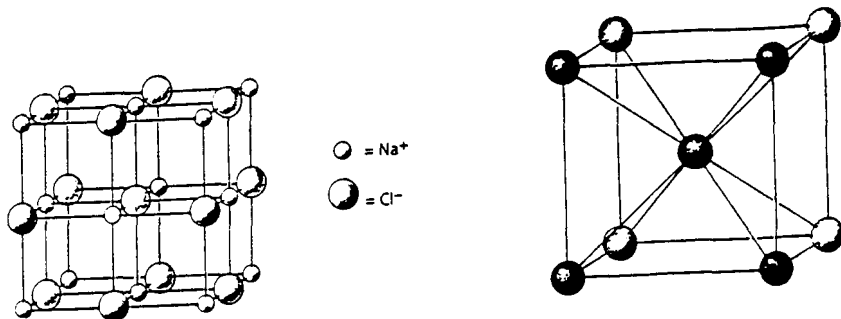
Het is de bedoeling dat opbrengsten van het BPS-project beschikbaar komen voor anderen en in dit artikel melden we dus de resultaten van ons speurwerk tot nu toe.

2. Modellen in de klas

Wat zit ertussen de moleculen in een kristal? Een tweedejaars scheikunde-studente die deze vraag kreeg voorgelegd, antwoordde: "Nou, lucht natuurlijk." Direct daarna corrigeerde ze zich: "O, nee, natuurlijk niet." Met haar eerste antwoord gaf ze een voorbeeld van de verwarring die het werken met modellen met zich mee kan brengen. In het staafjes-en-bolletjesmodel dat op tafel stond, zat er immers wel degelijk lucht tussen de 'moleculen'. Het is de vraag of een leerling in het voortgezet onderwijs zich ook zo snel kan corrigeren. Werken met modellen moet je leren.

In de schoolboeken die de BPS-scholen voor de betavakken gebruiken, vinden we verschillende modellen, maar de algemene vraag wat een model is, waarvoor het dient en hoe je ermee werkt, krijgt in deze boeken nauwelijks aandacht. Blijkbaar wordt verwacht dat de leerlingen dat wel ongeveer weten. Wij hebben de indruk gekregen dat de meeste leerlingen het niet weten. In dit verband is het van belang dat de modellen die in de schoolboeken voorkomen vaak niet werkelijk als model functioneren. De onderzoeksaanpak waarin modellen de rol van hulpmiddel spelen, komt niet uit de verf. De leerlingen krijgen dus ook niet de gelegenheid om 'al doende' vertrouwd te raken met het gebruik van modellen zoals onderzoekers dat doen.

Het leren werken met een model in een onderzoek is voor leerlingen niet eenvoudig. Leerlingen die het proberen, moeten beseffen wat het model is en waarvan het een model is. En bovendien moeten ze zich realiseren dat niet de feitelijke correctheid maar de bruikbaarheid van het model voor een bepaald doel de waarde ervan bepaalt. Van die leerlingen wordt dus gevraagd dat ze een model als hulpmiddel accepteren en tegelijk beseffen dat dat hulpmiddel op belangrijke punten onzeker, of zelfs 'onjuist' kan zijn. Zo zijn de kleuren van de plastic bolletjes in een kristalmodel heel handig om de verschillende atoomsoorten van elkaar te onderscheiden, maar de kleuren geven niet een werkelijke eigenschap van de atomen weer en die atomen zijn ook niet van plastic. Onduidelijkheid over de vraag in welke opzichten het model nu wel wordt geacht overeen te komen met een atoom en in welke opzichten niet, kan een verwarring met zich meebrengen die leerlingen stoort bij het leren werken met een model.

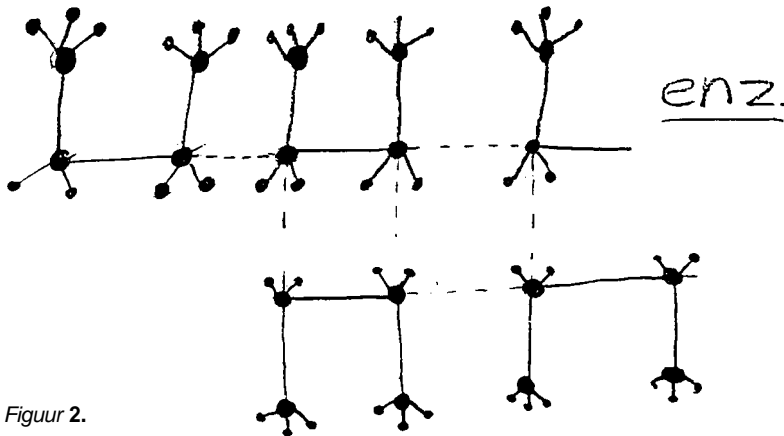


Figuur 1

In het BPS-project hebben we groepjes **4vwo-leerlingen** tijdens de **scheikundelessen** zelf modellen laten tekenen. Ze ervaren dan dat ze een keuze maken, en dat klasgenoten met een heel andere tekening kunnen komen zonder dat er meteen een **goed/fout-indeling** wordt gehanteerd. De manier waarop je bijvoorbeeld de structuur van ijzer of van keuzenzout tekent kan afhangen van wat je wilt laten zien: wil je de regelmatige ruimtelijke rangschikking van de atomen duidelijk maken, dan kun je ze beter wat klein tekenen in relatie tot de kern-kernafstand in het rooster (figuur 1). Maar wat betekenen dan de verbindingslijnen? Elektrostatische aantrekking? Bij NaCl misschien wel, maar bij ijzer, daarnaast, kunnen het eigenlijk alleen maar hulplijnen zijn.

Een andere opdracht was eerst één molecuul butaan (C_4H_{10}) te tekenen en vervolgens acht butaanmoleculen zodanig dat deze tekening een model van vast butaan weergaf. Het eerste butaanmolecuul werd op zeer verschillende wijzen getekend (figuur 2). Een probleem was, net als bij de NaCl-opdracht, dat de leerlingen niet wisten welke functie de tekening had. Er waren geen duidelijke eisen waar de tekening aan moest voldoen. De acht butaanmoleculen werden op uiteenlopende wijzen gerangschikt: door sommige groepjes in een plat vlak, terwijl andere een ruimtelijk perspectief in de tekening brachten. Dat laatste is minder eenvoudig, maar wel een vollediger weergave van de (veronderstelde) structuur van de vaste stof. Maar net als de eerste opdracht leed ook deze aan het euvel dat er geen vervolg was: de tekening diende niet als hulpmiddel bij een onderzoek, er werden bijvoorbeeld geen hypothesen of voorspellingen uit afgeleid. Daardoor ontbraken er ook criteria om de kwaliteit van de tekeningen te beoordelen.

In de biologielessen werd in het kader van het BPS-project aan leerlingen gevraagd om, werkend in tweetallen, een zo simpel mogelijk model te ontwerpen voor het proces van mitose, waarbij uit één cel twee cellen ontstaan die dezelfde erfelijke informatie bevatten als de oorspronkelijke cel. Begin- en eindtoestand waren gegeven. Bovendien werd gevraagd zelf een nadeel van het ontworpen model te bedenken, en vervolgens het model zo aan te passen dat het nadeel vervalst. Hoewel sommige leerlingen al 'besmet' waren door plaatjes die ze in het boek gezien hadden, werden er verschillende eigen modellen bedacht voor het mechanisme van de verdubbeling en de verdeling van het aantal chromosomen tijdens de celdeling. Van enkele modellen konden de leerlingen vervolgens zelf vaststellen dat deze de celdeling niet goed



Figuur 2.

konden verklaren, **bijvoorbeeld** doordat de twee ontstane cellen volgens het model elk slechts over de helft van de erfelijke informatie zouden beschikken in plaats van over het hele pakket. Zo'n model komt dus in een wezenlijk opzicht niet overeen met die celdeling.

Kader 1

leerlingen bezig met het maken van een model voor mitose

Als de leerlingen hebben gehoord dat bij de deling van een cel van alle chromosomen een kopie wordt gemaakt, staan ze voor het probleem hoe de chromosomen netjes over de twee dochtercellen kunnen worden verdeeld.

Enkele ideeën van leerlingen over de oplossing van dat probleem:

"de kopieën worden door magnetische velden uit elkaar getrokken"

"de gelijke chromosomen stoten elkaar af, n.l. gelijk van lading"

"de chromosomen liggen op een soort lopende band, eigenlijk twee lopende banden naast elkaar. De ene kopie wordt naar de ene dochtercel getransporteerd en de bijbehorende naar de andere"

"vanuit de nieuwe, lege cel groeien draden naar de moedercel toe die zich aan één van de twee 'helften' vasthechten en deze naar de nieuwe cel toetrekken"

De opdracht was niet ingebed in een onderzoekscontext, maar toch werden enkele belangrijke aspecten van het werken met modellen gerealiseerd. Zo waren de leerlingen er goed van doordrongen dat het model dat zij bedacht hadden niet dezelfde status had als een feit maar dat het een veel minder zeker, en daardoor ook een veel voorlopiger karakter had. Dat een model een hulpmiddel kan zijn bij onderzoek, kwam in deze opdracht echter niet uit de verf. En dat leek ons nu juist het meest wezenlijk.

De ervaringen met deze opdrachten leidden daarom tot de vraag hoe dan wel een echte onderzoekscontext kan worden aangeboden waarin leerlingen met modellen leren werken. Als voorbereiding op de beantwoording van die vraag hebben we ons afgevraagd hoe natuurwetenschappelijke onderzoekers eigenlijk zelf met modellen werken.

3. Onderzoekers

Men kan verschillende soorten natuurwetenschappelijke modellen onderscheiden, ze in groepen indelen en de verschillen daartussen bespreken. Maar voor ons was de tegenovergestelde vraag van belang: wat is het gemeenschappelijke van al die modellen, of beter: wat is het gemeenschappelijke in de manieren waarop onderzoekers in de verschillende natuurwetenschappelijke disciplines met modellen werken? Het doet er dan niet toe of het model de vorm heeft van een computerprogramma (dat bijvoorbeeld klimaatveranderingen voorspelt), of dat het een ziekgemaakte rat is (als model voor een menselijke patiënt) of een zandbak waarin geologen de vorming van een gebergte nabootsen.

Als we deze vraag in algemene termen hebben beantwoord dan kunnen we in het onderwijs, naast afzonderlijke modellen, ook het werken met modellen als een vaardigheid aan de orde stellen. Dan kunnen we - een belangrijke BPS-doelstelling - leerlingen een samenhangende behandeling van modellen in de bètavakken aanbieden. Het zou bovendien goed passen in het leren van onderzoeksvaardigheden in de Tweede Fase. En last but not least: in vrijwel alle vervolgoopleidingen kunnen leerlingen er baat bij hebben.

Dus: hoe werkt een natuurwetenschappelijk onderzoeker met een model? Een puntsgewijze beschrijving in algemene termen van modellen in natuurwetenschappelijk onderzoek, mede ontleend aan Bertels en Nauta (1969) is gegeven door Van Driel (1999). Deze beschrijving geeft ook aan hoe modellen gebruikt worden in natuurwetenschappelijk onderzoek. De vraag die wij ons gesteld hebben is of dat nu ook werkelijk het geval is.

Kader 2

Algemene kenmerken van modellen in de natuurwetenschappen (Van Driel 1999) samengevat

Een model:

1. is altijd een model van iets, n.l. van het object van onderzoek.
 2. is hulpmiddel bij onderzoek aan het betreffende object.
 3. vertoont een aantal overeenkomsten met het object van onderzoek waardoor het een bron van hypothesen over dat object kan zijn.
 4. verschilt van het object van onderzoek vanwege het streven naar eenvoud.
 5. Heeft, vanwege de tegenstrijdigheid van kenmerken 3 en 4, een *compromis*-karakter die de onderzoeker een zekere vrijheid geeft bij de keuze van een model.
 6. is niet rechtstreeks afgeleid van het object van onderzoek; creativiteit speelt een rol bij de keuze van een model.
 7. kan een ontwikkeling doormaken in de loop van een onderzoek.
-

We hebben, om die vraag te kunnen beantwoorden, enkele recente onderzoekspublicaties waarin met modellen wordt gewerkt geanalyseerd met behulp van vrijwel dezelfde beschrijving als die van Van Driel. Daarbij bleek dat wij de punten uit ons lijstje redelijk goed konden terugvinden in de onderzoekspublicaties. Maar zien de onderzoekers het zelf ook zo? Om daar achter te komen hebben we de resultaten van onze analyse aan de betreffende onderzoekers voorgelegd met het verzoek erop te reageren. Uit de commentaren die we ontvingen konden we opmaken dat de punten uit het lijstje grotendeels herkend werden. Daardoor bemoedigd hebben we de punten in de vorm

van een vragenlijst aan een grotere groep onderzoekers voorgelegd. Met deze procedure wilden we bereiken dat onze beschrijving zo goed mogelijk klopt met de werkelijkheid van het natuurwetenschappelijk onderzoek, m.a.w. we proberen onze beschrijving te valideren. We willen immers niet alleen over wetenschap schrijven, maar zelf ook enigszins wetenschappelijk te werk gaan. Waar onze ideeën de ervaringen van betrokkenen niet goed weergeven, moeten we ons kunnen laten terugfluiten.

De groep onderzoekers hebben we geselecteerd door in internationale researchtijdschriften in Utrechtse universitaire bibliotheken recente artikelen op te zoeken waarvan de auteurs zelf, in de titel, zeggen dat ze met een model hebben gewerkt. De groep tijdschriften is breed samengesteld: astronomie, meteorologie, geologie, natuurkunde, scheikunde, biologie, farmacie, geneeskunde, diergeneeskunde en landbouwwetenschappen. Hieronder bespreken we enkele punten en het commentaar dat we ontvingen van 26 onderzoekers uit negen landen. Waar mogelijk verwijzen we naar de nummers van de corresponderende punten uit het lijstje van Van Driel. Daarna bespreken we kort welke consequenties we zien voor het BPS-project en voor het onderwijs in de betavakken in het algemeen.

Kader 3

Enkele onderzoekspublicaties waarvan de auteurs bijdroegen aan dit artikel:

- Ferntosecond electron dynamics at adsorbate-metal interfaces and the dielectric continuum model (Applied Physics B, 1999)
- Assessing irrigation requirements in the Ord Sugar Industry using a simulation modelling approach (Australian Journal of Experimental Agriculture, 1999)
- Cancer from the outside, aging from the inside: Mouse models to study the consequences of defective nucleotide excision repair (Biochimie, 1999)
- Density Fluctuation and Hydrogen-Bonded Clusters in Supercritical Water. A Molecular Dynamics Analysis Using a Polarizable Potential Model (Bulletin of the Japanese Chemical Society, 1999)
- Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming (Nature, 22 april 1999)
- A dynamic model of bioavailability of metals in constructed wetland sediments (Ecological Engineering, 1999)

4. Model als hulpmiddel

Het eerste punt van Van Driel lijkt vanzelfsprekend, maar je kunt nooit weten: een model is altijd een model van iets, d.w.z. het verwijst naar iets anders. Daarmee zijn alle onderzoekers het eens, op één na die daar helaas geen toelichting bij geeft. En, zo wordt vervolgens gesteld, datgene waarnaar het model verwijst, dat is het eigenlijke onderzoeksobject. Het model is alleen maar een hulpmiddel bij dat onderzoek. Met die stelling gaan 22 van de 26 onderzoekers akkoord. Ja en nee, zegt een van de overige vier, een fysicus: we wilden niet alleen het systeem beter begrijpen waarnaar het model verwijst, maar we wilden ook een model formuleren dat in zichzelf consistent is. Het model wordt vaak een doel op zichzelf, beaamt iemand die verspreiding van zware metalen in het milieu onderzoekt: dan wordt het model gepubliceerd als een eindproduct van het eigen onderzoek, maar wel met de bedoeling dat een ander er weer gebruik van maakt. En dat gebruik hoeft niet, zo

waarschuwt deze onderzoeker, in onderzoek te zijn: het model kan ook, met name in de technologie, als een ontwerp dienen, of om beslissingen op te baseren. We worden hier dus inderdaad teruggefloten: wij kunnen ons wel tot onderzoek willen beperken, maar het onderzoek zelf vindt niet in een isolement plaats en we krijgen dus onvermijdelijk te maken met toepassingen van modellen buiten de wereld van het onderzoek. En bovendien: onderzoek is niet een puur individuele activiteit maar er is een taakverdeling binnen een samenwerkingsverband.

Wat wel overeind blijft is het onderscheid tussen het model en datgene waarnaar het model verwijst. Dat onderscheid, dat door alle onderzoekers (op die ene na) bevestigd wordt, vormt nogal eens een probleem in ons onderwijs: leerlingen zijn geneigd model en object te laten samenvallen, of met elkaar te verwarren. Dan zien ze bijvoorbeeld het Bohr-model van het atoom als het atoom zelf. Lastig, als je later moet leren dat, bijvoorbeeld, de elektronen in meer geavanceerde atoommodellen toch niet in cirkels om de kern draaien.

Wanneer je het model niet goed onderscheidt van datgene waarvan het een model is, dan wordt het ook moeilijk te begrijpen dat er soms twee of meer modellen van hetzelfde object gebruikt worden. Immers: welk van die modellen is dan 'waar', wat is het 'juiste' model?

Van onze 26 onderzoekers geven er 20 aan dat ze inderdaad vaak met twee of meer modellen van hetzelfde object werken. Zij spreken over "different models (...) applied to the same object" en "a wide range of possible models" en iemand noemt "competing models". De keuze van het model hangt samen met de vraag die je wilt beantwoorden: "theoretically, as many models can be developed as there are research questions about the thing the model represents". Blijf wel kritisch, waarschuwt een ander, want een verkeerd gekozen model "can lead to erroneous conclusions". Over het al of niet 'waar' zijn van een model is een van de onderzoekers bijzonder duidelijk: "The pharmacokinetic model we proposed (...) has no probability to be the actual process, but it fits the observed concentrations better than the "conventional" models for the absorption process". Je kunt dus een model voorstellen waarvan je wéét dat het naar alle waarschijnlijkheid niet 'waar' is, maar dat goed werkt als hulpmiddel in het onderzoek.

In het onderwijs beperken we ons meestal tot één model tegelijk. Toch lijkt een 'meer-modellenmodel' heel geschikt om het onderscheid tussen model en object duidelijk te maken. Van Hoeve-Brouwer (1996) beschrijft in haar proefschrift het werken met successieve en met simultane modellen in het onderwijs. Vooral bij de simultane modellen ervaren de leerlingen dat een model niet door de natuur gegeven is maar door mensen gekozen of ontworpen wordt en dat daarbij bepaalde criteria gehanteerd worden.

5. Werken met modellen

Het onderscheid tussen model en object kan waarschijnlijk pas echt duidelijk worden wanneer het model in een onderzoek gebruikt wordt. Wat doe je met een model in een onderzoek en wat heb je er aan? Punt 3 van Van Driel stelt dat je er hypothesen of voorspellingen over het eigenlijke onderzoeksobject uit kunt afleiden, en dat je die dan moet toetsen aan dat object voordat je ze als nieuwe kennis kunt aanvaarden.

Dat zijn alle 26 onderzoekers met ons eens. "This is part of the scientific method" schrijft een geoloog, en een collega-onderzoeker die keuzegedrag bij

ratten bestudeert beaamt: "Yes, just like Popper likes it." Een kankeronderzoeker die met proefdieren werkt meldt zelfs heel concreet, en niet zonder trots: "We predicted increased susceptibility to cancer which turned out to be true." Een astronoom is nog niet zo ver: "The model has explained a phenomenon which is seen from satellites. But this explanation is currently only a hypothesis which now has to be verified by measurements." Maar er zijn wel kanttekeningen. "Testing is often difficult in earth sciences" meldt een geoloog en een collega waarschuwt: "[A]ttention should be paid to the limit of the validity of the model. Its application besides the limit can cause grave errors". Die waarschuwing doet denken aan het voorbeeld van het kristalmodel: de conclusie dat er lucht tussen de moleculen zit mag niet uit het model worden getrokken. Die conclusie valt buiten het bereik van het model.

Je kunt, zo zegt het lijstje (punt 7), een soort cyclus in het werken met modellen vaststellen: het model geeft aanleiding tot nieuwe experimenten of nieuwe waarnemingen aan het object, en dat leidt dan weer tot nieuwere, meer geavanceerde modellen. En zo voort. We ontvingen hierop 24 instemmende reacties en één bedenking. Onder de instemmers iemand die zegt: "Our approach (...) is to begin with a simplified model and then enhance the model as physical parameters and processes become better understood." En een dieronderzoeker geeft aan dat de cyclus kan uitlopen op een toepassing: "The model will enable investigation of future experiments designed to examine methods to reduce the incidence of this disease". De bedenking komt van een fysicus die meldt dat ("Unfortunately") in zijn specifieke geval het model eigenlijk alleen geschikt is voor één bepaald systeem en dat de vervolgentoetsen al vastlagen voordat het model was ontwikkeld.

6. Compromiskarakter

Niet bij alle onderzoek worden modellen expliciet als hulpmiddel gebruikt. Wanneer gebruik je een model en wanneer niet? En als je een model wilt gebruiken, welke eisen stel je er dan aan? Wij dachten dat je een model alleen nodig hebt wanneer je eigenlijke object van onderzoek op de een of andere manier niet of niet goed toegankelijk is voor rechtstreeks onderzoek (vergelijk punt 1 van Van Driel). Het object is bijvoorbeeld te klein (een atoom), te ingewikkeld (de menselijke hersenen), of te ver weg (een komeet), er gelden ethische beperkingen (nogmaals: de menselijke hersenen) of het bestaat niet meer (een dinosaurus) of nog niet (het weer van volgende week). Vaak heeft de gebrekkige toegankelijkheid gewoon met kosten te maken, bijvoorbeeld om metingen op duizenden plaatsen in de atmosfeer te doen, of om de visstand in een meer over een langere periode nauwkeurig te blijven volgen. In al deze gevallen kies je een model dat wel toegankelijk (of: beter toegankelijk) is en dat, tijdelijk, het object kan vervangen zodat je je activiteiten voorlopig maar even op het model kunt richten.

De eerste eis die we aan een model moeten stellen is dus dat het toegankelijker is voor onderzoek dan het eigenlijke onderzoeksobject. Meestal betekent dat dat het model eenvoudiger is (punt 4). Maar toch moet het wel voldoende overeenkomsten vertonen met het object om nog als model ervan te kunnen dienen (punt 3). De eenvoud mag dus niet te ver gaan. Het model heeft daardoor een compromiskarakter: wel toegankelijker dan het model, maar anderzijds op essentiële punten ermee overeenkomend (punt 5). Die gedachte hebben we aan onze onderzoekers voorgelegd.

Dat het model toegankelijker moet zijn dan het eigenlijke onderzoeksobject zijn 20 van de 26 onderzoekers met ons eens. Een van die 20 schrijft dat zijn computermodel van een diffusieproces in grondwater in minuten of seconden ontwikkelingen kan laten zien die in werkelijkheid jaren duren: "Hence, the question is more "accessible". Een ander gebruikt een computermodel om stromingsprocessen in de atmosfeer te onderzoeken en merkt op: "This is not possible by performing measurements inside the real atmosphere." En een onderzoeker van diergedrag meldt over zijn model: "[I]t describes the fundamental properties rather than the complexity of the object". Een collega, die ook met de stelling instemt, waarschuwt wel dat een computermodel zijn eigen expertise vereist: "...some people find it easier to go measure stuff in the lake than try to use a complicated computer code" en hij voegt er, misschien wat spijtig, aan toe: "... I was the only one able to run the model." Er zijn vier mensen die 'oneens' hebben geantwoord. De enige toelichting daarbij luidt: "It is abstract (an idea), whereas the object is real. It is not only more accessible, it is simpler (it describes the fundamental properties rather than the complexity of the object)". Erg oneens klinkt dat eigenlijk niet, vinden we.

Met de stelling dat het model overeenkomsten vertoont met het object zijn 24 van de 26 onderzoekers het eens. Enkelen noemen de overeenkomsten op: "The physical laws which are believed to control the dynamics of fluid are incorporated in the model", en een onderzoeker naar eiwitstructuren die het ene, bekende eiwit als model gebruikt voor het andere, waarvan de structuur moet worden vastgesteld, somt op: "sequence similarity, observable structure similarity". Maar een collega die met behulp van een model effecten van luchtverontreiniging onderzoekt geeft een ontwijkend antwoord: "Can't tell. (..) Without corroborative evidence, it is difficult to tell if the model has things in common with what it represents." En dat is natuurlijk zo: het object moet immers nog onderzocht worden en misschien blijkt later dat de bedoelde overeenkomsten er helemaal niet zijn. Iemand merkt op dat er een opschuiving plaats vindt naar steeds ingewikkelder modellen: "As we learn about the process we are modeling, the models tend to become more advanced (and usually more complicated)." Maar, zegt een ander over de steeds ingewikkelder modellen, "A successful modeler never seeks this as a useful goal", en hij legt uit dat eenvoud ook essentieel blijft, en dat er altijd een optimum gezocht moet worden. Twee collega's zeggen iets soortgelijks. De één over een extreem ingewikkeld model: "[It] might almost be called a model which is identical with what it represents. But it is far beyond the grasp of an experimentalist, both in understanding and in using." De ander laat weten dat voor driedimensionale modellen van de atmosfeer vaak supercomputers nodig zijn, maar dat hij zelf een eenvoudig tweedimensionaal model prefereert: "In our case, we run the model using a micro-computer."

7. Creativiteit

Hoe kom een onderzoeker aan een model? Kun je leren een bruikbaar model te kiezen, of te ontwerpen? We dachten dat een model niet zomaar uit de beschikbare gegevens voortvloeit, maar dat er altijd ook een element van creativiteit bij betrokken is. Dat idee hebben we aan de onderzoekers voorgelegd. Het krijgt 20 aanhangers en zes tegenstanders.

Vier van de aanhangers en één tegenstander melden dat bestaande modellen een grote rol spelen bij het ontwikkelen van een nieuw model. Vooral

als een bestaand model problemen oplevert worden mensen gestimuleerd om iets nieuw te bedenken. Een klimaatonderzoeker die onderdelen van zijn model aan anderen heeft ontleend, beschouwt de combinatie van die onderdelen in zijn eigen model als "an element of creativity". Eén onderzoeker adviseert met klem om bij het zoeken van een geschikt model uit te gaan van de vraag die beantwoord moet worden. Een tegenstander, een diergeneeskundige, merkt op: "The model followed from the workers' findings and observation in the field." Misschien lijkt achteraf de keuze van een model wel zo logisch dat de bedenker dat zelf niet als een creatieve prestatie beleeft. In dat geval moeten wij blijkbaar scherper formuleren wat we onder creativiteit verstaan.

8. En dus?

De eerder genoemde 4vwo-klas nam nog niet deel aan de vernieuwde Tweede Fase. Nu na de invoering daarvan ruimere mogelijkheden zijn ontstaan om leerlingen zelf onderzoek(jes) te laten doen, dient te worden overwogen of leerlingen dan ook moeten leren werken met modellen. Er is veel voor te zeggen: modellen spelen een belangrijke rol in alle natuurwetenschappelijke disciplines, en ook daarbuiten wordt op soortgelijke wijze vaak met modellen gewerkt. Zeker in het vwo (wat immers staat voor voorbereidend wetenschappelijk onderwijs) zou het leren werken met modellen een goed verdedigbaar onderdeel van het programma zijn.

Niet het leren van een modelbegrip, maar het leren werken met modellen zou dan centraal dienen te staan. Het is bijvoorbeeld van groot belang dat leerlingen beseffen dat een onderzoeksobject vaak nogal ontoegankelijk is, en dat je juist in zo'n situatie op zoek kunt gaan naar een geschikt model. Op grond van wat onze 26 onderzoekers melden menen wij dat de volgende activiteiten, in onderlinge samenhang, een rol moeten spelen wil er sprake zijn van zinvol leren:

- beoordelen of in een bepaalde situatie een model wenselijk of nodig is
- zo ja, dan een of meer geschikte modellen kiezen of ontwerpen
- relevante hypothesen en/of voorspellingen afleiden uit een model
- en die vervolgens toetsen
- om daarna het betreffende model te verbeteren en opnieuw te gebruiken.

Dit vraagt dus om een onderzoekscontext waarin het werken met modellen zinvol is en als zinvol kan worden ervaren. Het oefenen van afzonderlijke deeltaakjes die een voor een beheerst en getoetst worden, is niet voldoende. Er zal ook coördinatie tussen de schoolvakken moeten zijn, of op zijn minst, zoals in het BPS-project om een 'bètabreed' leerresultaat te bereiken, tussen de bètavakken.

Uit de antwoorden van de onderzoekers blijkt verder dat het begrip 'onderzoekscontext' niet te beperkt moet worden opgevat. Elk artikel is ingebed in een meeromvattend onderzoeksprogramma. Het leren werken met modellen zou dan ook niet een afzonderlijk onderdeel mogen zijn dat weer afgesloten kan worden nadat er een aantal lessen aan is gewijd. Het zou realistischer zijn het leren werken met modellen in het onderwijs te integreren, bijvoorbeeld door er in de natuurwetenschappelijke vakken aandacht aan te besteden wanneer er micro-macrorelaties aan de orde komen. Dat kan bijvoorbeeld bij de relatie tussen cel en organisme (mitose, meiose), bij kristalbouw in relatie tot kristalvorm, bij voorstellingen van elektrische stroom, bij de werking van zeolieten en bij de kinetische gastheorie (Vollebregt, 1998).

Er zijn echter ook bedenkingen mogelijk. Het vwo is immers niet bedoeld als beroepsopleiding voor onderzoekers. Onderzoekers worden opgeleid aan de universiteit, en in de praktijk vaak pas na afloop van de eigenlijke universitaire studie, n.l. in het promotieonderzoek. De academische promotie, niet het vwo-examen is de proeve van bekwaamheid die een onderzoeker moet afleggen.

Misschien is het daarom helemaal niet zo nodig dat een vwo-leerling leert onderzoeken met behulp van modellen. De v van vwo zou ook kunnen worden uitgelegd als: de leerling moet een beeld krijgen van de mogelijkheden en beperkingen van (het gebruik van modellen in) natuurwetenschappelijk onderzoek, zonder zelf de nodige vaardigheden te hoeven verwerven. De vwo-er kan in situaties worden gebracht die zelf voldoende wezenlijke kenmerken van onderzoek bezitten om als model van onderzoek te kunnen dienen. Wat je in die situaties leert, blijkt later nuttig als je met echt onderzoek in aanraking komt.

Echter: ook als de leerling niet zelf hoeft leren onderzoeken met behulp van modellen maar zich 'slechts' een beeld daarvan hoeft te verwerven, dan nog mag aan dat beeld de eis worden gesteld dat het voldoende overeenkomt met de gang van zaken in reëel onderzoek. Zo'n leerling zou dan niet alleen worden voorbereid op het kiezen en volgen van een wetenschappelijke opleiding maar ook, als belanghebbende of als belangstellende, onderzoeksresultaten van anderen kunnen interpreteren en kritisch beoordelen. Dat zijn, lijkt ons, ook waardevolle leerresultaten.

Literatuur

- Bertels, K., en D. Nauta (1969). Inleiding tot het modelbegrip. Bussum: De Haan.
- Dieks, D. (1999). Een goed model? Tijdschrift voor Didactiek der β -wetenschappen (*TD β*) 16, 1, 4-11.
- Doorman, M., en K. Gravemeijer (1999). Modelleren als organiserende activiteit in het wiskundeonderwijs. *Tijdschrift voor Didactiek der pwetenschappen (TD β)* 16, 1, 38-55.
- Driel, J.H. van, (1997). Het onderwijzen van modellen binnen ANW. *Tijdschrift voor Didactiek der β -wetenschappen (TD β)* 14, 2, 177-196.
- Driel, J.H. van, (1999). Modellen en modelleren als rode draad in het natuurwetenschappelijk onderwijs. *NVOX* 24, 7, 357-359.
- Drijver, J.W., (1998). Rekenmodellen, wat moet je ermee in de klas? *NVOX* 23, 2, 75-78.
- Gravemeijer, K., (1999). Symbolen en modellen. *Tijdschrift voor Didactiek der β -wetenschappen (TD β)* 16, 1, 1-3.
- Hoeve-Brouwer, G.M., van (1996). *Teaching Structures in Chemistry*. Utrecht: CD β Press.
- Hummelen, H., A. Jambroes en T. van der Valk (2000). Vorm een B-profielteam! *NVOX* 25,2.
- Jordens, H., (1998). Een nieuw simulatieprogramma. *NVOX* 23, 5, 260-261.
- Kramers-Pak, H., (1999). Modellen en modelleren in het natuurwetenschappelijk onderwijs. *NVOX* 24, 2, 51-54.
- Oers, B. van, (1999). Symboliseren in Statu Nascendi. *Tijdschrift voor Didactiek der pwetenschappen (TD β)* 16, 1, 56-72.

- Pieters, M., (1999). De mens, materie, modellen, machten van tien: overwe-
gingen bij een leerplan Algemene Natuurwetenschappen. Tijdschrift voor
Didactiek der ,&wetenschappen (TDβ) 24, 2, 128-148.*
- Vollebregt, M., (1998). A Problem Posing Approach to Teaching an Initial
Particle Model. Utrecht: CDβ Press.*
- Vollebregt, M., K. Klaassen, R. Genseberger en P. Lijnse (1999). Inzichtelijk
een deeltjesmodel leren. Tijdschrift voor Didactiek der pwetenschappen
(TDβ) 16, 1, 12-26.*