

Het ontwikkelen van een model-begrip bij leerlingen van 15-16 jaar.

R.J. Genseberger

Open Schoolgemeenschap Bijlmer (OSB), Amsterdam

Summary

A previous article in TD- β described some characteristics of a science course developed at the Open Schoolgemeenschap Bijlmer in Amsterdam. This article elaborates on one of the main features of the course, i.e. the development of a concept of models by students. Two essential lines are to be distinguished in the course: "from large to small and viceversa" and a historical line. The article describes how students, departing from their own notions, design and use their own models and how these models are being further developed and tested in classroom discussions. Historical models, not always recognized as such, often prove to be useful as vehicles for thought. Pupils not only prove to have become very flexible in the way they think in and about concepts but also appear to be more attracted to science than before the course. This is particularly true for girls. Finally we outline some problems we have encountered over the years.

1. Wisselwerking tussen theorie en praktijk, een denkwijze

Het bewust hanteren van de wisselwerking tussen theorievorming en praktijk, is een van de grote verworvenheden van de moderne wetenschappen. Het vormen van modellen is kenmerkend voor die wisselwerking. In een cursus waarin het leren gebruiken van modellen een belangrijke plaats inneemt ligt het daarom voor de hand de leerlingen eerst kennis te laten maken met het ontstaan van een theorie. Daarvoor nemen we uitgebreid de tijd. (Zie ook Rumpf, 1987)

Theorie en model

Het gebruik van de woorden "theorie" en "model" is niet éénduidig. Dat is niet zo verwonderlijk, de woorden hebben een lange ontstaansgeschiedenis. In iedere periode en discipline werden en

worden deze woorden op een andere manier gebruikt (Bertels, 1969). Het is onmogelijk om in onderwijs dat iets van de ontstaansgeschiedenis van de wetenschap wil laten zien een eenduidige betekenis te hanteren. Hoewel er gepleit wordt voor eenduidig gebruik van die termen (Hondebrink, 1988) geloof ik dat dit zelfs niet kan in onderwijs dat zich helemaal niet bezighoudt met de historische context. De begrippen theorie en model zijn abstracties die slechts al ontwikkelend geleerd kunnen worden. Daarbij is op ieder denkniveau en bij iedere leerling een ander beeld aanwezig. In deze optiek past het niet om bij leerlingdenkbeelden over "misconcepties" of zelfs maar "préconcepties" te spreken. Willen we leerlingen het proces van wetenschapsontwikkeling laten ervaren, dan zullen we ze van hun eigen denkbeelden uit moeten laten gaan, hen helpen om die verder te ontwikkelen in discussie met elkaar en met de docent. Onderzoekers uit het verleden hebben hun eigen denkbeelden ook serieus genomen, zonder dat zelfvertrouwen hadden ze de wetenschap niet verder kunnen helpen¹). Hierna wordt geschetst hoe we leerlingen helpen om intuïtief een model- en een theoriebegrip te ontwikkelen. Omdat het in dit artikel vooral gaat over het "ontwikkelen", zal ik meestal de woorden theorie- en modelvorming gebruiken. Theorievorming beschouw ik als het proces van samenvatten en veralgemeniseren van waarnemingen. Daarbij worden doorgaans veronderstellingen gemaakt. Modelvorming vat ik op als het gebruiken van symbolen om delen van de wereld te representeren. Door de representatie van de wereld in symbolen wordt zij overzichtelijker en toegankelijker. De symbolen die gebruikt worden veranderen in de loop van de tijd. Zo gauw een deel van de wereld eigen is gemaakt kan dat deel weer dienen als symbool voor een tot dan toe ontoegankelijk stuk van de wereld. (Lévi-Strauss, 1968).

Kennismaking met modellen in de biologie.

a. Het "man-vrouw" model

Een onderwerp waar alle leerlingen zich sterk bij betrokken voelen en dat tevens de begrippen "model" en "theorie" op een elementair niveau kan demonstreren is "voortplanting". Daarom zijn we in de cursus hiermee gestart. Het model dat we gebruiken is de verdeling van een deel van de wereld in twee groepen: "mannelijk" en "vrouwelijk". Dit is een indeling die in de grijze oudheid al gemaakt is. Bij dit model komt het symboolkarakter

ervan duidelijk tot uiting. Het is voor ons echter zo vanzelfsprekend om de levende natuur in mannelijk en vrouwelijk te verdelen dat we ons het symboolkarakter daarvan vaak niet meer realiseren. Man en vrouw zijn in eerste instantie woorden die bij mensen horen, een herkennen van patronen in de levende natuur heeft geleid tot het symboliseren daarvan door het eigen lichaam. Vanwege het succes dat hiermee geboekt werd in het herkennen van patronen in de levende natuur, kwam men ertoe dat wat we nu "de dode natuur" noemen eveneens van deze symbolen te voorzien. De hele omgeving werd in mannelijk en vrouwelijk verdeeld. Als inleiding kozen we voorbeelden uit het dierenrijk waarbij direct duidelijk was dat de wijze van voortplanting pas na langdurige en moeizame observatie ontdekt kon worden (b.v. zeeduizendpoot). Na een korte herhaling van voortplanting bij planten, krijgen de leerlingen de opdracht bij een of meerdere planten de delen te zoeken die voor de voortplanting essentieel zijn. (Hierbij mag wel de stereo-loep maar niet de microscoop gebruikt worden.) Van hun waarnemingen maken ze tekeningen die de basis moeten vormen van een door hen zelf te schrijven artikel over voortplanting bij planten. Dit is natuurlijk nog geen theorievorming door de leerlingen, maar ze gaan wel beseffen hoe moeilijk het moet zijn geweest om uit de waarnemingen de voor hen zo vanzelfsprekend schijnende theorie te ontwikkelen. Ze beginnen er een vermoeden van te krijgen dat een interpretatie van de waarnemingen aan theorievorming vooraf moet gaan.

b. Voortplantingstheorieën in de Griekse Oudheid en de Gouden Eeuw

We confronteren de leerlingen daarna met twee voorplantingstheorieën uit de Griekse Oudheid, die van Hippocrates en die van Aristoteles: het evenwicht der seksen tegenover de opvatting dat alleen de man telt (Bernal, 1971). Beide theorieën hebben eeuwenlang stand gehouden. Volgens Hippocrates (Needham, 1934) ontstaat de foetus, wanneer een mannelijke en een vrouwelijke zaadvloeistof zich met elkaar vermengen. Hij ging er van uit dat mannen en vrouwen vloeistof afscheiden die een extract is van alle delen van het lichaam, in het bijzonder de hersenen. Het hele lichaam is dus betrokken bij de geslachtsgemeenschap, waardoor tevens de intensieve ervaring in een groot deel ervan verklaard kon worden. De zaadvloeistoffen dalen af door het

ruggemerg en vermengen zich in de baarmoeder om een kiem voor het embryo te vormen. De hoeveelheid vloeistof moet precies kloppen: wanneer er te weinig is ontbreekt een arm, een been, Aristoteles ging er vanuit dat het vocht van de vrouw geen levenskracht heeft, maar dat een vluchtige vloeistof in het mannelijke zaad helemaal verantwoordelijk is voor het ontstaan van nieuw leven. Vervolgens vermelden we twee ontdekkingen uit de Gouden Eeuw: die van de eicel bij de koe door Reinier de Graaf en die van de mannelijke zaadcellen door Johan Ham, gedaan met een microscoop van Anthonie van Leeuwenhoek. Deze ontdekkingen leverden twee groepen wetenschappers op met verschillende opvattingen, de ovulisten en de animaculisten. De eersten meenden dat er zich al een volledig mensje in de eicel bevond, de tweede groep zag een compleet mensje in de zaadcel. (Schierbeek (1950; p.299 e.v.)

Conclusie

De leerlingen krijgen nu de taak om zowel voor de Oudheid als voor de 17de eeuw waarneming en theorie uit elkaar te halen. We geven ze de opdracht een stukje te schrijven waarin ze een aantal vragen beantwoorden. De vragen hebben betrekking op de rol van man en vrouw in verschillende theorieën en op de waarnemingen die aan die theorieën ten grondslag lagen. Ook wordt gevraagd naar een relatie met gangbare maatschappelijke opvattingen. De leerlingen vonden deze kennismaking met de wisselwerking tussen waarneming en theorievorming allesbehalve vanzelfsprekend. Dat bleek uit achteraf, ook schriftelijk, gemaakte opmerkingen. Ze vonden dat ze er veel van geleerd hadden, vooral omdat het hen aanvankelijk moeilijk viel om de twee componenten uit elkaar te houden.

2. Het ontwikkelen van modellen

Het instappen

Bij de bestudering van de levende natuur zijn we tot nu toe uitgegaan van het direct waarneembare. Verhalen uit het verleden gingen over wat mensen toen konden waarnemen. De microscoop betekende een uitbreiding van de waarnemingsmogelijkheden die weliswaar heel nieuwe gebieden en nieuwe inzichten ontsloot maar waarbij toch steeds werd uitgegaan van het zichtbare. Theorieën ontstonden als abstracte samenvattingen die over het in principe waarneembare gingen. Schoten die te kort,

dan konden altijd nog mythologieën, God of de duivel uitkomst bieden. Met de atoom- en molecuultheorie, die pretendeert een modelbeschrijving te bieden voor alle materie, betreden we een gebied dat buiten het direct waarneembare ligt. Zelfs voor kinderen is het tegenwoordig vanzelfsprekend dat er een sub-waarneembare structuur bestaat. Iedereen heeft gehoord van atomen, in wat voor verband dan ook. Maar dat het een gebied is dat ontsloten kan worden door menselijke (dus eigen) activiteit is voor hen niet zo vanzelfsprekend. Kennis over dit gebied wordt immers meestal aangedragen in mooie plaatjes, verhaaltjes of nagebouwde modellen op tentoonstellingen. Leerlingen krijgen zo de indruk dat de hele wereld van atomen en moleculen helder en klaar voor de geleerden open ligt. Hun eigen houding in deze situatie is niet voor alle leerlingen gelijk. Sommigen hebben uit allerlei bronnen wetenswaardigheden verzameld en die als feiten onthouden. Anderen lijken ervan overtuigd dat deze ontdekkingen alleen voor geleerden toegankelijk zijn en niet voor gewone stervelingen. Door deze verschillen is er heel wat spraakverwarring als men een groep leerlingen over deeltjes laat discussiëren.

Vuur-aarde-water-lucht-model

Het eerste jaar waarin we dit programma ontwikkelden heb ik door opmerkingen uit de klas een ingang gevonden voor het oefenen in model-denken die zo succesvol bleek te zijn dat we hem nog steeds gebruiken. Hij sprak iedere hierboven geschetste groep leerlingen op een heel eigen manier aan. Als anecdote vertelde ik in dat jaar iets over de elementen waar Aristoteles (in navolging van Thales en Pythagoras) de wereld uit opgebouwd dacht: vuur, aarde, water en lucht. In de discussie die dat teweeg bracht, waren opmerkelijke standpunten te horen. Aan de ene kant was er de eerder genoemde groep van hen die door lezen of t.v. kijken al enigszins vertrouwd waren met een atoom- of molecuulmodel (voornamelijk jongens). Zij vonden de Aristoteliaanse opvatting maar onzin. Het lukte hen echter niet dat goed te verdedigen tegenover klasgenoten die wel iets in het Griekse model zagen. Een meisje opperde dat het standpunt van Aristoteles eigenlijk heel logisch was: als je een tak van een boom afbreekt komt er vocht uit de stengel (water), verbrand je hem dan ontstaat er vuur, een groot deel van de tak verdwijnt daarbij in de lucht en de as wordt weer een bestanddeel van de aarde. De atomisten konden daar niet veel meer tegenover

stellen dan "het is niet waar, de geleerden weten nu dat alles uit atomen bestaat". Zij waren ervan overtuigd dat ik aan hun kant stond. Deze discussie zorgde er echter voor dat ik mezelf beter kon voorstellen hoe de Grieken er waarschijnlijk tegenaan hadden gekeken. (Zie voor meer voorbeelden van het veranderen van gezichtspunt bij leraar en leerlingen: Genseberger (1982)). Deze ervaring beïnvloedde het volgende cursusjaar mijn behandeling van het onderwerp. Ik bracht het Griekse model vanuit een zekere vanzelfsprekendheid, met onder andere het voorbeeld van die tak. Tot mijn verbazing merkte ik dat deze keer de reactie van de "atomisten" achterwege bleef. Iedereen scheen het een heel vanzelfsprekend model te vinden. Sommige leerlingen zeiden dat ze nu wel wisten dat er atomen waren, maar dat ze zeker het oude model aangenomen zouden hebben als ze in die tijd geleefd hadden²). Een totaal andere benadering sprak hieruit: bij de "atomisten" van het eerste jaar stond de "wetenschap" een zich openstellen of inleven in de Griekse denkwereld volledig in de weg. Alleen degenen die daar frank en vrij tegenover stonden waren in staat het waarheidsgehalte van dat model "neutraal" te onderzoeken met een voor mij verrassend resultaat. In de volgende jaren vonden nagenoeg alle leerlingen het vanzelfsprekend dat modellen kritisch onderzocht werden, mede doordat er geloofwaardig gestart was met een voor de meesten onbekend model³).

Het deeltjesmodel

Na het vorige model introduceren we een ander Grieks model, het deeltjesmodel, voorlopig voorgesteld door bolletjes. We blijven de woorden molecuul en atoom vermijden, omdat we gemerkt hebben dat die woorden bij veel leerlingen het zelfstandig en creatief denken blokkeren. Als gevolg van de werkwijze bij het vorige model wordt ook bij het deeltjesmodel gretig naar sterke en zwakke punten gezocht. De leerlingen en de docent voeren steeds een aantal verschijnselen aan die verklaard moeten worden met het deeltjesmodel. De docent zorgt ervoor dat de verschijnselen gekozen worden uit het gebied waar alleen de thermische beweging en de Van der Waalskrachten te hulp hoeven te worden geroepen. Zo bouwen we langzamerhand een beeld op van allerlei eigenschappen die de deeltjes moeten hebben, willen ze de aan de leerlingen bekende en de in proeven getoonde verschijnselen kunnen veroorzaken. Of het deeltjes-

model klopt met de huidige theorieën laten we zo lang mogelijk in het ongewisse. Een groot struikelblok bij het deeltjesmodel is dat veel leerlingen zich geen volkomen veerkrachtige botsing of een krachtwerking op afstand kunnen voorstellen. Het zijn eigenschappen die we wel aan de moleculen toeschrijven, maar die we niet kennen uit de dagelijkse omgeving. In een klas waarin eerst een aantal onderwerpen uit de sterrenkunde behandeld waren (o.a. het zonnestelsel) hadden de leerlingen veel minder moeite met de "ideale bewegingen". Zij pasten de eeuwigdurende beweging in het heelal uit zichzelf toe op het niveau van de moleculen. Ook historisch gezien zijn veel mechanicawetten aan de hemel ontdekt!

De lege ruimte

Een van de consequenties uit het model waar de leerlingen veel moeite mee bleken te hebben was dat er een lege ruimte tussen de deeltjes is. Als immers eenmaal is aangenomen dat lucht uit deeltjes bestaat, is het logisch dat er zich tussen die deeltjes niets bevindt. Het is een consequentie van het verklaren van het uitzetten en samenpersen van lucht met behulp van onveranderbare deeltjes. Steeds weer liet een aantal leerlingen duidelijk merken dat ze de logica wel zagen, maar dat ze het eigenlijk niet wilden geloven. Dat er ergens "Niets" is kon er bij hen gevoelsmatig niet in. Er werden allerlei constructies bedacht om uit die tegenstrijdigheid te komen. Leerlingen van 15-16 jaar kunnen daar urenlang over discussiëren. Eenzelfde strijdpunt heeft in de zeventiende eeuw gespeeld tussen aanhangers van Gassendi enerzijds en Descartes anderzijds. (Dijksterhuis, 1950, IV: 231-240) Het is boeiend om te horen hoe in de klas argumenten opduiken die ook in die discussie te horen zijn geweest. Dat heb ik leerlingen weleens verteld, ze waren er dan heel trots op dat hun discussie vergeleken werd met die van beroemde geleerden. Dat geeft hun een heel ander gevoel dan wanneer ze steeds te horen krijgen "we weten nu dat ..". In de moderne natuurkunde is het probleem van de lege ruimte trouwens weer opgedoken. Bij de quantum-veldentheorie is het onduidelijk wat we onder lege ruimte moeten verstaan, evenals zo veel andere "zekerheden" door de moderne natuurwetenschap zijn aangetast. De winst in de natuurwetenschap is inmiddels dat twee verschillende standpunten gehandhaafd kunnen blijven, afhankelijk van welk verschijnsel je bekijkt of welk probleem je wilt benaderen.

Dit inzicht, dat er meer dan één antwoord goed kan zijn, willen we proberen de leerlingen ook te laten verwerven. Als we overal een pasklare oplossing voor geven, brengen we de wetenschap van deze eeuw met een negentiende eeuwse schijnzekerheid naar de leerlingen. We schotelen hen dan een beeld voor van een zich natuurnoodzakelijk in één richting ontwikkelende wereld, waarvan de vooruitgang uitsluitend afhankelijk is van de "deskundigen".

Een alternatief: het veertjes-model

Wanneer de lege ruimte weerstand blijft oproepen stel ik wel eens een ander model voor: het veertjes-model. Uitgaande van de veerkrachtigheid van opgesloten lucht (b.v. in een injectiespuit) kunnen we ons voorstellen dat lucht uit veerkrachtige deeltjes bestaat. In analogie van de eerder onderzochte modellen levert dat een hele discussie op over het al of niet waarschijnlijk zijn van zo een model. Sommigen vinden dit nog ongeloofwaardiger dan het "bolletjes"-model met krachtwerking op afstand. Anderen zien er wel wat in. Om het onderzoek een nieuwe dimensie te geven vertel ik dat in de tijd waarin de discussie over het vacuüm gevoerd werd er een nieuwe manier van onderzoek in de mode kwam, namelijk het meten, en dat door Boyle en Hooke aan lucht en veren gemeten is. Enige informatie over de plaats die deze mensen in de natuurwetenschap van hun dagen innamen bevordert het respect waarmee de leerlingen vervolgens een aantal (zo simpel lijkende) proefjes tegemoet treden. Om de bruikbaarheid van het veer-model te onderzoeken gaan we na hoe lucht samengedrukt wordt onder invloed van een kracht en hoe veerkrachtige voorwerpen (b.v. een stalen veer) worden samengedrukt. Uit de regelmaat die we dan bij beide verschijnselen waarnemen kunnen we iets concluderen over de aard van de veerkracht bij lucht. Die conclusie zal geen duidelijke uitspraak zijn maar één in termen van waarschijnlijkheid: "als lucht uit veerkrachtige deeltjes bestaat, dan zijn de deeltjes in ieder geval niet" of "misschien zijn ze wel vergelijkbaar met ...". Aan de invoering van het meet-experiment als nieuwe methode in de natuurwetenschap kan op deze plaats in de cursus aandacht besteed worden. Problemen van meetwaardenverwerking komen nu om de hoek kijken: tekenen van een grafiek, welke betekenis heeft dat? Gaat de grafiek door de meetwaarden heen of loopt hij er juist zo glad mogelijk

tussendoor? Wat is de aparte betekenis van zo een grafiek en van de metingen? Hier stoten we weer op vragen over wat een theorie is. Dit soort vragen mag niet gebagatelliseerd worden. Het zijn eeuwenoude problemen in de geschiedenis en filosofie van de natuurwetenschappen. Als we bijvoorbeeld de uitrekking van een veer meten dan kunnen we onder zekere veronderstellingen een rechte lijn tussen de punten trekken. Dat is al een theorie: veralgemenisering van de metingen. Daarna kunnen we die lijn door een formule beschrijven, de wet van Hooke. De leerlingen gaan dan inzien dat een formule niets anders is dan een samenvatting onder zekere voorwaarden van een serie metingen. Zo kunnen we in dit onderdeel laten zien dat de wetkunde voor de natuurwetenschap een hulpmiddel is geworden voor het beschrijven en verkrijgen van gegevens. De leerlingen wijzen na het onderzoek het veertjes-model van lucht resoluut af, mede gezien de resultaten die ze gevonden hebben in de metingen. Wel zijn ze meer vertrouwd geworden met het denken in modellen. Het "bolletjesmodel" wordt steeds minder vreemd gevonden. Het was voor mij verfrissend te ervaren dat traditionele onderwerpen uit de natuurkundeleerstof (wet van Hooke en wet van Boyle) door een nieuwe insteek een andere rol in een cursus kunnen krijgen.

De apotheose

Na de voorlopige acceptatie van een deeltjesmodel gaan we in de klas aan de hand van proeven en discussies proberen eigenschappen van de deeltjes te ontdekken door aan te nemen dat alle proeven ermee verklaard kunnen worden. Zo komen we dan op snelheid, aantrekkingskracht, volkomen veerkrachtig botsen, afstoting op kleine afstand, enz. Tot slot voeren we een voor de leerlingen nieuw aspect in: we laten zien dat als je eenmaal een theorie hebt je die kunt gebruiken om onbekende dingen te voorspellen. Uit de afhankelijkheid van temperatuur en snelheid van de deeltjes volgt logischer wijze dat er een laagste temperatuur moet zijn (die waarbij de deeltjes stilstaan) maar dat er in principe geen hoogste temperatuur is. We hebben tevens verondersteld dat de druk van een gas veroorzaakt wordt door het botsen van de deeltjes tegen de wand. Deze twee veronderstellingen combinerend moeten we de laagste temperatuur (het absolute nulpunt) kunnen bepalen door de drukverlaging van lucht te meten bij temperatuurverlaging. We laten de leerlingen

dit zelf uitvoeren in het meetgebied van 0°C tot 100°C waarna ze hun metingen moeten extrapoleren tot ze bij druk 0 zijn. Het gemiddelde van de klas zit meestal maar een paar graden van -273°C af. Dit maakt steeds veel indruk op de leerlingen, zeker wanneer er iets bij verteld wordt over de strijd in het begin van deze eeuw (Kamerlingh Onnes e.a.) om het absolute nulpunt te benaderen.

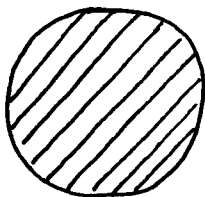
3. De flexibiliteit van het denken in modellen bij de leerlingen

Een voorbeeld

Door uitgebreid aandacht te besteden aan theorievorming en modelontwikkeling uit waarnemingen kweken we bij leerlingen een houding die bij andere onderwerpen, later in de cursus, steeds meer resultaat oplevert. Ik wil nu aan een voorbeeld laten zien hoe creatief de leerlingen het denken in modellen kunnen toepassen. Het gekozen voorbeeld komt uit de scheikundelessen, maar zou evengoed vervangen kunnen worden door voorbeelden uit de electriciteitsleer of atoomfysica.

Het vormen van scheikundige verbindingen

We waren met scheikunde bezig toen de vraag opdook hoe we ons moleculen samengesteld konden denken uit atomen (atomen ingevoerd als moleculen van elementen, de niet verder ontleedbare stoffen). We hadden ontdekt dat koper en chloor samen de stof koperchloride kunnen vormen en dat deze stof weer in koper en chloor ontleed kan worden. Op het bord stonden de volgende symbolen, die de atomen koper en chloor moesten voorstellen:

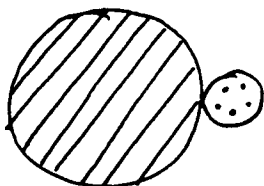


koper



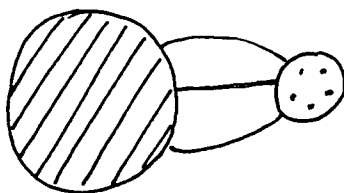
chloor

Aan de leerlingen de opdracht om te bedenken hoe een koperchloride molecuul er uit kon zien. Toen ik dit voor het eerst deed, leek het me een eenvoudige vraag, met een tamelijk vanzelfsprekend antwoord. Ik verwachtte iets als:



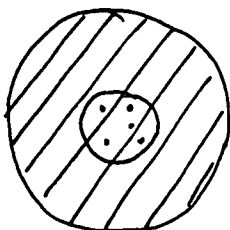
I

of



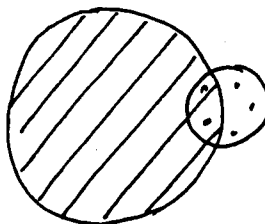
II

Deze voorstellingen verschenen inderdaad, maar ook de volgende:



III

en



IV

waarbij het ene atoom geheel of gedeeltelijk in het andere zit (gewoon door elkaar heen!)⁴). Bij II gaven de leerlingen bovendien als uitleg dat de atomen elkaar met een soort armen vasthielden. Het in elkaar zitten van de atomen (III en IV) vonden de leerlingen een heel vanzelfsprekende mogelijkheid, maar het duurde wel even voor ze het me zo hadden uitgelegd dat ik het ook begreep! Het bleek toen dat ze een atoom helemaal niet noodzakelijkerwijs zien als harde bollen, maar het zich ook kunnen voorstellen als een soort diffuse materie. Bij reacties zouden dan volgens hen andere eigenschappen naar voren treden dan bij de thermische beweging. Onafhankelijk van elkaar kwam dit molecuulbeeld een paar achtereenvolgende cursusjaren bij leerlingen tevoorschijn⁵).

Dat leerlingen helemaal aan het begin van de scheikunde al dergelijke modellen bedenken laat zien dat ze zich erg vrij voelden ten opzichte van de modellen die we eerder voor moleculen gebruikt hadden, vrij genoeg om ervan af te wijken als het niet strikt noodzakelijk was om het oude model te gebruiken.

4. Algehele terugblik op de beschreven methode

De transfer van het ontwikkelde modelbegrip

De ontwikkelde denkwijze en de voorstellingen die de leerlingen nu gewend zijn zich te maken van onzichtbare modellen blijven goed functioneren. Als we de klassieke proeven doorlopen die aan de wieg hebben gestaan van de vorming van ons moderne atoombeeld, blijken de leerlingen zich daar snel in te kunnen inleven. Een meisje, dat beslist niet tot de beste leerlingen behoorde, vertelde me aan het eind van het onderwerp over kernenergie: "Vroeger was ik erg bang voor alles wat met atomen te maken had, ik was er daarom erg tegen. Nu heb ik gezien dat het eigenlijk heel gewone dingen zijn, ik ben er helemaal niet meer bang voor". Deze uitspraak laat zien hoe diep deze onderwerpen zijn aangeslagen, het is niet meer ervaren als een puur schools leeronderwerp maar het heeft veel dieper iets teweeggebracht. Dat was in de klas niet alleen het geval bij dat ene meisje. Het was goed dat de angst verdween, het was per slot van rekening angst voor het onbekende. De gevolgen van straling voor het leven waren nog niet behandeld. Dat kwam in het volgende onderwerp, erfelijkheid, naar voren. Daarbij leverde de verworven denkmethode eveneens winst op. Nu zag het meisje ook wat voor fundamentele gevolgen bestraling voor een celkern kan hebben. Opnieuw wijzigde zich haar kijk op "atomen", maar op grond van een behoorlijk inzicht kon ze nu beargumenteren waarom ze ergens voor of tegen was.

De waarde van de methode

De uitspraak van het hiervoor geciteerde meisje geeft voor mij een deel van de waarde van de cursus aan. Andere aspecten zijn dat, na een zekere gewenningsperiode, nagenoeg alle leerlingen gedurende het hele jaar enthousiast bleven. Dat was te merken aan de inzet in de klas en aan het geleverde werk dat steeds van hoge kwaliteit was. Met name de meisjes sprak het geheel erg aan. (In de bovenbouw HAVO-VWO van de OSB kiezen al jarenlang ongeveer evenveel meisjes als jongens voor de exacte vakken.) Ik vermoed dat vooral het zichtbaar worden van natuurwetenschap als menselijke en culturele activiteit het succes van de cursus bepaalde. De lijnen die we in de leerstof hebben aangebracht blijken heel flexibel te kunnen worden toegepast. Als nieuwe onderwerpen actueel worden, kunnen ze heel gemakkelijk in het programma gevoegd worden. Deze hoofdlijnen en de

gevolgde werkwijze in de klas blijken gedurende een lange periode leerlingen nog steeds aan te spreken. Collega's uit de drie natuurwetenschappelijke richtingen blijken op deze basis goed te kunnen werken, als ze de bereidheid en gelegenheid hebben zich bij te scholen in hen onbekende of minder vertrouwde onderwerpen (zie het nawoord bij het eerste artikel). Ik durf daarom te concluderen dat we een curriculum ontwikkeld hebben dat bruikbaar is voor de meeste docenten die de geformuleerde uitgangspunten onderschrijven⁶⁾.

Knelpunten

Behalve de in het eerste artikel genoemde moeilijkheden voor docenten bij voorbereiding en uitvoering van het programma zijn er nog andere problemen te signaleren.

a. In het vierde jaar

Het is niet voor alle docenten, leerlingen en scholen vanzelfsprekend om op de hiervoor geschetste manier met een klas en met de leerstof om te gaan. Er zijn voorwaarden nodig, waaraan in de klas bewust gewerkt moet worden, wil men een open en vrije meningsvorming en waardering daarvan door de leerlingen bereiken. Een aantal daarvan zijn volgens mij:

- De leerlingen moeten zich vrij kunnen uiten,
- Er mag geen angst heersen om fouten te maken of door klasgenoten uitgelachen te worden
- De leerlingen moeten eraan gewend zijn hun eigen ervaringen onder woorden te brengen
- En niet alleen maar geleerd hebben datgene te reproduceren wat in een boekje staat of door de leraar gezegd is
- De sfeer in de klas zal een onderzoekende houding mogelijk moeten maken

Dit zijn voorwaarden die een docent alleen nauwelijks of niet kan realiseren. Het wordt mede door de sfeer van een school bepaald in hoeverre deze voorwaarden aanwezig zijn. Die sfeer wordt door alle medewerkers samen gecreëerd. Desondanks zullen ze nooit in de ideale vorm bij alle leerlingen en in iedere klas aanwezig zijn. Soms duurt het lang voordat in een klas een voldoende veilige sfeer heerst. De gevolgde werkmethode helpt er evenwel ook aan mee deze voorwaarden verder te ontwikkelen. Voor sommige leerlingen die een hekel hebben aan schrijven en tekenen is de gevolgde werkmethode minder stimulerend.

Bij de traditionele natuurkunde komen die leerlingen soms beter aan hun trekken. Dit blijkt bij mij per jaar hoogstens voor een enkele leerling te gelden.

b. In de vervolgjaren

Eén van de grootste problemen tekende zich af in het jaar nadat de leerlingen natuurhistorische oriëntatie hadden gevolgd. Vooral bij natuurkunde vroeg de voorbereiding op het HAVO of VWO examen een heel andere werkhouding dan waarvoor de leerlingen enthousiast waren geworden. De examenstof werd met name door meisjes als levenloos ervaren, de problemen waaraan gewerkt moest worden ervoeren ze niet als hun problemen. Een aantal leerlingen raakten gedemotiveerd en konden de concentratie en nauwgezetheid die nodig zijn voor een examenvoorbereiding niet meer opbrengen. Hiermee samenhangend diende zich een tweede probleem aan: bij natuurkunde kwam de examenvoorbereiding in de vijfde en zesde klas in de knel. Naast de motivatieproblematiek werd dit onder andere veroorzaakt doordat de bij dit vak benodigde koppeling tussen wiskunde en praktijk er in het hier beschreven programma bekaaid van af kwam. Na een aantal jaren is als noodoplossing natuurkunde weer als apart vak in het vierde jaar gekomen. Een aantal onderdelen die specifiek natuurkundig waren zijn toen uit het programma van natuurhistorische oriëntatie gehaald. Ik schrijf uitdrukkelijk "nood-oplossing", omdat hiermee het programma, volgens iedereen die ermee gewerkt had, geamputeerd werd. Het blijft de bedoeling te zoeken naar oplossingen waardoor aan de ene kant voldoende tijd wordt gevonden voor examen-voorbereiding, aan de andere kant het programma van natuurhistorische oriëntatie weer in ere hersteld kan worden. Het ziet er naar uit dat dit binnenkort kan gebeuren. De ontwikkelingen in het wiskunde-onderwijs helpen hierbij een handje. Mijn verwachting is dat de natuurwetenschappen ook de vruchten van het wat "praktischer" worden van de wiskunde gaan plukken.

5. Conclusie

De ervaringen opgedaan met natuurhistorische oriëntatie wijzen er duidelijk op dat veel leerlingen van 15-16 jaar, waaronder met name meisjes, enthousiast kunnen worden voor de wat filosofischer kanten van de natuurwetenschappen. Dit aspect verdient een plaats in het onderwijs te krijgen, ook omdat blijkt

dat leerlingen er aanknopingspunten bij vinden voor vragen waar ze zelf in hun leven mee bezig zijn. Het moet niet moeilijk zijn daar plaats in de leerplannen voor te vinden. Er worden immers helaas nog teveel onderwerpen en vaardigheden voorgeschreven die veel leerlingen niet kunnen boeien. Dat het kiezen voor gemotiveerdheid van leerlingen als uitgangspunt van onderwijs niet een vlucht hoeft te zijn naar "gemakkelijker stof" of "oppervlakkige popularisaties" heeft mij het hiervoor beschreven programma wel bewezen. Zowel bij de opzet van de basisvorming als bij het ontwikkelen van eindexamenprogramma's voor het voortgezet onderwijs moeten stimulering en motivatie uitgangspunten zijn. Alleen wat leerlingen werkelijk aangrijpt zal hen ook verder in hun leven bijblijven.

Noten

1. Na het gereedkomen van de eerste versie dit manuscript verscheen een interessant artikel van Van Oers (1988) over "Modellen en de ontwikkeling van het (natuur) wetenschappelijk denken van leerlingen". (Gebaseerd op zijn dissertatie, 1987).
Het is frappant om te zien hoe hij, uitgaande van recente onderwijskundige literatuur, in veel opzichten tot dezelfde criteria komt ten aanzien van het onderwijs in de natuurwetenschappen als in mijn artikel beschreven worden. Vermeldenswaardige overeenkomsten zijn:
 - Onderwijs in natuurwetenschappen als cultuur-historische activiteit
 - Discussiëren over persoonlijke modellen als didactische imitatie van het wetenschappelijk denken
 - Uitgaan van door de leerling en leraar gesproken of geschreven teksten
 - Probeer een continue ontwikkelingsgang te realiseren tussen het eigen model van de leerling en het wetenschappelijke (canonieke) modelEveneens realiseert hij zich hoe belangrijk de psychologische (en sociale) voorwaarden zijn waaronder het leerproces verloopt en dat er niet op snelle resultaten gemikt kan worden maar dat we voor de ontwikkeling van het natuurwetenschappelijk denken van leerlingen een gehele schoolloopbaan in beschouwing moeten nemen. De cursus "Natuurhistorische oriëntatie" heeft in ieder geval mij laten zien dat deze criteria geen onderwijskundige utopie hoeven te blijven maar realiteit kunnen worden.
2. Hoe het vuur-aarde-water-lucht model mensen aanspreekt blijkt wel uit het feit dat het in de medische wereld zeker tot in de zeventiende eeuw is blijven spelen (Beukers, 1982).
3. De oude elementenleer is strikt genomen geen model in de moderne betekenis, maar een overgangsvorm tussen mythologie en modern wetenschappelijk

- denken. In het verleden hebben filosofen ook verschillend gewerkt met het vuur-aarde-waterlucht model. (Dijksterhuis, 1950, I: 26-29) Het gaat er echter niet om dat de leerlingen het Griekse denken hierover leren maar dat de denkwijze hun wordt aangereikt als middel om het eigen denken te oefenen.
4. De Vos heeft eveneens een dergelijke opdracht aan zijn leerlingen gegeven. Bij hem komen de leerlingen tot eenzelfde soort voorstellingen als bij mij, ook de in elkaar zittende cirkels worden door hem vermeld (De Vos, 1985 p.77).
 5. Bij dit worstelen met een ruimtelijk beeld van de moleculen en atomen bevinden de leerlingen zich weer in goed gezelschap. Niet alleen in de oudheid en in de modernste natuurkunde werd en wordt dit probleem aangesneden, zelfs in de vorige eeuw kon iemand als Faraday zich niet voorstellen dat atomen kleine harde bolletjes waren. Hij dacht niet alleen ieder atoom doordringbaar, maar stelde zich zelfs voor dat ieder atoom zich tot in het oneindige uitstrekt. Faraday, 1844 (Reprint 1983)
 6. Dat geldt niet alleen voor Nederlandse scholen. In een onderzoek van Nielsen (1987) naar thema's waar leerlingen in het begin van de bovenbouw bij natuurkunde meer van zouden willen weten, komen ondubbelzinnig atoomfysica, radio-activiteit, sterrenkunde/cosmologie en moderne technologie als onderwerpen naar voren.

Literatuur

- Bernal, J.D. (1971) *De wetenschap als maatschappelijk proces, I*, Utrecht: Het Spectrum.
- Bertels, K. & D. Nauta (1969) *Inleiding tot het modelbegrip*, Amsterdam: Wetenschappelijke Uitgeverij.
- Beukers, H. (1982) Mechanistische principes bij Franciscus Dele Boe, Sylvius, *Tijdschrift voor de geschiedenis der geneeskunde, natuurwetenschappen, wiskunde en techniek, 1*, 6-15.
- Dijksterhuis, E.J. (1975) *De mechanisering van het wereldbeeld*, Amsterdam, Meulenhoff.
- Faraday, M. (1844) Herdrukt in *Die Kräfte der Natur*, (1983) Bad Salzdetfurth, BRD: Verlag Barbara Franzbecker.
- Genseberger, R.J. (1982) Leren van leerlingen, *Faraday, 51*, 1-3.
- Genseberger, R.J. (1989) Natuurhistorische oriëntatie, *Tijdschrift voor didactiek der β -wetenschappen, 7*, 138-153.
- Hondebrink, J.G., (1988) Batterijen, moleculen en atomen, Cambridge, *NVON-maandblad, 3*, 82-84.
- Joy, L.S., (1987) *Gassendi the Atomist*, Cambridge: University Press.

- Levi-Strauss, C. (1968) *Het wilde denken*, Amsterdam:Meulenhoff.
- Needham, J. (1934) *A History of Embryology*, Cambridge: University Press.
- Nielsen, H. & P. Thomsen, (1987) Krise im Physikunterricht
Hildesheim, *Physica Didactica*, 3, 31-38.
- Oers, B. van (1987) *Activiteit en begrip*, Amsterdam.
- Oers, B. van (1988) Modellen en de ontwikkeling van het (na-
tuur-)wetenschappelijk denken van leerlingen, *Tijdschrift voor
Didactiek der β -wetenschappen*, 6, 115-143.
- Rumpf, H. (1987) *Rede an der Martin-Wagenschein Tagung*,
Goldern, Schweiz: Ecole d'Humanite.
- Schierbeek, A., (1950) *Antoni van Leeuwenhoek*, Lochem: De
Tijdstroom.
- Vos, W. de, (1985) *Corpusculum Delicti*, Utrecht.
- Wagenschein, M. (1971) *Die pädagogische Dimension der Physik*
Braunschweig: Westermann Verlag.