

Inzichtelijk een deeltjesmodel leren

Marjolein Vollebregt, Kees Klaassen, Rupert Genseberger en Piet Lijnse
CD β , Natuurkundendidactiek
Universiteit Utrecht

Summary

In this paper we present a problem-posing approach to teaching an initial particle model. The main point of a problem-posing approach is to so direct the teaching-learning process at a content specific level, that the scientific knowledge to be learned by pupils is as much as possible developed by their own reasoning and accepted on grounds that they understand. In our opinion, the disappointing results of both traditional and more innovative approaches to teaching the topic of particle models, is due to their failure to properly involve pupils in why these models are as they are, and in particular in why which properties are to be ascribed to particles and which not. This might explain pupils' lack of understanding both of the content and of the nature and development of particle models.

We consider as the most basic characteristic of particle models the attempt to ultimately explain all change as motion, i.e., as changes of position and velocity of invariant particles due to their mutual interactions. We sketch an outline of how, starting from what they know about the macroscopic behaviour of matter, pupils can be involved in a process in which they gradually, and more and more explicitly, come to appreciate these two basic aspects of invariance and continuing motion of the particles.

The paper continues with a brief presentation of the evaluation of our approach. Concerning the content of the particle model, it is concluded that the aims are reasonably well attained, and some suggestions for improvement are given. Concerning the nature and development of particle models, we think to have at least brought pupils to the point where it might have been useful and fruitful for them to explicitly discuss these matters. In our opinion, the latter finding is more broadly relevant in connection with a meaningful inclusion of skills into the science curriculum.

Inleiding

Kennis over de bouwstenen der materie neemt in veel natuurwetenschappen een belangrijke plaats in. Bovendien spelen modellen in het algemeen een grote rol in wetenschap en samenleving, en wordt het proces van modelleren door wetenschappers beschouwd als een vruchtbare manier om vooruitgang te boeken bij het oplossen van problemen en het ontwikkelen van nieuwe inzichten. Het is dan ook niet verwonderlijk dat een belangrijk deel van het bè-tacurriculum te maken heeft met deeltjesmodellen.

Vakdidactisch onderzoek heeft echter laten zien dat onderwijs over deeltjes vaak niet voldoet aan de verwachtingen. Zo is bijvoorbeeld gerapporteerd, op grond van de manier waarop leerlingen een onderwezen deeltjesmodel toepassen, dat veel leerlingen macroscopische eigenschappen toekennen aan moleculen en atomen: deze kunnen uitzetten, smelten, verbranden, en kunnen zacht zijn, of vloeibaar, gekleurd, etc. (zie b.v. Brook *et al*,

1983; de Vos & Verdonk, 1987). Daarnaast lijken sommige onderwezen aannames door leerlingen op een ongewenste manier geïnterpreteerd te worden: de deeltjes zijn niet voortdurend in beweging of de ruimte tussen de deeltjes is niet leeg (Novick & Nussbaum, 1978; Anderson, 1990). Uit hun uitspraken over de aard van modellen lijkt naar voren te komen dat weinig leerlingen het hypothetische karakter van modellen begrijpen. Tekeningen van deeltjes worden bijvoorbeeld letterlijk opgevat (Klaassen *et al*, 1990; Griffiths & Preston, 1992). Bovendien lijken veel leerlingen niet te begrijpen dat een model gaandeweg ontwikkeld wordt, dat er in dat proces uit meerdere hypotheses gekozen kan worden en dat toepassingen van het model kunnen leiden tot aanpassing van de aannames (Grosslight *et al*, 1991).

Een verklaring voor bovenstaande resultaten wordt in de vakdidactische literatuur soms gezocht in het bestaan van hardnekkige misconcepties over moleculen en atomen. In onderwijsstrategieën die op een dergelijke verklaring gebaseerd zijn, worden leerlingen gestimuleerd om deze veronderstelde misconcepties te expliciteren en te vergelijken met ideeën van anderen, waarna wordt geprobeerd om hen via conflictsituaties te laten zien dat hun eigen ideeën niet goed zijn (CLISP, 1987). Meerdere onderzoekers hebben er echter recentelijk op gewezen dat de uitspraken van leerlingen wel eens verkeerd geïnterpreteerd zouden kunnen zijn (b.v. Johnson & Gott, 1996), en dat er veel minder mis is met de concepties van leerlingen dan werd aangenomen (b.v. Klaassen, 1995). Zo zijn uitspraken van leerlingen over moleculen en over de aard van modellen naar onze indruk veeleer het gevolg van onderwijs dan van vooraf aanwezige, hardnekkige misconcepties. Het is immers redelijk om te veronderstellen dat leerlingen, voorafgaand aan onderwijs, bij "deeltjes" helemaal niet aan de moleculen of atomen van natuurwetenschappers denken, maar veeleer aan hele kleine stukjes stof. Die kleine brokjes kunnen weliswaar zo klein zijn dat ze niet zichtbaar zijn, maar gedragen zich verder op dezelfde manier als macroscopische hoeveelheden van de stof. In het vervolg zullen we deze deeltjes, die dus qua grootte microscopisch en qua gedrag macroscopisch zijn, 'macro-deeltjes' noemen. De ideeën die ze daarover hebben, zijn grotendeels correct: macro-deeltjes kunnen inderdaad uitzetten, smelten, verbranden, etc. Omdat in het onderwijs vervolgens te weinig duidelijk wordt wat de verschillen zijn tussen dergelijke macro-deeltjes en moleculen, worden leerlingen onbedoeld gestimuleerd om macro-deeltjes "moleculen" te noemen. Dit leidt dan tot veel voorkomende misconcepties over "moleculen", zoals de gedachte dat moleculen net zo veranderen als de macroscopische hoeveelheid stof of dat de moleculen van een vaste stof niet bewegen. Volgens onze analyse, kortom, zijn de genoemde onderzoeksresultaten te verklaren doordat het leerlingen in onderwijs niet duidelijk wordt dat het bij de moleculen en atomen van natuurwetenschappers om een ander soort deeltjes gaat dan macro-deeltjes. Naar onze indruk zal leerlingen dat ook niet duidelijk worden bij de door CLISP toegepaste conflictstrategie. Wat daar volgens ons in feite gebeurt, is dat leerlingen eerst gestimuleerd worden om allerlei ideeën over macro-deeltjes te ontwikkelen, en dat deze vervolgens geëvalueerd worden.

In andere benaderingen wordt daadwerkelijk een poging gedaan om bij leerlingen een ander soort deeltjes te introduceren (Meheut *et al*, 1990; Séré, 1992; de Vos, 1992), namelijk door vrij expliciet een deeltjesmodel te introdu-

ceren waarin aangenomen wordt dat de deeltjes eigenschappen hebben die duidelijk afwijken van de eigenschappen van macroscopische hoeveelheden van de stof, en dus ook van die van macro-deeltjes. Bijvoorbeeld: de geïntroduceerde deeltjes zijn onveranderlijk en in voortdurende beweging, alle moleculen van één stof zijn identiek, etc. Een probleem bij deze benaderingen is naar onze indruk echter dat zulke aannames min of meer geponeerd worden, zonder leerlingen deelgenoot te maken van het hoe en waarom ervan. Hierdoor is er een grote kans dat deze aannames toch anders worden geïnterpreteerd en/of dat de manier van presenteren leidt tot verkeerdheid van het model

Om te bereiken dat leerlingen het hypothetische karakter van een deeltjesmodel beter gaan begrijpen, wordt in sommige benaderingen expliciet aandacht besteed aan de manier waarop een model ontwikkeld wordt voordat leerlingen zelf een model gaan ontwikkelen. Impliciet wordt ervan uit gegaan dat leerlingen eerst bepaalde modelleervaardigheden moeten aanleren en oefenen, voordat ze de aard van een deeltjesmodel kunnen bevatten. Dit gebeurt dan echter vaak geheel los van de inhoud van het deeltjesmodel, bijvoorbeeld met een verhaal over het oplossen van een misdrijf (CLISP, 1987; DBK, 2h/v, 7e druk). Hierdoor bestaat de kans dat het oefenen in modelleren voor leerlingen weinig te maken heeft met het uiteindelijke deeltjesmodel dat ze leren, zeker wanneer vervolgens de redenen voor bepaalde aannames onduidelijk blijven. In andere benaderingen wordt nadrukkelijk vermeden om leerlingen welke representatie dan ook van moleculen en atomen te geven, om te voorkomen dat deze letterlijk worden opgevat en om leerlingen een bepaalde mate van onzekerheid te laten ervaren (de Vos, 1992). Wanneer echter nadrukkelijk door de docent wordt gesteld dat de deeltjes geen kleur en geen volume hebben (Buck, 1987) en daarom niet zichtbaar zijn, is er voor leerlingen in feite geen sprake meer van enige onzekerheid en wordt het hypothetisch karakter juist weer tenietgedaan.

Naar onze mening ligt de verklaring van de teleurstellende resultaten van onderwijs over deeltjesmodellen noch in het bestaan van hardnekkige misconcepties over atomen, moleculen of de aard van modellen noch in het ontbreken van modelleervaardigheden, maar veeleer daarin dat leerlingen in veel gangbaar onderwijs te weinig inhoudelijk betrokken worden bij de te leren kennis. Het blijft voor leerlingen bijvoorbeeld grotendeels onduidelijk waarom er wordt aangenomen dat de deeltjes voortdurend bewegen, waarom er wordt verondersteld dat er lege ruimte tussen is, en waarom ervan wordt uitgegaan dat de deeltjes zelf niet veranderen (zie ook Maskill & Pedrosa de Jesus, 1997 a/b). Of in meer algemene termen: het is voor leerlingen onduidelijk op welke inhoudelijke gronden welke eigenschappen toegekend worden aan deeltjes en welke niet. Volgens ons geldt dit in feite ook bij de alternatieve benaderingen die we hierboven kort aangestipt hebben, wat zou kunnen verklaren dat die benaderingen niet tot echt veel betere resultaten hebben geleid. Op basis van deze verklaring hebben wij een nieuwe aanpak ontwikkeld voor het onderwijzen en leren van een deeltjesmodel. In dit artikel wordt deze aanpak verantwoord en wordt kort besproken wat daarmee bereikt is. Tenslotte wordt gereflecteerd op enkele algemene kenmerken van deze benadering die ook bruikbaar zouden kunnen zijn bij het ontwerpen van onderwijs over andere natuurwetenschappelijke onderwerpen of meer algemene on-

derwerpen als 'de aard van natuurwetenschappen', en ook bij het inbouwen van vaardigheden in het bètacurriculum.

2. Doelen

Met onze aanpak willen we bereiken dat leerlingen inzicht krijgen in zowel inhoud als aard van een aanvankelijk deeltjesmodel. Wat betreft de ten doel gestelde inhoud sluiten we ons aan bij wat gangbaar als eerste deeltjesmodel in natuur- en scheikunde-onderwijs nagestreefd wordt (zie ook de Vos & Verdonk, 1996). De twee belangrijkste aspecten van dit model zijn, naar onze mening, dat de deeltjes zelf onveranderlijk zijn en dat ze voortdurend bewegen. Daarin ligt ook het essentiële verschil met hele kleine brokjes van een stof, d.w.z., met macro-deeltjes. Bovendien zijn deze twee aspecten gekoppeld. Als de deeltjes onveranderlijk verondersteld worden, kunnen macroscopische veranderingen immers alleen nog maar verklaard worden in termen van veranderingen in plaats en beweging van de deeltjes (ten gevolge van bijvoorbeeld elastische botsingen en onderlinge aantrekkingskrachten). Invariantie van de basisbestanddelen, kortom, impliceert dat alle verandering uiteindelijk beweging is. Gegeven deze twee aspecten, bestaat een deeltjesmodel uit een specificatie van twee soorten hypothesen: betreffende de interacties tussen de deeltjes en betreffende de correspondentie met bepaalde macroscopische grootheden.

In wat meer detail, streven we wat betreft de hypothesen over interacties na:

- dat de deeltjes volkomen elastisch botsen;
- dat de deeltjes bewegen in lege ruimte (dus alleen wisselwerken met andere deeltjes);
- dat de deeltjes aantrekkende krachten op elkaar uitoefenen die afnemen met het toenemen van de onderlinge afstand.

Wat de hypothesen over de correspondentie tussen modelvariabelen en macroscopische grootheden aangaat, streven we (wellicht wat explicieter dan gangbaar gebruikelijk) het volgende na:

- de relatie tussen de macroscopische hoeveelheid materie en het aantal deeltjes;
- de relatie tussen de macroscopische massa en de som van de massa's van de deeltjes;
- de relatie tussen het macroscopische volume en de ruimte waarin de deeltjes bewegen;
- de relatie tussen de macroscopische druk en de som van de krachten (per oppervlakte-eenheid) die de deeltjes door botsingen uitoefenen;
- de relatie tussen de macroscopische temperatuur en de gemiddelde kinetische energie van de deeltjes.

Behalve dat leerlingen het bovenstaande model leren begrijpen en toepassen, streven we ook na dat ze enig inzicht ontwikkelen in de aard van dit model en in de manier waarop het tot stand gekomen is. Daarmee bedoelen we bijvoorbeeld:

- dat leerlingen begrijpen voor welk doel het model wordt ontwikkeld en waarom bepaalde aannames zijn verkozen boven andere;
- dat ze verwachten dat het model in de toekomst waarschijnlijk verder aangepast zal moeten worden om bijvoorbeeld nog meer verschijnselen te kunnen verklaren;

- dat ze inzien hoe indirecte bewijsvergaring invloed heeft op de mate waarin aan het model of aan het bestaan van de deeltjes gehecht wordt. Dit lijkt enigszins op wat Driver *et al* (1996) en Leach (1996) "model-based reasoning" noemen, en Grosslight *et al* (1991) "level 3 understanding". Kortweg, "an awareness that theories are conjectural, and that enquiry involves the evaluation of theories or conjectures in the light of evidence" (Leach, 1996, p.276).

3. Aanpak

Uit de inleiding zal duidelijk geworden zijn dat het didactisch probleem waarvoor we ons binnen onze aanpak geplaatst zien, ruwweg als volgt geformuleerd kan worden: leerlingen inhoudelijk betrekken bij de ontwikkeling van een proces dat uiteindelijk leidt tot bovengenoemde doelen. Wat de inhoud van het deeltjesmodel betreft, is daarvoor allereerst nodig dat leerlingen, uitgaande van wat ze al weten op het macroscopische niveau, goede inhoudelijke redenen ontwikkelen om een nieuw soort deeltjes, anders dan macrodeeltjes, in beschouwing te nemen. Daartoe wordt een basismodel geïntroduceerd, waarbij het aspect van beweging al wel expliciet genoemd wordt, maar waarbij het voortdurende karakter van die beweging alsmede het aspect van invariantie nog impliciet gelaten worden. De reden daarvoor is dat we wel activiteiten hebben kunnen bedenken die het voor leerlingen aanvankelijk zinvol maken om bewegende deeltjes in beschouwing te nemen (zie hieronder bij "Theoretische oriëntatie en de introductie van een basismodel"), maar dat het ons niet goed mogelijk lijkt activiteiten te bedenken die het voortdurende karakter en het aspect van invariantie aanvankelijk plausibel voor hen maken. In plaats daarvan proberen we deze zaken te bereiken bij de verdere ontwikkeling van het basismodel (zie hieronder bij "Modelleren"). In dit proces proberen we leerlingen inzicht te laten ontwikkelen in de aard en totstandkoming van het model, door hen werkelijk actief te betrekken bij het modelleren (zie hieronder bij "Aard en totstandkoming van het ontwikkelde model").

Theoretische oriëntatie en de introductie van een basismodel (cf. Vollebregt, 1998: §4.2-3)

In de natuurwetenschappen worden deeltjesmodellen vaak ontwikkeld door te proberen bekend macroscopisch gedrag van materie beter te gaan begrijpen, om dan vervolgens met behulp van zo'n model nog onbekend gedrag van materie te voorspellen. Hierdoor geïnspireerd, hebben we geprobeerd leerlingen in een zodanige positie te brengen dat zij het allereerst zinvol gaan vinden om reeds bekende wetmatigheden in het macroscopisch gedrag van materie beter te gaan begrijpen met behulp van een model van bewegende deeltjes. We noemen een dergelijk globaal motief in het vervolg een theoretische oriëntatie.

Om deze specifieke theoretische oriëntatie bij leerlingen op te roepen, laten we hen reflecteren op eerdere voortgang in hun natuurkundige kennis. In het bijzonder worden gevallen naar voren gehaald waarbij voortgang geboekt werd,

- door bij reeds gevonden wetmatigheden de vraag te stellen waarom die zijn zoals ze zijn om zo tot steeds algemenere of preciezere regelmatigheden te komen (b.v. een voortgang van 'hout drijft op water', 'staal drijft

op kwik', etc., naar 'iets van lagere dichtheid drijft op iets van hogere dichtheid')

- door het gedrag van iets te vergelijken met iets anders (door b.v. een model voor luchtdruk op te stellen dat geïnspireerd is door een reeds beproefd model van waterdruk).

Vervolgens wordt hun aandacht gericht op hen bekend wetmatig gedrag van gassen en bedenken ze hieromtrent vragen die nog onbeantwoord zijn gebleven (b.v. waarom een gas naar alle kanten druk uitoefent). Daarop introduceert de docent in vergelijkende zin een simpel basismodel, als volgt: zouden we die vragen kunnen beantwoorden wanneer we ons voorstellen dat een gas zich net zo gedraagt als een collectie kris-kras door elkaar bewegende bolletjes. Om twee redenen wordt hierbij begonnen met wetmatig gedrag van gassen. De eerste is dat het te introduceren basismodel direct plausibel is voor het beter begrijpen van met name de door gassen uitgeoefende druk: de bewegende deeltjes botsen tegen wanden hetgeen op macroscopisch niveau voelbaar is als druk. De tweede reden is dat aldus impliciet voorbereid wordt dat de geïntroduceerde deeltjes zich anders gedragen dan een macroscopische hoeveelheid. Ter verklaring van b.v. diffusie van vloeistoffen of vaste stoffen is een model van bewegende deeltjes weliswaar ook direct plausibel, maar in dat geval gedragen de deeltjes zich feitelijk niet anders dan de macroscopische hoeveelheid stof (beide verplaatsen zich). Bij gassen is het daarentegen zo dat die ook druk uitoefenen wanneer er geen macroscopische verplaatsing is, d.w.z., wanneer er geen stroming is.

Op deze manier mogen we verwachten dat leerlingen kunnen begrijpen waarom het zinvol is om dieper naar het gedrag van gassen te gaan kijken, en dat ze direct in kunnen zien dat een door de docent geïntroduceerd model van bewegende deeltjes daarbij goed van pas kan komen. Leerlingen hoeven hierdoor vanzelfsprekend nog niet heel erg gemotiveerd te raken om allerlei bekend gedrag van materie beter te gaan begrijpen, maar gaandeweg kan het hen wel gaan intrigeren dat het aldus steeds lukt om tot beter begrip te komen.

Modelleren (cf. Vollebregt, 1998: §4.4)

Wanneer we willen bereiken dat leerlingen het basismodel verder ontwikkelen in de richting van het model dat hierboven ten doel gesteld is, dan zullen vervolgvacaties zodanig ingericht moeten worden dat motieven worden opgeroepen om verdere hypothesen aan het model toe te voegen. Op basis van de literatuur mag verwacht worden dat met name hypothesen als het onveranderlijk zijn van deeltjes, het voortdurend bewegen van deeltjes (ook van de deeltjes van vaste stoffen), en het bestaan van lege ruimte tussen de deeltjes, voor leerlingen het meest problematisch zijn. Een goede reden om aan te nemen dat er lege ruimte tussen de deeltjes is (en dat de deeltjes elastisch botsen), ligt besloten in de hypothese dat de deeltjes voortdurend bewegen. Dat laatste is immers alleen mogelijk, wanneer er netto geen beweging verloren gaat door bijvoorbeeld wrijving met een substraat waar de deeltjes doorheen zouden moeten bewegen, of door onderlinge botsingen. Aangezien lege ruimte en volkomen elastische botsingen in de macroscopische wereld geen alledaagse zaken zijn, kan de stap naar dergelijke aannames voor leerlingen pas echt plausibel worden wanneer de deeltjes reeds wezenlijk verschillen van macro-deeltjes, en in het bijzonder dus de twee onderscheidende as-

pecten van invariantie en voortdurende beweging (in hun samenhang) voor hen al zinvol zijn geworden.

Zowel bij de ontwikkeling van het basismodel van bewegende deeltjes tot een model waarbij ook de invariantie van de deeltjes een plausibel aspect is, als ter voorbereiding op de aanname dat ook de deeltjes van vloeistoffen en zelfs van vaste stoffen voortdurend bewegen, is een belangrijke rol weggelegd voor de relatie tussen de temperatuur van een hoeveelheid gas en de gemiddelde kinetische energie van de deeltjes. In plaats van deze relatie, zullen leerlingen in eerste instantie geneigd zijn aan deeltjes een temperatuur toe te kennen die correspondeert met de macroscopische temperatuur van het gas (net zoals de door de deeltjes op een wand uitgeoefende kracht correspondeert met de macroscopische druk). We willen leerlingen dus goede redenen laten ontwikkelen om af te gaan zien van deze relatie, en zelfs om helemaal af te gaan zien van het toekennen van een temperatuur aan deeltjes. Hiertoe worden activiteiten aangeboden die hen stimuleren om verklaringen te genereren voor drukverhoging tijdens temperatuurstijging en voor warmtetransport:

- daarbij moet eerst duidelijk worden dat drukverhoging tijdens temperatuurstijging beter verklaard wordt door aan te nemen dat de deeltjes sneller gaan bewegen dan door aan te nemen dat de deeltjes bijvoorbeeld van massa of volume veranderen;
- waarna zich de vraag opdringt hoe de deeltjes dan sneller kunnen gaan bewegen: een temperatuurstijging op macroscopisch niveau vindt plaats via warmtetransport, maar wat gebeurt er op modelniveau dat zou kunnen verklaren dat de deeltjes sneller gaan bewegen?

Deze laatste vraag nu, kan op twee manieren begrepen worden, afhankelijk van wat op modelniveau aan de macroscopische temperatuur van het gas gekoppeld wordt: de temperatuur van de deeltjes of hun snelheid / kinetische energie. In het eerste geval wordt in feite gevraagd naar een mechanisme waarmee begrepen kan worden hoe warmer wordende deeltjes sneller gaan bewegen. In het tweede geval luidt de vraag: met welk mechanisme op het niveau van het model moeten we een macroscopisch verhittingsproces vergelijken, opdat als gevolg van dat mechanisme de gemiddelde snelheid van de deeltjes groter wordt? Op deze laatste vraag is een betrekkelijk eenvoudig antwoord te vinden in termen van impulsoverdracht, terwijl op de eerste vraag geen eenvoudig en plausibel antwoord gevonden kan worden.

Via reflectie op de diverse hypothesen en verklaringen die leerlingen in dit proces opstellen, en op de afwegingen en keuzes die ze daarbij gemaakt hebben, wordt het vervolgens mogelijk expliciet te maken,

- dat er goede redenen zijn om een verklaring van een macroscopisch verwarmingsproces in termen van deeltjes die zelf niet warmer of kouder worden te prefereren boven een verklaring waarin het toekennen van een temperatuur aan deeltjes een wezenlijke rol speelt;
- dat in alle tot dan toe gegeven verklaringen met het model de deeltjes zelf in feite steeds onveranderlijk zijn gebleven.

Bovendien kan dan een eerste begin gemaakt worden met een expliciete bespreking van de vraag in hoeverre invariantie een zinvolle aanname is, en welke eigenschappen nu wel en niet aan deeltjes toegekend moeten worden.

We mogen verwachten dat leerlingen op deze manier ook voldoende voorbereid worden om de stap te zetten naar het verklaren van bekend ge-

drag van vaste stoffen en vloeistoffen in termen van onveranderlijke, voortdurend bewegende deeltjes. De meest voor de hand liggende manier om die stap te maken is via warmtetransport (als zijnde het doorgeven van beweging) en faseveranderingen (die nu beschreven kunnen worden als veranderingen in een typische configuratie en bewegingstoestand van een systeem van onveranderlijke deeltjes).

Aard en totstandkoming van het ontwikkelde model (cf. Vollebregt, 1998: §4.5)

In de hierboven beschreven aanpak worden leerlingen, meer dan in gangbare methoden, actief betrokken bij het modelleerproces. Zij worden niet alleen in de gelegenheid gesteld om zelf een deel van het model te ontwerpen, maar er wordt ook naar gestreefd hen daadwerkelijk in staat te stellen om te beoordelen in hoeverre nieuwe hypothesen zinvol en productief zijn. Hiertoe wordt in de beginfase ruim aandacht besteed aan het doel waarvoor het model ingevoerd en verder ontwikkeld wordt, namelijk het beter begrijpen van bekende wetmatigheden in het macroscopisch gedrag van materie. Tevens worden leerlingen gestimuleerd om, ter verklaring van specifieke wetmatigheden, meerdere hypothesen te genereren en met elkaar te vergelijken en worden zij ertoe aangezet om expliciet te reflecteren op de aard van de deeltjes.

Naast deze actieve en bewuste betrokkenheid in het modelleerproces, zijn er in onze aanpak nog enkele andere aandachtspunten opgenomen met betrekking tot de aard van het model. Zo wordt er bijvoorbeeld, in vergelijking met andere methoden, meer expliciet stilgestaan bij de relaties tussen het model en macroscopische grootheden. Naast de relatie tussen de temperatuur van een object en de kinetische energie van de deeltjes worden ook meer voor de hand liggende relaties, zoals die tussen de hoeveelheid stof en het aantal deeltjes, expliciet verwoord. Later wordt hierop gereflecteerd om na te gaan hoe het geven van een verklaring met een deeltjesmodel in zijn werk gaat. Bovendien wordt het bestaan van de deeltjes bij de introductie van het basismodel in het midden gelaten (de introductie ging immers in vergelijkende zin: stel je eens voor dat een gas *zich net zo gedraagt als* een collectie bewegende bolletjes), zodat hierover enige onzekerheid blijft bestaan. Later wordt het, via reflectie op het nut van het model, interessant om na te denken over de mate van geloof in het bestaan van de deeltjes en over de vraag door welke ervaringen die mate van zekerheid wordt bepaald. In onze aanpak speelt daarbij het voorspellen en daadwerkelijk waarnemen van de Brownbeweging een belangrijke rol. In een later stadium moet het tevens mogelijk zijn om leerlingen te laten reflecteren op het modelleerproces zelf.

4. Wat is er met deze aanpak bereikt?

De hierboven beschreven aanpak is door ons nader uitgewerkt tot een concrete serie activiteiten. Deze lessenserie is uitgevoerd door een ervaren docent in een vierde klas HAVO/VWO. Op grond van een analyse hiervan, is de serie activiteiten bijgesteld en nogmaals door dezelfde docent in een nieuwe vierde klas uitgevoerd. Analyse van deze tweede ronde heeft het volgende opgeleverd.

Doelen (cf. Vollebregt, 1998: §6.4.2)

De gestelde doelen zijn in de tweede ronde redelijk goed bereikt. In vergelijking met de eerder besproken resultaten uit de literatuur, lijken de leerlingen

in onze benadering een model te hebben ontwikkeld waarin de deeltjes minder overeenkomsten vertonen met macro-deeltjes. Verder lijken ze een beter, maar nog steeds niet erg expliciet beeld te hebben van de aard van deeltjesmodellen.

Wat betreft de inhoud van het ten doel gestelde model, bleek de aanname van volkomen elastische botsingen voor leerlingen veel moeilijker te accepteren dan verwacht, terwijl de hypothese van lege ruimte tussen de deeltjes juist gemakkelijker werd geaccepteerd. Vooral de combinatie van elastische botsingen en onderlinge krachten bleek voor veel begripsproblemen te zorgen (vooral ten gevolge van ontbrekende mechaniekennis). Daarnaast vertoonden de uiteindelijke modellen van de leerlingen nog een te sterke relatie tussen de snelheid van de deeltjes enerzijds en de drie aggregatietoestanden in plaats van de temperatuur anderzijds. Het is nog onduidelijk gebleven in hoeverre dit werd veroorzaakt door een te sterke koppeling, op macroscopisch niveau, tussen de aggregatietoestanden en de temperatuur, of door een nog steeds te zwakke koppeling tussen de temperatuur van een hoeveelheid stof en de gemiddelde kinetische energie van de deeltjes. Verder bleek dat de onderlinge afstanden tussen de deeltjes van vloeistoffen te groot werden verondersteld in vergelijking met die tussen de deeltjes van gassen en van vaste stoffen. Dit werd waarschijnlijk veroorzaakt door een gebrek aan kennis over verschillen in volume van een bepaalde hoeveelheid stof in de drie aggregatietoestanden.

Wat betreft de aard van deeltjesmodellen en de manier waarop die tot stand komen, konden alle leerlingen aangeven voor welk doel zij het model hadden gebruikt en ontwikkeld: verschijnselen (gemakkelijker) verklaren, (meer) verschijnselen begrijpen, (beter) voorstellen hoe verschijnselen verlopen, of (gemakkelijker) problemen oplossen. Veel leerlingen gaven tevens aan dat zij daarbij voornamelijk de plaats en beweging van de deeltjes in beschouwing namen. Ook konden alle leerlingen uitleggen waarom zij bepaalde aannames wel of niet in het model hadden opgenomen. Bijna alle leerlingen verwachtten dat het model in de toekomst verder ontwikkeld zou moeten worden, maar slechts enkelen van hen konden in algemene zin uitleggen wat zo'n verdere ontwikkeling zoal in gang zou kunnen zetten en houden. Zowel op het bestaan van de deeltjes als op het geven van deeltjesverklaringen konden leerlingen goed reflecteren, maar dan alleen in specifieke gevallen. Het lukte hen nog niet om in meer algemene termen uit te leggen waardoor hun mate van zekerheid werd beïnvloed of hoe verklaringen met een deeltjesmodel gegeven worden.

Wat moeten we nu ten aanzien van het inzicht van leerlingen in de aard en totstandkoming van deeltjesmodellen concluderen? Laten we, om de gedachten te bepalen, eens de drie factoren beschouwen volgens welke Gros-slight *et al* (1991) 'level 3 understanding' karakteriseren: "First, the model is (...) constructed in the service of developing and testing ideas (...) Second, the modeller takes an active role in constructing the model, evaluating which of several designs could be used to serve the model's purpose. Third, models can be manipulated and subjected to tests in the service of informing ideas. Thus, they provide information within a cyclic constructive process". Wanneer we dit opvatten als een karakterisering van wat er tijdens een lessenserie over deeltjesmodellen zou moeten gebeuren, dan kunnen we zeggen dat het doel bereikt is. Wanneer we het echter opvatten als een beschrijving volgens

welke leerlingen *zelf*, in die algemene termen, wat er tijdens de lessenserie over deeltjesmodellen gebeurd is zouden moeten kunnen karakteriseren, dan is het doel niet bereikt.

Evaluatie van het onderwijsleerproces (cf. Vollebregt, 1998: hoofdstuk 5, §6.2-3, §6.4.3)

Uit een gedetailleerde inhoudelijke analyse van het onderwijsleerproces, hebben we geconcludeerd dat de inhoudelijke opbouw over het algemeen adequaat is. Verdere verbetering lijkt echter wenselijk op de volgende punten:

- het oproepen van de aanvankelijke theoretische oriëntatie;
- het stimuleren van leerlingen tot het vaststellen van de relatie tussen de temperatuur van een gas en de kinetische energie van de deeltjes;
- het voor leerlingen zinvol maken om op de algemene vorm van deeltjesverklaringen en op de onveranderlijkheid van de deeltjes te reflecteren.

Het eerste punt lijkt te wijzen op een structureel probleem met onze aanpak. Wat eraan schort is dat de hierboven geschetste theoretische oriëntatie niet echt een inhoudelijke oriëntatie op het te introduceren basismodel vormt. Leerlingen kunnen door die theoretische oriëntatie dan wel het idee krijgen dat de kennis die ze gaan ontwikkelen van een nog algemenere aard zal zijn dan wat ze al weten en bovendien in vergelijking met iets anders ontwikkeld zal worden, maar dat op zich geeft nog geen inhoudelijke indicatie van het soort van kennis dat ze gaan ontwikkelen. Bovendien lijkt het onwaarschijnlijk dat leerlingen het model, wanneer het geïntroduceerd wordt, onmiddellijk zullen herkennen als een overgang naar kennis van nog algemenere aard (vergelijkbaar met de overgang van b.v. 'hout drijft op water' en 'staal drijft op kwik' naar 'iets van lagere dichtheid drijft op iets van hogere dichtheid'). En ook de vergelijking van een gas met een collectie kris-kras bewegende bolletjes is toch heel anders dan wanneer een theorie over waterdruk model staat voor een theorie over luchtdruk (in welk geval er immers al een vermoeden bestond dat lucht zich wel eens net zo zou kunnen gedragen als water, wat dan in meer detail uitgezocht wordt).

Om een theoretische oriëntatie bij leerlingen op te roepen die wel inhoudelijk richting geeft, zien wij ondertussen een alternatieve aanpak (die we nog vorm moeten geven in concrete activiteiten, en daarna uittesten). Het lijkt ons dat we leerlingen een meer inhoudelijk motief kunnen verschaffen voor het te introduceren basismodel, door te appelleren aan de volgende twee basale intuïties met betrekking tot hun (en onze) kennis over macroscopische systemen (zie b.v. Harré & Madden, 1975, voor wat meer achtergrond bij deze intuïties):

- een grond waarop een wetmatigheid in het gedrag van bepaalde materie (b.v., koper is een geleider) onderscheiden wordt van een toevallige regelmatigheid (b.v., alle munten in zijn portemonnee zijn van koper), is een vermoeden dat de wetmatigheid dieper verklaard kan worden, dat er iets in de aard van die materie is dat maakt dat het zich op die wetmatige manier gedraagt (er is iets in de aard van koper dat verklaart dat het elektriciteit geleidt, maar er is niet iets in de aard van koper dat maakt dat alle munten in zijn portemonnee van koper zijn);
- het functioneren van een macroscopisch systeem (organisme; elektrisch-apparaat) kan vaak verklaard worden in termen van het functioneren van

- samenstellende deelsystemen (organen; weerstanden, condensatoren, ...), waarbij die samenstellende delen zich wezenlijk anders kunnen gedragen dan het systeem als geheel.

De combinatie van deze twee ingrediënten lijkt ons een zoektocht te kunnen motiveren naar een verklaring van het wetmatige gedrag van materie in termen van het gedrag van de samenstellende delen ervan, of ook: naar een verklaring van hoe materie werkt in termen van wat materie eigenlijk is. Dat de samenstellende delen zich anders gedragen dan het geheel, bereidt daarbij voor dat die samenstellende delen geen macro-deeltjes zijn.

Het tweede en derde punt hierboven lijken niet om structurele aanpassingen te vragen, maar betreffen veeleer aanpassingen in de vormgeving van concrete activiteiten. Het voert in het kader van dit artikel te ver om hier nader op in te gaan.

Middels vragenlijsten en interviews hebben we ook op een meer globaal niveau proberen te achterhalen wat de leerlingen en docent van de lessenserie vonden. Vergeleken met hun normale lessen, vonden de leerlingen dat ze actiever betrokken waren bij het verloop van deze lessen. Verder hadden ze het idee dat ze over het algemeen wisten waar ze mee bezig waren en waarom, en gaven ze aan dat als prettig te hebben ervaren. Op enkele punten, echter, vonden ze dat ze teveel in een bepaalde denkrichting waren gestuurd (bij het leggen van de relatie tussen de temperatuur van een gas en modelvariabelen), of dat ze de bedoeling niet goed begrepen hadden (de eerste activiteiten, die het oproepen van de theoretische oriëntatie betreffen). Dit is een bevestiging van probleempunten die bij de inhoudelijke analyse naar voren zijn gekomen, en die we ofwel door structurele aanpassingen ofwel door een gewijzigde vormgeving van activiteiten denken te kunnen ondervangen.

Via interviews met de docent, tijdens en na de eerste en de tweede ronde, is achterhaald welke aspecten van de lessenserie voor hem moeilijk hanteerbaar waren. Deze betroffen, bij beide rondes, het voorbereiden en uitvoeren van de lessen volgens het vastgestelde plan. De docent vond het met name moeilijk om goed te reageren op momenten waarop het proces in de klas te ver van het plan dreigde af te wijken. Verder werd in het bijzonder het hantieren van klassikale discussies als moeilijk ervaren. Over het geheel genomen was de docent positief over de ontworpen benadering. Hij had de lessen met plezier gegeven en had de indruk gekregen dat de leerlingen het ook leuk hadden gevonden. In het bijzonder was hem opgevallen dat de leerlingen naar omstandigheden zeer gemotiveerd gewerkt hadden.

5. Problemstellend onderwijs

In onze benadering hebben we steeds geprobeerd om aan te sluiten bij wat leerlingen al weten of intuïtief aanvoelen. We maken gebruik van hun kennis over macroscopische verschijnselen, over het gedrag van bewegende en botsende objecten en van hun intuïties over de aard van wetmatigheden. Deze voorkennis wordt nadrukkelijk niet gebruikt om conflicten op te roepen, maar om motieven op te roepen (en te vervullen) voor de introductie, toepassing en verdere ontwikkeling van een model. Ons uitgangspunt dat de voorkennis van leerlingen grotendeels correct is, en ons streven hen inhoudelijk deelgenoot te maken van het onderwijsleerproces, zijn daarbij zeer bruikbaar gebleken. De kern van deze aanpak kunnen we nu als volgt karakteriseren:

Leerlingen moeten zoveel mogelijk op inhoudelijke gronden de zin kunnen zien van wat zij aan het doen zijn. Als hieraan is voldaan, mogen we verwachten dat nieuwe kennis niet geforceerd aan leerlingen wordt opgedrongen, maar dat zij deze zullen accepteren op gronden die zij zelf begrijpen. Wanneer leerlingen steeds de zin zien van wat ze aan het doen zijn, kunnen zij min of meer de reden/opzet van elke activiteit begrijpen en bepalen waarom, in het licht van eerdere ervaringen, het zinvol is om deel te nemen aan die activiteit. We verwachten dat daardoor niet alleen hun inhoudelijke betrokkenheid bij het proces toeneemt, maar dat tevens de kwaliteit van hun begrip verbetert. We proberen een dergelijk proces concreet vorm te geven door leerlingen in een zodanige positie te brengen dat zij goede redenen (inhoudelijke motieven) ontwikkelen om hun preconcepties verder uit te breiden in de richting van de ten doel gestelde kennis. Er wordt geprobeerd om specifieke geplande motieven op te roepen door via goed doordachte activiteiten bepaalde hoofd- en sub-problemen bij leerlingen op te roepen en hen adequaat hulp te bieden bij het zoeken naar oplossingen, zodanig dat:

- de oplossing van elk deelprobleem aanleiding geeft tot een volgend deelprobleem;
- het achtereenvolgens oplossen van deelproblemen uiteindelijk leidt tot de oplossing van een hoofdprobleem;
- de door de ontwerper beoogde doelen door leerlingen bereikt zijn, wanneer alle hoofdproblemen zijn opgelost.

De problemen moeten hierbij dus niet door de docent aangedragen worden, maar de activiteiten moeten zodanig ontworpen zijn dat leerlingen de problemen zelf gaan stellen (vandaar dat we onze aanpak 'probleemstellend' genoemd hebben) en zelf belangrijk gaan vinden. Ook zullen leerlingen zelf moeten kunnen herkennen hoe de activiteiten hen kunnen helpen bij het vinden van een oplossing en zullen leerlingen door die activiteiten inderdaad ook in staat gesteld moeten worden om tot zo'n oplossing te komen. Bovendien zal de kennisuitbreiding van de leerlingen gedurende dit proces inderdaad moeten gaan in de door de ontwerper bedoelde richting. Hierbij mogen we overigens niet verwachten dat elke leerling elke oplossing helemaal zelf bedenkt of dat elke leerling elk gepland probleem zelf formuleert. Wel wordt gestreefd naar een situatie waarbij elk probleem minstens door enkele leerlingen wordt geformuleerd en waarbij alle leerlingen het voldoende belangrijk vinden om dit probleem op te lossen. Verder dienen de docent en het lesmateriaal leerlingen natuurlijk te ondersteunen bij het vinden van oplossingen.

Behalve voor het hier beschreven onderwerp van deeltjesmodellen, is ook voor het onderwerp van radioactiviteit een lessenserie vanuit een probleemstellende aanpak uitgewerkt (Klaassen, 1995). Het lijkt ons zinvol dit ook nog voor andere onderwerpen te doen, en dan met name voor onderwerpen waarvan vakdidactisch onderzoek heeft uitgewezen dat ze tot ernstige begripsproblemen bij leerlingen leiden (mechanica, energie, ...). Onze hoop en verwachting is dat zulke begripsproblemen aanzienlijk zullen verminderen door leerlingen nadrukkelijker te betrekken bij het hoe en waarom van hun inhoudelijke voortgang.

We willen afsluiten met enkele algemene opmerkingen betreffende thema's die de laatste tijd sterk in de belangstelling staan: de aard van natuurwetenschappen en vaardigheden. Met betrekking tot deze twee thema's wordt vaak

beargumenteerd hoe belangrijk het is *dat* ze een plaats vinden in het bètacurriculum. Hier zijn we het mee eens. Waar we ons echter zeker niet ten volle in kunnen vinden, betreft *de manier waarop* die thema's dan vaak een plaats vinden in het curriculum, namelijk als aparte, op zichzelf staande onderwerpen. Naar onze mening zouden ze sterker gekoppeld moeten en kunnen worden aan het leren van inhoud, juist om die thema's ook voor leerlingen zinvol te laten zijn. Terugkijkend hebben we bijvoorbeeld geconstateerd dat juist onze probleemstellende aanpak ons in staat heeft gesteld om onderwijs over de aard van deeltjesmodellen zeer nauw te verweven met onderwijs over de inhoud van het gekozen model. Niet alleen vond onderwijzen en leren over de aard van een deeltjesmodel plaats in reflectie op het ontwikkelde model, maar aspecten die met de aard van het model te maken hadden vormden ook meerdere keren een nieuw motief om het model verder te ontwikkelen. Bijvoorbeeld, reflectie op de aard van het model dat ontwikkeld is ter verklaring van verschijnselen betreffende gassen alsmede op de vorm van die verklaringen, geeft aanleiding tot, of versterkt een vermoeden dat zo'n model van onveranderlijke en voortdurend bewegende deeltjes zodanig verder uitgebouwd zou kunnen worden met aannames over de onderlinge interacties tussen de deeltjes en aannames over de correspondentie met macroscopische grootheden, dat ook verschijnselen betreffende vloeistoffen en vaste stoffen er op een vergelijkbare manier mee verklaard zouden kunnen worden. Reflectie op de aard van een deeltjesmodel heeft aldus voor leerlingen een productieve rol gespeeld bij de verdere ontwikkeling van dat model, en zal ertoe bijgedragen hebben dat ze –althans impliciet– kennis hebben opgedaan over de aard van deeltjesmodellen. Ons onderzoek heeft echter ook duidelijk gemaakt dat leerlingen hierdoor nog niet in staat hoeven te zijn die kennis ook expliciet te verwoorden. Misschien moeten ze meerdere malen een soortgelijk proces hebben meegemaakt (ook aan de hand van simpeler modellen voorafgaand aan dit deeltjesmodel), voordat zo'n explicitering mogelijk wordt. Naar onze mening is er dus wel plaats voor aparte lessen over de aard van natuurwetenschappen, maar pas wanneer aangesloten kan worden op wellicht impliciete, maar in ieder geval functionele kennis die leerlingen hieromtrent eerder hebben opgedaan. Hoe zou anders kennis over de aard van de natuurwetenschappen voor leerlingen moeten gaan leven?

Wat betreft vaardigheden, gelden naar onze indruk soortgelijke zaken. Binnen onze probleemstellende aanpak is het didactisch probleem niet zo zeer geweest hoe we leerlingen nieuwe vaardigheden (namelijk modelleervaardigheden) moeten leren, maar hoe we hen bereid kunnen maken om hun redeneervaardigheden in te zetten in nieuwe situaties en toe te passen bij de ontwikkeling van een deeltjesmodel. Door specifieke motieven bij leerlingen op te roepen, die hen vervolgens stimuleren om specifieke hypothesen te stellen, is het goed mogelijk gebleken om leerlingen werkelijk actief te betrekken in een modelleerproces dat uitkomt bij de in het curriculum gestelde doelen. Diverse leerlingen in ons onderzoek gaven te kennen dat zij, juist doordat het model het resultaat was van hun eigen denkproces, het gevoel hadden dit model ook echt te begrijpen. De resultaten gaven ook aan dat leerlingen goed in staat zijn een dergelijk model toe te passen en verder te ontwikkelen en dat zij het leuk vinden om in zo'n modelleerproces betrokken te zijn. Kortom, leerlingen hebben al modellerend een deeltjesmodel geleerd en in die zin is een modelleerproces voor hen gaan leven –in ieder geval

weer impliciet. Ook nu is het echter zo dat dit nog niet inhoudt dat ze zelf (de diverse stappen in) dat modelleerproces ook expliciet onder woorden kunnen brengen. Om dat te bereiken zouden in een later stadium ook aparte lessen gegeven kunnen worden over de aard van modelleren en de vaardigheden die daarbij een rol spelen. Het verdient naar onze indruk aanbeveling om na te gaan of, en op welke manier, wat hierboven over modelleervaardigheden is gezegd ook toegepast kan worden om andere vaardigheden (onderzoeksvaardigheden, argumentatievaardigheden, ...) op een natuurlijke en voor leerlingen zinvolle manier volledig te integreren met inhoud.

Noten

1. Voor meer details over zowel de aanpak zelf als het empirische ontwikkelingsonderzoek eraan, verwijzen we naar Vollebregt (1998).
2. Voorwaarde om dit direct plausibel te vinden is echter wel dat het basismodel voor leerlingen voldoende begrijpelijk is. Zij moeten zich het bewegen van de deeltjes, en als gevolg daarvan het botsen tegen elkaar en tegen de wanden, direct voor kunnen stellen. Daartoe kan bijvoorbeeld een computersimulatie van bewegende bolletjes een bijdrage leveren.
3. Merk op dat nu ook duidelijk wordt waarom in deze aanpak het aspect van beweging al enigszins gesetteld moet zijn voordat het aspect van invariantie aan de orde kan komen. De conclusie dat de deeltjes zelf niet (hoeven te) veranderen wordt immers mogelijk doordat alle partijen, of ze nou aanvankelijk een temperatuur aan de deeltjes toekenden of niet, hebben moeten aangeven hoe de deeltjes sneller kunnen zijn gaan bewegen (namelijk om een hogere druk te kunnen verklaren).

Literatuur

- Anderson, B. (1990). Pupils' conceptions of matter and its transformations (age 12-16). In: P.L. Lijnse, P. Licht, W. de Vos & A.J. Waarlo (eds.), *Relating macroscopic phenomena to microscopic particles*. Utrecht: CD-β Press.
- Brook, A., Briggs, H. & Bell, B. (1983). *Secondary students' ideas about particles*. Leeds: Children's Learning In Science Project. Centre for Studies in Science and Mathematics Education, University of Leeds.
- Buck, P. (1987). Der Sprung zu den Atomen. *Physica Didactica*, 14, 41-45.
- CLISP (1987). *Approaches to teaching the particulate theory of matter*. Leeds: Children's Learning In Science Project. Centre for Studies in Science and Mathematics Education, University of Leeds.
- DBK (7e dr.). *Natuurkunde voor de tweede klas havo/vwo*. Den Bosch / Amsterdam: Malmberg/V.U./Vereniging DBK-na.
- Driver, R., Leach, J., Millar, R. & Scott, P. (1996). *Young people's images of science*. Buckingham: Open University Press.
- Griffiths, A.K. & Preston, K.R. (1992). Grade-12 students' misconceptions relating to fundamental characteristics of atoms and molecules. *Journal of Research in Science Teaching*, 29, 611-628.
- Grosslight, L., Unger, C., Jay, E. & Smith, C.L. (1991). Understanding models and their use in science: Conceptions of middle and high school students and experts. *Journal of Research in Science Teaching*, 28, 799-822.
- Harré, R. & Madden, E.H. (1975). *Causal Powers*. Oxford: Basil Blackwell.
- Johnson, P. & Gott, R. (1996). Constructivism and evidence from children's ideas. *Science Education*, 80, 561-577.
- Klaassen, C.W.J.M. (1995). *A problem-posing approach to teaching the topic of radioactivity*. Utrecht: CD-β Press.

- Klaassen, C.W.J.M., Eijkelhof, H.M.C. & Lijnse, P.L. (1990). Considering an alternative approach to teaching radioactivity. In: P.L. Lijnse, P. Licht, W. de Vos & A.J. Waarlo (eds.). *Relating macroscopic phenomena to microscopic particles*. Utrecht: CD-β Press.
- Leach, J. (1996). Students' understanding of the nature of science. In: G. Welford, J. Osborne & P. Scott (eds.). *Research in science education in Europe*. London: Falmer Press.
- Maskill, R. & Pedrosa de Jesus, H. (1997a). Asking model questions. *Education in Chemistry*, 34, 132-134.
- Maskill, R. & Pedrosa de Jesus, H. (1997b). Pupils' questions, alternative frameworks and the design of science teaching. *International Journal of Science Education*, 19, 781-799.
- Meheut, M. & Chomat, A. (1990). The bounds of children's atomism: an attempt to make children build up a particulate model of matter. In: P.L. Lijnse, P. Licht, W. de Vos & A.J. Waarlo (eds.). *Relating macroscopic phenomena to microscopic particles*. Utrecht: CD-β Press.
- Novick, S. & Nussbaum, J. (1978). Junior high school pupils' understanding of the particulate nature of matter: An interview study. *Science Education*, 62, 273-281.
- Séré, M.G. (1992). Learning by giving and receiving explanations. In: R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer (eds.). *Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies*. Kiel: IPN.
- Vollebregt, M.J. (1998). *A problem posing approach to teaching an initial particle model*. Utrecht: CD-β Press.
- Vos, W. de (1992). *Chemie in duizend vragen: leerlingentekst scheikunde voor 3HAVO en 3VWO*. Utrecht: Centrum voor βdidactiek van de Rijksuniversiteit Utrecht.
- Vos, W. de & Verdonk, A.H. (1987). A new road to reactions, part 4: The substance and its molecules. *Journal of Chemical Education*, 64, 692-694.
- Vos, W. de & Verdonk, A.H. (1996). The particulate nature of matter in science education and in science. *Journal of Research in Science Teaching*, 6, 657-664.