

Kracht en Tegenkracht, Actie en Reactie

een onderzoek naar denkbeelden van leerlingen

D. van Genderen

Vakgroep natuurkunde-didactiek, Rijksuniversiteit Utrecht

Samenvatting

Het hier gerapporteerde onderzoek betreft het functioneren van het natuurkundige begrip kracht bij leerlingen in het vwo, het is toegespitst op twee elementaire principes: de gelijkheid van kracht en tegenkracht bij de eenparige rechtlijnige beweging en het principe van actie en reactie. Met beide principes blijken veel leerlingen ernstige moeite te hebben, ook nog na de behandeling van de mechanica in de vierde klas. De moeilijkheden zijn te verklaren uit denkbeelden als "overwinnen van tegenwerking", "sterk-zwak" en "actief-passief", die diep geworteld zijn in alledaagse ervaringen. Inzicht in deze denkbeelden is van belang voor de praktijk van het onderwijs.

1. Inleiding

Uit de onderwijspraktijk, uit buitenschoolse gesprekken en uit onderzoek, is bekend, dat leerlingen ten aanzien van verschijnselen in hun natuurlijke en technische omgeving vaak voorstellingen en verklaringen gebruiken, die niet overeenstemmen met de wetenschappelijk erkende. Sommige afwijkende denkbeelden van leerlingen zijn stevig geworteld in de alledaagse ervaring, het algemene taalgebruik en "common sense" redeneringen, soms zijn ze voornamelijk intuïtief, soms ook van duidelijke argumenten voorzien. Kennis hiervan is belangrijk, omdat het afleren van oude, vertrouwde denkbeelden even moeilijk is als het aanleren van nieuwe. Inzicht in deze moeilijkheden is in het bijzonder van belang wanneer men in het natuurwetenschappelijk onderwijs streeft naar aansluiting aan de leefwereld van de leerlingen.

Baanbrekend onderzoek naar de ontwikkeling van het logisch-mathematische en het natuurwetenschappelijke denken is sinds 1930 verricht door Piaget en zijn medewerkers in Genève, maar dit onderzoek was niet gerelateerd aan het leren op school en beperkte zich voornamelijk tot kinderen van 5 tot 12 jaar. Pas in de jaren zeventig begon in

diverse landen het onderzoek naar moeilijkheden bij het leren van de exacte vakken in het voortgezet onderwijs van de grond te komen. Een artikel van Driver en Easley (1978) geeft een overzicht, voorzien van bijna honderd literatuurverwijzingen, van voornamelijk recent onderzoek zowel naar denkniveau's, in de lijn van Piagets theorie, als naar denkbeelden van leerlingen. Sindsdien is nog een aanmerkelijke groei te zien van onderzoek naar wat men o.a. aanduidt als concept development, (mis)conceptions, alternative frameworks, childrens science, représentations, raisonnement spontané, Alltagsvorstellungen of Prekonzepten. Er zijn studies bij van psychologen, geïnteresseerd in cognitieve structuren, maar de meeste publicaties komen van vakdidactici en leraren, die hun vraagstellingen ontleen aan de praktijk van het onderwijs in de natuurwetenschappen.

In dit artikel zal ik me beperken tot onderzoek naar aard en oorzaken van de vaak hardnekkige moeilijkheden die leerlingen in het voortgezet onderwijs hebben met het natuurkundig denken over krachten. Een verdere beperking: het gaat hier niet om het oplossen van vraagstukken, maar om elementaire toepassingen van het traagheidsprincipe, $F=ma$ en het principe van actie en reactie. Daarbij zal ik in navolging van Lijnse (1981) de termen "schoolbeeld" en "straatbeeld" gebruiken als aanduiding voor de op school onderwezen theorie, resp. het interpretatiekader dat leerlingen zich van jongsaf hebben gevormd op basis van voorschoolse en buitenschoolse ervaringen. Het straatbeeld verdwijnt niet vanzelf door confrontatie met het schoolbeeld, maar kan in al of niet aangepaste vorm van invloed blijven.

2. Moeilijkheden met het begrip kracht

Uit onderzoek van o.a. Warren (1971, 1979) in Engeland, Viennot (1978, 1979) in Frankrijk, Jung c.s. (1979, 1980, 1981) in Duitsland en McCloskey (1983) in de Verenigde Staten blijkt dat bij een aanzienlijk deel van de scholieren en studenten, die in de wetten van Newton zijn onderwezen, het schoolbeeld slechts gebrekkig functioneert. Een veel voorkomende, fundamentele misvatting is, dat kracht in richting en grootte gekoppeld is met snelheid, in plaats van met snelheidsverandering. Deze koppeling van kracht met snelheid heeft bij de beoordeling van alledaagse verschijnselen welhaast het karakter van een alternatief principe. In overeenstemming daarmee wordt b.v. aan een omhoog geworpen bal een "voorraad aan kracht" toegedacht, die voor het stijgen wordt gebruikt en die met de snelheid afneemt, zodat de zwaartekracht de overhand krijgt. Dit denkbeeld, overeenkomend met de middeleeuwse impetustheorie, wordt signaleerd door Viennot en door McCloskey. In het onderzoek van McCloskey toonden veel studenten ook bij een praktische opdracht - al rennend een bal laten vallen op een voorgeschreven plek - onvol-

doende inzicht in het verschijnsel traagheid.

Dat de koppeling van kracht aan snelheidsverandering niet zo voor de hand ligt als sommige schoolboeken suggereren, is duidelijk te zien in de geschiedenis van de natuurkunde. De wetten van Newton zijn niet eenvoudig ontsproten aan alledaagse ervaringen met bewegingen en krachten in de leefwereld. De klassieke mechanica kwam tot stand via een lange omweg: de eeuwenlange bestudering van de bewegingen aan de hemel, uiteindelijk leidend tot het inzicht dat de aarde beweegt. Vóór de copernicaanse revolutie was het schoolbeeld gebaseerd op de leer van Aristoteles, met zijn principiële onderscheid tussen rust en beweging en tussen natuurlijke en gedwongen bewegingen. Dijksterhuis (1950) zegt hierover

"... en in het beginonderwijs in dit vak speelt zich elk jaar in verkleinden maatstaf en versneld tempo een stuk van de geschiedenis opnieuw af. De oorzaak ligt voor de hand: Aristoteles heeft niets anders gedaan dan de allergewoonste ervaringen op het stuk van beweging als algemene natuurwetenschappelijke stellingen formuleren, terwijl de klassieke mechanica met haar traagheidswet en haar evenredigheid van kracht en versnelling beweringen uitspreekt, die niet alleen door de alledaagse ervaring nooit bevestigd worden, maar waarvan de directe experimentele verificatie in beginsel uitgesloten is ..."

Ondanks belangrijke punten van overeenkomst tussen het straatbeeld van leerlingen en de denkbeelden van Aristoteles zou het misleidend zijn te stellen dat leerlingen "aristotelisch" denken. De aristotelische fysica wilde een voor de hele kosmos geldig en logisch consistent interpretatie kader aanbieden; het aantonen van inconsistenties, door Galilei en anderen, tastte het gehele systeem aan. Het straatbeeld van leerlingen daarentegen is niet zo bewust overwogen en logisch geordend; daardoor betekent de confrontatie met het schoolbeeld voor de leerlingen niet een duidelijke dwang tot keuze. Het "common sense" denken kent nauwelijks regels zonder uitzonderingen; zo hoeft een koppeling tussen kracht en snelheid in alledaagse situaties niet als strijdig gezien te worden met de evenredigheid tussen kracht en versnelling in schoolexperimenten.

Met deze laatste opmerkingen wil ik aannemelijk maken, dat er bij leerlingen in het voortgezet onderwijs niet een duidelijk gemarkeerde omslag te verwachten is van straatbeeld naar schoolbeeld. Er zijn diverse combinaties mogelijk; ook kan het afhangen van de aangeboden probleemsituatie, zoals Viennot in haar onderzoek laar zien, welk denkpatroon bij de leerling wordt opgeroepen.

In ons land heeft Vegting (1977) een beschrijving gegeven van diverse moeilijkheden met het krachtbegrip, op grond van eigen ervaringen met leerlingen in de tweede klas. Een belangrijk aspect van hun straatbeeld is het onderscheid tussen actief en passief:

"Als een voetballer een bal op de voet krijgt en die bal wegtrapt, dan is dat wat anders dan wanneer deze een bal op de voet krijgt en hij trapt niet zelf. In het eerste geval oefent de voetballer een kracht uit op de bal, in het tweede oefent de bal een kracht uit op de man".

Een ander veel voorkomend denkpatroon is, zoals o.a. Vegting signaleert: bij een beweging met constante snelheid, van bijv. een parachutist of een fietser, moet de kracht in de bewegingsrichting de tegenwerking overwinnen en dus groter zijn.

3. Vraagstelling en hypothesen

In hoeverre zijn zulke elementaire moeilijkheden met het krachtbegrip verdwenen na de gebruikelijke uitvoerige behandeling van de mechanica in de vierde klas van het havo en vwo? Eigen ervaringen met leerlingen en studenten, mededelingen van collega's alsook buitenlandse onderzoeken als hierboven vermeld, gaven ons aanleiding te twifelen aan een grote sprong voorwaarts in het functioneren van het begrip kracht. Wat ons vooral interesseerde was de mate waarin denkbeelden als "overwinnen van tegenwerking", "actief-passief" en "sterk-zwak" van invloed blijven. Om die invloed te onderzoeken, kozen we fysisch zeer eenvoudige probleemsituaties, waarin kennis van $F = ma$ en andere formules, definities en algoritmen niet nodig was. Wat natuurkundige kennis betreft, beperkte ons onderzoek zich tot twee elementaire principes, die essentieel zijn om te weten hoe het begrip kracht "werkt":

- a) de gelijkheid van de "voortdrijvende" en de "tegenwerkende" kracht op een voorwerp dat met constante snelheid beweegt. Ik noem dit hier "het principe van kracht en tegenkracht": het is een directe consequentie van het traagheidsprincipe
- b) de gelijkheid van de krachten die twee voorwerpen op elkaar uitoefenen: het principe van actie en reactie.

Bij de keuze van onze vragen aan de leerlingen gingen we uit van vier hypothesen:

1. bij de eenparige rechtlijnige beweging wordt de relatie tussen kracht en tegenkracht verkeerd beoordeeld, en wel op grond van het denkschema "overwinnen van tegenwerking"
2. bij de wisselwerking tussen twee zeer ongelijke voorwerpen wordt de relatie tussen actie en reactie verkeerd beoordeeld, en wel door het denken in termen van "sterk-zwak"
3. bij de wisselwerking tussen twee bewegende voorwerpen, waarvan het ene het andere duwt of trekt, worden actie en reactie verward met kracht en tegenkracht;

dit leidt tot een verkeerde beoordeling op basis van "overwinnen van tegenwerking"

4. bij evenwichtssituaties levert de gelijkheid van krachten - hetzij kracht en tegenkracht, hetzij actie en reactie - geen moeilijkheden op.

Consistent met de hypothesen 3 en 4 is de misvatting dat het actie-reactieprincipe uitsluitend zou gelden voor voorwerpen in rust, een mening die ik bij veel studenten in onze lerarenopleiding - kandidaten in de natuurkunde - heb aangetroffen.

Moelijkheden met het actie-reactieprincipe zijn vaker gesignaleerd, maar voorzover ons bekend was naar deze moeilijkheden nog geen onderzoek gedaan vanuit hypothesen over het straatbeeld van de leerlingen. In verband met onze hypothesen hebben we aan de leerlingen ook vragen gesteld over alledaagse situaties die in de schoolnatuurkunde zelden aan de orde komen.

4. Uitvoering van het onderzoek

In de winter van 1981/82 hebben Lijnse en ik, geassisteerd door Adriaanse, video-opnamen gemaakt van interviews met een zevental groepjes van twee of drie leerlingen, afkomstig van diverse scholen. Daarna hebben we een vragenlijst opgesteld, die in de zomer van 1982 op drie scholen is voorgelegd aan in totaal 91 leerlingen van derde en vierde klassen vwo.

Bij de interviews zetten we de leerlingen een opstelling voor met een speelgoedtreintje; we ondervroegen hen over de op het treintje werkende krachten, de relaties tussen die krachten en de wijze waarop de voorwaartse kracht tot stand komt. Het krachtenspel in deze probleemsituatie komt overeen met dat bij fietsen en auto's; we wilden zien in hoeverre leerlingen in staat waren om zulke straatsituaties vanuit het schoolbeeld correct te analyseren.

Bij de opstelling van de vragenlijst hebben we gestreefd naar variatie in context: naast alledaagse situaties, o.a. uit verkeer en sport, ook schoolonderwerpen, zoals het waterstofatoom, het stelsel aarde-maan en de werking van magneten.

De leerlingen aan wie we de vragenlijst hebben afgenomen zijn te verdelen in twee groepen, die ik verder met I en II zal aanduiden:

groep I		groep II	
school 1	school 2	school 1	school 3
23 leerlingen	11 leerlingen	31 leerlingen	25 leerlingen
eind 3 vwo	begin 4 vwo	eind 4 vwo	eind 4 vwo

Groep I kon geacht worden voldoende te hebben kennism gemaakt met diverse soorten krachten en hun werkingen om de gestelde vragen te kunnen begrijpen, maar bij hen zijn de principes

"Als een voetballer een bal op de voet krijgt en die bal wegtrapt, dan is dat wat anders dan wanneer deze een bal op de voet krijgt en hij trapt niet zelf. In het eerste geval oefent de voetballer een kracht uit op de bal, in het tweede oefent de bal een kracht uit op de man".

Een ander veel voorkomend denkpatroon is, zoals o.a. Vegting signaleert: bij een beweging met constante snelheid, van bijv. een parachutist of een fietser, moet de kracht in de bewegingsrichting de tegenwerking overwinnen en dus groter zijn.

3. Vraagstelling en hypothesen

In hoeverre zijn zulke elementaire moeilijkheden met het krachtbegrip verdwenen na de gebruikelijke uitvoerige behandeling van de mechanica in de vierde klas van het havo en vwo? Eigen ervaringen met leerlingen en studenten, mededelingen van collega's alsook buitenlandse onderzoekingen als hierboven vermeld, gaven ons aanleiding te twijfelen aan een grote sprong voorwaarts in het functioneren van het begrip kracht. Wat ons vooral interesseerde was de mate waarin denkbeelden als "overwinnen van tegenwerking", "actief-passief" en "sterk-zwak" van invloed blijven. Om die invloed te onderzoeken, kozen we fysisch zeer eenvoudige probleemsituaties, waarin kennis van $F = ma$ en andere formules, definities en algoritmen niet nodig was. Wat natuurkundige kennis betreft, beperkte ons onderzoek zich tot twee elementaire principes, die essentieel zijn om te weten hoe het begrip kracht "werkt":

- a) de gelijkheid van de "voortdrijvende" en de "tegenwerkende" kracht op een voorwerp dat met constante snelheid beweegt. Ik noem dit hier "het principe van kracht en tegenkracht": het is een directe consequentie van het traagheidsprincipe
- b) de gelijkheid van de krachten die twee voorwerpen op elkaar uitoefenen: het principe van actie en reactie.

Bij de keuze van onze vragen aan de leerlingen gingen we uit van vier hypothesen:

1. bij de eenparige rechtlijnige beweging wordt de relatie tussen kracht en tegenkracht verkeerd beoordeeld, en wel op grond van het denkschema "overwinnen van tegenwerking"
2. bij de wisselwerking tussen twee zeer ongelijke voorwerpen wordt de relatie tussen actie en reactie verkeerd beoordeeld, en wel door het denken in termen van "sterk-zwak"
3. bij de wisselwerking tussen twee bewegende voorwerpen, waarvan het ene het andere duwt of trekt, worden actie en reactie verward met kracht en tegenkracht;

dit leidt tot een verkeerde beoordeling op basis van "overwinnen van tegenwerking"

4. bij evenwichtssituaties levert de gelijkheid van krachten - hetzij kracht en tegenkracht, hetzij actie en reactie - geen moeilijkheden op.

Consistent met de hypothesen 3 en 4 is de misvatting dat het actie-reactieprincipe uitsluitend zou gelden voor voorwerpen in rust, een mening die ik bij veel studenten in onze lerarenopleiding - kandidaten in de natuurkunde - heb aangetroffen.

Moeilijkheden met het actie-reactieprincipe zijn vaker gesignaleerd, maar voorzover ons bekend was naar deze moeilijkheden nog geen onderzoek gedaan vanuit hypothesen over het straatbeeld van de leerlingen. In verband met onze hypothesen hebben we aan de leerlingen ook vragen gesteld over alledaagse situaties die in de schoolnatuurkunde zelden aan de orde komen.

4. Uitvoering van het onderzoek

In de winter van 1981/82 hebben Lijnse en ik, geassisteerd door Adriaanse, video-opnamen gemaakt van interviews met een zevental groepjes van twee of drie leerlingen, afkomstig van diverse scholen. Daarna hebben we een vragenlijst opgesteld, die in de zomer van 1982 op drie scholen is voorgelegd aan in totaal 91 leerlingen van derde en vierde klassen vwo.

Bij de interviews zetten we de leerlingen een opstelling voor met een speelgoedtreintje; we ondervroegen hen over de op het treintje werkende krachten, de relaties tussen die krachten en de wijze waarop de voorwaartse kracht tot stand komt. Het krachtenspel in deze probleemsituatie komt overeen met dat bij fietsen en auto's; we wilden zien in hoeverre leerlingen in staat waren om zulke straatsituaties vanuit het schoolbeeld correct te analyseren.

Bij de opstelling van de vragenlijst hebben we gestreefd naar variatie in context: naast alledaagse situaties, o.a. uit verkeer en sport, ook schoolonderwerpen, zoals het waterstofatoom, het stelsel aarde-maan en de werking van magneten.

De leerlingen aan wie we de vragenlijst hebben afgenomen zijn te verdelen in twee groepen, die ik verder met I en II zal aanduiden:

groep I		groep II	
school 1	school 2	school 1	school 3
23 leerlingen	11 leerlingen	31 leerlingen	25 leerlingen
eind 3 vwo	begin 4 vwo	eind 4 vwo	eind 4 vwo

Groep I kon geacht worden voldoende te hebben kennism gemaakt met diverse soorten krachten en hun werkingen om de gestelde vragen te kunnen begrijpen, maar bij hen zijn de principes

van de mechanica nog niet in hun algemene geldigheid en samenhang behandeld. Dat is wel het geval bij groep II, maar het onderzoek gebeurde enkele maanden na de behandeling van de mechanica; in de tussentijd kunnen oppervlakkig aangeleerde aspecten van het schoolbeeld vervaagd en met het straatbeeld verward zijn.

Randvoorwaarde bij de opstelling van de vragenlijst was, dat ze gemakkelijk in een lesuur af te werken moest zijn. Verder moesten we door vorm en volgorde van de vragen camoufleren dat in feite steeds gevraagd werd of de ene kracht gelijk is aan de andere, of groter of kleiner.

Van de 17 gestelde vragen waren er drie minder geschikt, gezien het vrij grote aantal onduidelijke of ontbrekende antwoorden. Van de overige 14 staat een korte beschrijving op blz. 54; twee ervan geef ik als voorbeeld volledig.

Vraag 1 is een voorbeeld van een schoolbeeldsituatie, waarin het gaat om actie en reactie tussen zeer ongelijke partners; volgens hypothese 2 zal het oordeel hier beïnvloed worden door het denkschema "sterk-zwak".

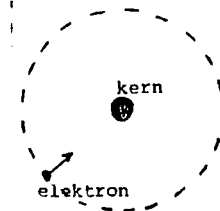
1 In een waterstofatoom draait het elektron in een cirkelbaan om de kern. Het elektron wordt in zijn baan gehouden door de aantrekkingskracht van de kern.

- Oefent het elektron ook een aantrekkende kracht uit op de kern?


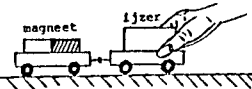


0 Ja, en wel even groot als de kracht waarmee de kern het elektron aantrekt.

0 Ja, maar kleiner dan de kracht waarmee de kern het elektron aantrekt

0 Nee, het elektron oefent geen kracht uit op de kern.



Vraag 6 is een voorbeeld van een straatbeeldsituatie, waarbij het in de eerste bewering gaat om kracht en tegenkracht en in de tweede bewering op actie en reactie. Volgens onze hypothesen 1 en 3 zal hier het denkschema "overwinnen van tegenwerking" tot onjuiste antwoorden leiden.

	reactiekracht R, resp. tegenkracht i is							
	groter		gelijk		kleiner		afwezig	
	I	II	I	II	I	II	I	II
1. 'In een waterstofatoom draait het elektron in een cirkelbaan om de kern'. A de kracht die het elektron op de kern uitoefent, R de kracht van het elektron op de kern.	-	-	51	70	26	27	23	4
2. 'Ik probeer een kist over een horizontale vloer te schuiven, maar ik krijg er geen beweging in'. K de kracht van mij op de kist, T de wrijvingskracht die de vloer op de kist uitoefent. (Andere oorzaken voor niet bewegen: 26, resp. 18).	65	9	62	18	0	2	-	-
3. 'Ik sta op een plank over een sloot, zodat de plank doorbuigt'. A de kracht van mij op de plank, R de kracht van de plank op mij. (AR-principe als argument bij gelijke krachten: 3, resp. 9).	3	7	14	66	69	27	14	0
4.  'Een auto botst frontaal tegen een stilstaande auto van hetzelfde type'. Indirecte AR-vraag: is de in-dekking van de stilstaande auto groter, even groot of kleiner?	27	25	29	52	44	23	-	-
5.  'Twee karretjes die aan elkaar gekoppeld zijn kunnen wrijvingsloos over een horizontale rijbaan bewegen'. Indirecte AR-vraag: gaan de karretjes na loslaten naar rechts rijden, niet rijden of naar links rijden? (Juiste motivering bij juiste keus: 23 resp. 59).	3	0	72	88	26	12	-	-
6. 'Een auto trekt een caravan met constante snelheid voort over een vlakke weg'. a) KI-vraag met K de trekkracht, T de wrijvingskrachten op de caravan. b) AR-vraag met A de trekkracht van auto op caravan, R die van caravan op auto. (Juiste motivering bij juiste keuze: 0, resp. 26)	-	-	17	20	83	80	-	-
7. 'Ik leun met mijn rug tegen een muur'. A de kracht waarmee ik duw, R de kracht die de muur op mij uitoefent.	11	9	74	84	3	2	11	5
9. 'Bij het kogelstoten oefen ik met mijn hand een kracht uit op de kogel'. A de kracht die ik op de kogel uitoefen, R de kracht die de kogel uitoefent op mijn hand.	9	4	23	34	69	62	0	0
10.  'Twee schaatser die even zwaar zijn staan eerst stil op het ijs. Op een bepaald moment geeft de linker schaatser de rechter een duw'. Indirecte AR-vraag over de afgeleide afstand na 2 seconden.	12	7	73	81	15	2	-	-
11.  'Een grote en een kleine magneet liggen met de noordpolen naar elkaar toe, zodat ze elkaar afstoten'. A en R de kracht die de grote, resp. de kleine uitoefent. (Juiste motivering bij juiste keuze 9, resp. 25).	-	-	9	31	91	69	-	-
13. 'Op weg naar school is de ketting van mijn fiets gebroken. Nu laat ik me duwen door een vriendin'. A de kracht waarmee ik geduwd wordt, R de kracht die ik uitoefen.	6	2	14	24	71	67	9	7
15. 'De maan blijft in haar baan om de aarde door de aantrekkingskracht van de aarde'. A de kracht die de aarde op de maan uitoefent, R de kracht van de maan op de aarde.	-	-	38	66	44	32	18	2
16. 'Op een voorwerp werken twee krachten in tegengestelde richtingen. Het voorwerp beweegt met een constante snelheid naar rechts'. K de kracht naar rechts, I de kracht naar links.	-	-	16	16	84	84	-	-
17. 'Een voorwerp V oefent een kracht uit op een voorwerp W. Is het in zo'n situatie altijd zo dat W een even grote kracht op V uitoefent? Bij antwoord 'nee' konden een of meer redenen worden gekozen. 'het maakt daarbij uit of V en W in rust zijn of in beweging' 57, resp. 47 'het maakt daarbij uit wat de massa's van de voorwerpen zijn' 41, resp. 60.	n.v.t.	-	9	21	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.

6 Een auto trekt een caravan met constante snelheid voort over een vlakke weg. Behalve de trekkracht werken er op de caravan ook wrijvingskrachten (uitgevoerd door het wegdek en door de lucht).

1e bewering: "De trekkracht is groter dan de wrijvingskrachten".

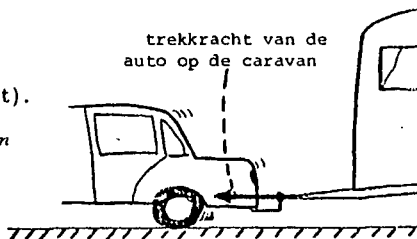
- Ben je het hier mee eens? ja/nee
Motiveer je antwoord!

.....

2e bewering: "De kracht waarmee de caravan aan de auto trekt is even groot als de trekkracht van de auto op de caravan".

- Ben je het hier mee eens? ja/nee
Motiveer je antwoord!

.....



5. De vragenlijst en de resultaten

De vragen zijn in het overzicht op blz. 54 verkort weergegeven, de letters A en R staan voor actie en reactie, K en T voor een kracht en een tegenkracht die op hetzelfde voorwerp werken. Met behulp van deze letters zijn ook de keuzemogelijkheden verkort aangegeven, met de percentages voor de groepen I en II, die resp. niet en wel de bovenbouwmechanica hebben gehad.

6. Interpretatie van de resultaten

Uiteraard behoeven niet alle geconstateerde fouten gevolg te zijn van het straatbeeld van leerlingen, er zullen ook effecten zijn van onduidelijkheid in de vragen, onnauwkeurig lezen of raden. Toch laten de resultaten zich, over het geheel genomen, goed interpreteren vanuit eerder genoemde of daarbij aansluitende hypothesen over de denkbeelden van leerlingen.

Waar inhoud en vorm van de vragen overeenkwamen hebben we verbanden onderzocht door middel van kruistabellen.

"Overwinnen van tegenwerking - hypothesen 1 en 3

Hypothese 1 wordt in sterke mate ondersteund bij het eerste deel van vraag 6 (KT voor een caravan). Opmerkelijk is hier het geringe verschil tussen de groepen I en II. De gegeven motiveringen wijzen op een sterke overtuiging achter de keuze voor $K > T$ "anders zou de caravan niet rijden", "anders zouden ze stilstaan", "de caravan rijdt toch", en een enkele maal expliciet: "de trekkracht overwint de wrijvingskrachten".

Hypothese 1 wordt evenzeer ondersteund bij vraag 16 (KT algemeen). De correlatie met vraag 6 is hoog: 90% van groep I en 86% van groep II legt bij beide vragen dezelfde relatie tussen K en T.

Hypothese 3 wordt voor groep I sterk ondersteund bij het tweede deel van vraag 6 (AR tussen auto en caravan). De antwoorden van de meeste leerlingen komen overeen met die op het eerste deel van de vraag, met dezelfde motivering; dit wijst erop dat de reactiekracht niet wordt onderscheiden van een tegenkracht. Bij groep II lijkt het schoolbeeld te domineren - 62% kiest het goede antwoord - maar slechts 36% verwijst in de motivering duidelijk naar het actie-reactieprincipe. Afwijkende motiveringen zijn o.a. dat auto en caravan even ver van elkaar blijven of dat anders de trekhaak zou breken, misschien te interpreteren als: "auto en caravan blijven in rust t.o.v. elkaar, dus de krachten heffen elkaar op".

Bij de vragen 9 (kogel wordt weggestoten) en 13 (fietser wordt geduwd) was geen toelichting gevraagd, maar de resultaten lijken hypothese 3 te bevestigen. Opmerkelijk is hier het terugvallen van de resultaten van groep II in vergelijking met de resultaten bij vraag 6; oorzaak kan zijn dat de tweede bewering in vraag 6 in haar formulering gemakkelijk doet denken aan het actie-reactieprincipe.

"Sterk en zwak" - hypothese 2

Hypothese 2 vindt duidelijk steun in de antwoorden op vraag 11: de grootste of de sterkste magneet oefent de grootste kracht uit, volgens een ruime meerderheid in beide groepen; enkele leerlingen schrijven erbij dat de grootste ook de sterkste is.

Aanzienlijk minder bevestiging vindt hypothese 2 in vraag 1 (kern en elektron). Een oorzaak van het betere resultaat kan zijn dat hier, anders dan in vraag 11, niet uitdrukkelijk van een grootste of sterkste partner wordt gesproken. Bovendien gaat het om een typisch geleerde situatie die alleen appelleert aan het schoolbeeld. Toch zou de gegeven situatie gemakkelijk het schema "sterk-zwak" kunnen oproepen, omdat de kern de beweging van het elektron "beheerst". Daar staat tegenover dat leerlingen zich kunnen herinneren dat de ladingen even groot zijn, en dat ze de gelijkheid van krachten baseren op de (niet voor de geldigheid van het actie-reactieprincipe noodzakelijke) gelijkheid van ladingen. Zo'n element van gelijkheid ontbreekt in vraag 15 (aarde en maan), maar hier kan de overeenkomst met vraag 1 de keuze hebben beïnvloed; de antwoorden vertonen vooral in groep II een sterke correlatie (82% komt overeen). Van de leerlingen in groep II die bij vraag 15 kiezen voor gelijke krachten, geeft ruim de helft bij vraag 17 aan, dat de massa's verschil kunnen uitmaken voor de onderlinge krachtwerking tussen twee voorwerpen.

Het denkschema "sterk-zwak" lijkt relatief weinig te worden toegepast op de magneet en het stuk ijzer in vraag 5. Hier kunnen de leerlingen echter bij hun keuze geholpen zijn door een intuïtief oordeel dat de wagentjes niet zomaar "uit zichzelf" kunnen gaan rijden. Daarop wijst het feit dat een motivering in termen van wederzijdse aantrekking slechts wordt gegeven door eenderde, resp. tweederde van de leerlingen die in groep I en II het juiste antwoord kiezen.

Wanneer de partners in een wisselwerking gelijk zijn, zodat het schema "sterk-zwak" niet opgeroepen wordt, maken de leerlingen veel minder onjuiste keuzen. Relatief weinig leerlingen tekenen in vraag 10 een asymmetrische situatie, daarbij komt vrijwel even vaak de linker als de rechter schaatser het verst. Het kan zowel aan "zich afzetten tegen de ander" gedacht zijn als aan "de ander wegduwen". Dat deze effecten samengaan is de leerlingen uit ervaring bekend; dat deze effecten in dit geval ook tot gelijke verplaatsingen leiden sluit aan bij een gevoel voor symmetrie. Hier kan het schoolbeeld met bijpassende proeven goed aansluiten op de ervaring verwerkt in het straatbeeld.

Moeilijker blijkt het probleem van de botsende auto's in vraag 4. Hier hadden we geen motivering gevraagd, zodat we naar de gedachten van de leerlingen moeten gissen. Te denken is aan associaties als "de klap moeten opvangen" bij de stilstaande auto en "zich te pletter rijden" bij de andere. Onzeker blijft ook in hoeverre de keus van het goede antwoord berust op duidelijk inzicht in de relativiteit van beweging en rust.

Gelijke krachten bij rust - hypothese 4

- Een zeer verrassend resultaat vonden we de geringe mate waarin hypothese 4 werd bevestigd bij de vragen 2 (duwen tegen een kist) en 3 (staan op een plank).

Bij vraag 2 schrijft 26% van groep I en 18% van groep II het niet bewegen van de kist toe aan andere oorzaken dan de wrijvingskracht: vooral de zwaartekracht, de zwaarte van de kist en de massa van de kist worden genoemd. Opmerkelijker nog is dat volgens 65% resp. 62% de tegenkracht groter is. Daarin kan de gedachte meegespeeld hebben dat de wrijvingskracht niet maximaal hoeft te zijn, dus groter zou kunnen zijn dan ze nu is. Waarschijnlijker lijkt ons dat de situatie het beeld oproept van een wedstrijd, een krachtmeting in de zin van het spraakgebruik, die ik verlies. (Een psycholoog die deze vraag onder ogen kreeg, vertelde me dat hij de situatie inderdaad zo had opgevat).

Bij vraag 3 wordt het doorbuigen van de plank als argument gebruikt, door de meerderheid van groep I en een kwart van groep II, voor het antwoord dat de plank een kleinere kracht uitoefent. Ook deze situatie kon het beeld oproepen van een 'krachtmeting', waarbij de plank gedwongen wordt mee te geven. Opmerkelijk is hier ook, dat bij het

goede antwoord slechts sporadisch het actie-reactieprincipe als argument wordt gegeven. Veel vaker wordt iets gezegd over evenwicht of over het niet breken van de plank.

Bij vraag 7 - leunen tegen een muur - zijn de resultaten veel beter, maar hier ontbreekt ook het aspect van 'krachtmeting'. Op grond van het bovenstaande menen we hypothese 4 te moeten verwerpen en te moeten vervangen door

- 4* bij evenwichtssituaties die associaties oproepen met strijd of dwang, wordt de relatie tussen kracht en tegenkracht en/of de relatie tussen actie en reactie verkeerd beoordeeld op grond van het denken in termen van "Wie Wint".

Actief en passief

Een extreme vorm van de diverse eerder genoemde misvattingen is, dat de reactiekracht geheel ontbreekt. In groep II komt dit slechts sporadisch voor, in groep I wat vaker: 23% denkt dat het elektron kracht uitoefent op de kern en 18%, merendeels dezelfde dat de maan geen kracht uitoefent op de aarde. Ook de plank in vraag 3, de maan in vraag 7 en de voortgeduwde fietser in vraag 13 worden soms als passief gezien: resp. 14%, 11% en 9% in groep I vindt dat zij geen kracht uitoefenen.

Het komt ook voor dat de tegenkracht ontbreekt. In één van onze interviews over de krachten op een treintje werden de rails als passieve ondersteuning beschouwd; het betrof hier twee leerlingen uit een vierde klas havo, die nog geen bovenbouw mechanica hadden gehad. Het treintje wordt wel door de aarde aangetrokken, maar "hij kan niet verder naar beneden, omdat hij op de aarde is"; er werkt op het treintje geen kracht naar boven. Iets dergelijks wordt door Minstrell (1982) geconstateerd bij het voorbeeld van een boek op tafel: de helft van zijn leerlingen in de hoogste klas van een Amerikaanse highschool vindt, dat de tafel "niets doet" en dus geen kracht uitoefent.

Kracht of geen kracht?

In onze hypothesen zijn we ervan uitgegaan dat leerlingen in derde en hogere klassen wel inzien, welke krachten in een gegeven situatie op een voorwerp werken. De verwachte misvattingen zouden blijken uit een onjuiste beoordeling van de relatie tussen K en T of A en R .

Uit de zojuist onder "actief en passief" gegeven voorbeelden blijkt, dat ook nog een fundamentele misvatting optreedt: wat in het schoolbeeld gezien wordt als een kracht, is soms in het straatbeeld iets anders, b.v. passief verzet.

Het omgekeerde hebben we ook aangetroffen: leerlingen zien in het straatbeeld een

"kracht" die in het schoolbeeld niet past. In onze interviews zagen alle leerlingen als voorwaartse kracht op het treintje "de kracht van de motor" werken. Bij doorvragen - waarom vertoont het treintje dan geen neiging om voorwaarts te bewegen als je het met draaiende wielen boven de rails houdt? - kwamen enkele leerlingen tot het idee van een overbrenging van de "motorkracht" door de assen, maar niet tot de beslissende stap naar de wisselwerking tussen treintje en rails. Ook natuurkundestudenten hebben naar mijn ervaring veelal grote moeite, bij een vraag over een rijdende auto, met het denkbeeld dat het wegdek een voorwaartse kracht uitoefent op de aangedreven wielen. Deze moeite verraadt o.i. de invloed van het schema "actief-passief": de voortdrijvende kracht laat zich wel associëren met de actieve motor, maar niet met het passieve wegdek.

7. Conclusies

De resultaten van ons onderzoek ondersteunen de eerste drie hypothesen en leiden tot wijziging van de vierde. Bovendien bleek dat de moeilijkheden van de leerlingen nog lang niet verdwenen zijn na de behandeling van de mechanica in de vierde klas. Weliswaar was de onderzochte groep niet groot - zoals gebruikelijk in dit soort onderzoek - maar we hebben geen reden om aan te nemen dat het natuurkunde-onderwijs op de betrokken scholen ongunstig afsteekt bij dat op andere. Bovendien leiden onderzoeken elders, voorzover met het onze vergelijkbaar, tot overeenkomstige conclusies over de resistentie van de eigen denkbeelden van leerlingen. Zoals Soloman (1983) in Engeland constateert:

"from all over the world, America, Scotland, Australia, Canada and New Zealand the same sorry stories poured in, of students who seemed unable to use the physics which they were thought to have learnt".

Zij waarschuwt hierbij voor de lichtvaardige conclusie dat het onderwijs niet zou deugen of dat natuurkunde gewoon te moeilijk zou zijn; daarvoor zijn de aard en de oorzaken van de moeilijkheden nog te weinig onderzocht.

Met ons onderzoek hopen we iets te hebben bijgedragen tot beter inzicht in het straatbeeld van leerlingen ten aanzien van het begrip kracht. Verder onderzoek zal nodig zijn om dit beeld helderder te krijgen en duidelijker ook in verband te brengen met de alledaagse ervaring, het algemene taalgebruik en "common sense". Belangrijke aanzetten daartoe liggen naar onze mening in het onderkennen van denkschema's als "overwinnen van tegenwerking" en "sterk-zwak". Die schema's passen bij een begrip "kracht" dat ligt in de sfeer van actie en inspanning; ze passen ook bij methoden van "krachtmeting", waarin beweging uitwijst wie het sterkst is.

8. Suggesties voor het onderwijs

Verschillende onderzoekers hebben aan de constatering van veelvuldig bij leerlingen en studenten voorkomende misverstanden suggesties verbonden voor het onderwijs. Warren (1979) benadrukt vooral het belang van een zo zuiver mogelijke presentatie van het schoolbeeld en critiqueert onduidelijkheden in schoolboeken. Jung heeft meer oog voor de invloed van "Alltagsvorstellungen" en waarschuwt voor formuleringen en voorbeelden die door leerlingen verkeerd geïnterpreteerd kunnen worden, zodat ze het straatbeeld zelfs kunnen versterken.

Zulke suggesties gaan naar onze mening niet ver genoeg. Belangrijk is vooral dat de alledaagse ervaringen en het gewone taalgebruik in de natuurkundeles betrokken worden. Hoe komt het b.v. dat je bij het feit "meer kracht moet zetten" om sneller te gaan? Minstrell (1982) geeft een aardige beschrijving van een klessessie, over de kracht die een tafel uitoefent op een boek en analoge situaties, waarin hij de leerlingen stimuleert om met hun eigen denkbeelden en redeneringen te komen. Zulke discussies brengen leerlingen ertoe hun opvattingen te verhelderen, waardoor verschillen tussen straatbeeld en schoolbeeld duidelijker aan het licht komen. Overwegingen als deze hebben voor mijzelf meegespeeld bij mijn bijdrage aan de revisie van het PLON-thema Verkeer (1983) voor de vierde klas havo. In de behandeling van het krachtenspel bij fietsen, autorijden, varen en vliegen nemen het uitgebreide traagheidsprincipe en het actie-reactieprincipe een belangrijke plaats in.

Enkele zeer specifieke suggesties zijn te verbinden aan bepaalde vragen uit onze lijst. Situaties zoals geschetst in de vragen 4, 5, 10 en 11 kunnen dienen als uitgangspunt voor discussie in de klas. Ons onderzoek suggereert dat het geen overbodige luxe is aan het AR-principe meer experimenten, voorbeelden en uitleg te verbinden dan gewoonlijk gebeurt. Een instructieve overgang van een symmetrische situatie naar een asymmetrische als in vraag 11 is te maken door met twee gelijke magneten te beginnen en dan aan één kant een identieke magneet toe te voegen. Het proefje in vraag 5 kan dienen om duidelijk te maken dat inwendige krachten geen invloed kunnen hebben op de beweging van een systeem als geheel. Bij vraag 4 komt de relativiteit van beweging en rust aan de orde, waarbij tevens het schema "actief-passief" ongedig blijkt.

Niet alle vragen uit onze lijst lenen zich voor een dergelijk gebruik, hoewel bij sommige wellicht wel geschikte varianten te verzinnen zijn. We zouden het betreuren als de lijst gebruikt zou worden als papieren oefenmateriaal om leerlingen beter af te richten op het toepassen van het traagheidsprincipe en het actie-reactieprincipe. Het juiste antwoord is in wezen waardeloos als er niet een juist begrip uit spreekt.

Literatuur

- DIJKSTERHUIS, E.J. 1950. *De mechanisering van het wereldbeeld*. Meulenhoff, Amsterdam.
- DRIVER, R. en EASLEY, J. 1978. Pupils and paradigms: a review of literature related to concept development in adolescent science students. *Studies in science education*, Vol.5, p.61.
- JUNG, W. en WIESNER, H. 1979. Zur Definition fachdidaktischer Probleme am Beispiel der Mechanik. *Physica Didactica*, 6, p. 203.
- JUNG, W. en WIESNER, H. 1980. Wie wenden Schüler Physik an zur Erklärung alltäglicher Erscheinungen? *Physica Didactica*, 7, p. 147.
- JUNG, W., WIESNER, H. en ENGELHARDT, P. 1981. *Vorstellungen von Schülern über Begriffe der Newtonschen Mechanik*. Verlag Barbara Franzbecker, Bad Salzdetfurth.
- LIJNSE, P.L. 1981. Schoolbeeld of straatbeeld: over onderzoek naar begripsmoeilijkheden van leerlingen bij het leren van mechanica. *Verslag van de conferentie 'Woudschoten'*. Werkgroep Natuurkunde-Didaktiek.
- MCCLOSKEY, M. 1983. Intuitive physics. *Scientific American*, Vol.248, 4, p. 114.
- MINSTRELL, J. 1982. Explaining the 'at rest' condition of an object. *The physics teacher*, Vol.20, 1, p. 10.
- SOLOMON, J. 1983. Is physics easy? *Physics Education*, Vol.18, p. 155.
- VEGTING, P. 1977. Kracht. *Faraday*, 46, p. 2.
- VIENNOT, L. 1978. *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Proefschrift, Université de Paris VII.
- VIENNOT, L. 1979. Spontaneous reasoning in elementary dynamics. *European Journal of Science Education*, Vol.1, p. 205.
- WARREN, J.W. 1971. Circular motion. *Physics Education*, Vol.6, p. 74.
- WARREN, J.W. 1979. *Understanding force*. Murray, Londen.