
A.E. van der Valk

ONTWIKKELING IN ENERGIEONDERWIJS

*Een onderzoek naar begripsontwikkeling bij
VWO-leerlingen in realiteitsgericht
natuurkundeonderwijs*



CD-B WETENSCHAPPELIJKE BIBLIOTHEEK

onder redactie van:
Prof.dr.P.L.Lijnse
Prof.dr.A.Treffers
Dr.W.de Vos
Dr.A.J.Waarlo

1. Didactiek in perspectief
redactie: P.L.Lijnse en W.de Vos
2. Radiation and Risk Education
H.M.C.Eijkelhof
3. Natuurkunde-onderwijs tussen leefwereld en vakstructuur
R.F.A.Wierstra
4. Een onverdeelbare eenheid, deel A en B
M.J.Vogelezang
5. Betrokken bij evenwicht
J.H. van Driel
6. Relating macroscopic phenomena to microscopic particles: a central problem
in secondary education
editors: P.L.Lijnse, P.Licht, W.de Vos and A.J.Waarlo
7. Kwaliteit van kwantiteit
H.E.Elzenga
8. Interactieve video in de nascholing rekenen-wiskunde
F.van Galen, M.Dolk, E.Feijs, V.Jonker, N.Ruesink, W.Uittenbogaard
9. Realistic Mathematics Education in Primary School
editor: L.Streefland
10. Ontwikkeling in energieonderwijs
A.E. van der Valk

Centrum voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen
Universiteit Utrecht
Postbus 80.008
3508 TA Utrecht

Inhoud

Woord vooraf

1	Inleiding en probleemstelling	1
1.1	Achtergronden van het onderzoek	1
1.1.1	het organisatorische kader van het onderzoek	1
1.1.2	STS-onderwijs	2
1.1.3	rekening houden met denkbeelden van leerlingen	3
1.2	Het PLON-VWO-curriculum	5
1.2.1	'context'	5
1.2.2	de opzet van het curriculum	6
1.2.3	praktijkgerichte thema's	7
1.2.4	vakstructuurgerichte blokken	8
1.3	Reflectie op het PLON-VWO-curriculum	9
1.3.1	inleiding	9
1.3.2	kennisconstructie versus kennisoverdracht	10
1.3.3	rijk gestructureerde kennis	11
1.3.4	reflectieve attitude	11
1.3.5	sociaal aspect	12
1.3.6	niveau-karakter	12
1.3.7	afsluiting	14
1.4	Probleemstelling en onderzoeksvragen	14
1.4.1	algemene probleemstelling	14
1.4.2	toespitsing op energie	15
1.4.3	onderzoeksvragen	15
1.5	Globale opzet en uitvoering van het onderzoek	16
1.5.1	twee deelonderzoeken in twee ronden	16
1.5.2	het protocolonderzoek naar begripsontwikkeling	16
1.5.3	het vragenlijstonderzoek naar wendbaarheid	17
1.6	Indeling van dit proefschrift	18

2	Reflectie op het energiebegrip en op energieonderwijs	19
2.1	Inleiding	19
2.2	Het energiebegrip in de natuurkunde	19
2.2.1	historische wortels van het energiebegrip	19
2.2.2	het huidige klassieke energiebegrip	20
2.2.3	conceptualisaties van energie	21
2.2.4	de vier vakaspecten van 'het' natuurkundige energiebegrip	21
2.3	Energie in het schoolvak natuurkunde	22
2.3.1	'energie als behouden oorzaak/werking'	22
2.3.2	'energie als een behouden en bruikbaar iets'	24
2.3.3	'energie als een behouden mechanische grootheid'	27
2.3.4	het energiebegrip op examen-niveau	28
2.4	Energiebegrippen in de leefwereld	29
2.4.1	'energie als eigenschap van mensen'	30
2.4.2	'energie als een bruikbaar iets'	30
2.4.3	'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten'	31
2.5	Denkbeelden van leerlingen over energie	31
2.5.1	zeven 'frameworks' van Watts	32
2.5.2	ervaringen van andere onderzoekers met de 'frameworks'	33
2.5.3	de vier 'thema's' van Solomon	34
2.5.4	discussie	35
2.6	Begripsopbouw in de thema/blok-combinatie 'Energie/Arbeid en Energie'	37
2.6.1	het thema 'Energie'	37
2.6.2	het blok 'Arbeid en Energie'	42
2.7	Aandachtspunten in het eerste ronde onderzoek	45
2.7.1	voor het protocolonderzoek	45
2.7.2	voor het vragenlijstonderzoek	45
3	Het eerste ronde protocolonderzoek	47
3.1	Inleiding	47
3.2	Opzet en uitvoering van het protocolonderzoek	48
3.2.1	de keuze van scholen, leraren en leerlingen	48
3.2.2	het maken en uitwerken van geluidsopnamen	50
3.2.3	de analyse	51
3.2.4	de keuze van protocollen in dit hoofdstuk	52

3.3	Conceptualisaties bij aanvang van het thema	52
3.3.1	leerlingen over energie in taaksituaties	53
3.3.2	leerlingen over energie in valsituaties	55
3.3.3	conclusies en verdere bespreking van de begripsontwikkeling	57
3.4	Begripsontwikkeling: het eerste themahoofdstuk	57
3.4.1	taaksituaties: 'energie als een behouden en bruikbaar iets'	58
3.4.2	taaksituaties: 'energie als een bruikbaar iets'	59
3.4.3	taaksituaties: 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten'	60
3.4.4	valsituaties	61
3.4.5	terugblik op het eerste themahoofdstuk	64
3.5	Begripsontwikkeling: het tweede themahoofdstuk	65
3.5.1	taaksituaties: 'energie als een behouden en bruikbaar iets'	65
3.5.2	taaksituaties: 'energie als een bruikbaar iets'	65
3.5.3	taaksituaties: 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten'	69
3.5.4	terugblik op het tweede themahoofdstuk	73
3.6	Begripsontwikkeling: het derde themahoofdstuk	74
3.6.1	taaksituaties: 'energie als een behouden en bruikbaar iets'	74
3.6.2	taaksituaties: 'energie als een bruikbaar iets'	76
3.6.3	taaksituaties: 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten'	78
3.6.4	valsituaties	79
3.6.5	terugblik op het derde themahoofdstuk	79
3.7	Begripsontwikkeling: het blok	80
3.7.1	voortuitgang door afzien van 'bruikbaarheid' als kenmerk van energie	80
3.7.2	blokkade vanwege gebruik van het kenmerk 'bruikbaarheid'	82
3.7.3	terugblik op het blok 'Arbeid en Energie'	86
3.8	Discussie	87
3.9	Conclusies van het eerste ronde protocolonderzoek	89
3.9.1	taaksituaties: energie als 'werkingsvoorwaarde'	89
3.9.2	valsituaties: drie denkbeelden	91
3.9.3	algemeen fysische situaties: 'energie als een behouden entiteit'	91
3.9.4	algemene conclusies van het eerste ronde protocolonderzoek	91
4	Revisie van het lesmateriaal	93
4.1	Het revisieproces	93
4.1.1	de planning van het revisieproces	93
4.1.2	het feitelijk verloop van de revisie	93
4.1.3	de scholing van leraren	93

4.2	Het raamwerk van de revisie	94
4.2.1	veronderstellingen en keuzen bij de revisie	94
4.2.2	onderwijsbeelden van energie	96
4.2.3	de relatie begripsopbouw-begripsontwikkeling	97
4.3	De constructie van onderwijsbeelden	97
4.3.1	veronderstellingen over het aanvankelijke energiebegrip van leerlingen	97
4.3.2	op weg naar 'energie als een behouden en bruikbaar iets'	99
4.3.3	op weg naar 'energie als een behouden entiteit'	103
4.4	Het gereviseerde lesmateriaal	104
4.4.1	globale opzet van het thema 'Energievoorziening'	104
4.4.2	uitwerking van onderwijsbeeld 1	105
4.4.3	uitwerking van onderwijsbeeld 2	106
4.4.4	uitwerking van onderwijsbeeld 3	108
4.4.5	uitwerking van onderwijsbeeld 4	110
4.4.6	globale opzet van het gereviseerde blok 'Arbeid en Energie'	111
4.4.7	uitwerking van onderwijsbeeld 5	111
5	Het tweede ronde protocolonderzoek	113
5.1	Inleiding	113
5.2	Opzet en uitvoering van het tweede ronde protocolonderzoek	113
5.2.1	verzameling van gegevens	113
5.2.2	de protocolanalyse	115
5.3	Het functioneren van de 'Oriëntatie' van het thema 'Energievoorziening'	115
5.3.1	energie in taaksituaties	115
5.3.2	energie in valsituaties	117
5.3.3	discussie en conclusies	119
5.4	Het functioneren van onderwijsbeeld 1	119
5.4.1	onderwijsbeeld 1 in de context 'elektrische apparaten'	119
5.4.2	onderwijsbeeld 1 in de context 'centrale verwarming'	120
5.4.3	discussie en conclusies	122
5.5	Het functioneren van onderwijsbeeld 2	123
5.5.1	onderwijsbeeld 2 in de context 'verwarmen en isoleren'	123
5.5.2	onderwijsbeeld 2 in de context 'bewegen en stroomlijnen'	128
5.5.3	discussie en conclusies	129

5.6	Het functioneren van onderwijsbeeld 3	130
5.6.1	onderwijsbeeld 3 in de context 'elektrische apparaten'	131
5.6.2	onderwijsbeeld 3 in de context 'apparaten die arbeid leveren'	131
5.6.3	onderwijsbeeld 3 in de context 'verwarmingsapparaten'	133
5.6.4	onderwijsbeeld 3 in de context 'warmtemachines'	134
5.6.5	discussie en conclusies	134
5.7	Het functioneren van onderwijsbeeld 4	136
5.7.1	beginsituatie van leerlingen t.a.v. energieopslag	136
5.7.2	onderwijsbeeld 4 in de context 'energieopslag in een spaarbekken'	136
5.7.3	onderwijsbeeld 4 in de context 'energieopslag bij voertuigen'	141
5.7.4	onderwijsbeeld 4 in de context 'opslag van zonne-energie'	142
5.7.5	discussie en conclusies	143
5.8	Terugblik op het thema	144
5.8.1	het functioneren van de 'terugblik'	144
5.8.2	evaluatie van het thema aan de hand van de themaproefwerken	144
5.8.3	terugblik op het thema door de leraren	145
5.9	Het functioneren van onderwijsbeeld 5	146
5.9.1	onderwijsbeeld 5 en de relatie tussen arbeid en bewegingsenergie	146
5.9.2	onderwijsbeeld 5 en de relatie tussen arbeid en potentiële energie	147
5.9.3	onderwijsbeeld 5 en de relatie tussen arbeid, warmte en moleculaire energie	150
5.9.4	discussie en conclusies	151
5.10	Discussie en conclusies van het tweede ronde protocolonderzoek	152
5.10.1	groep A	152
5.10.2	groep B	153
5.10.3	twee kernproblemen	154
5.10.4	conclusies	154
6	Het vragenlijstonderzoek	155
6.1	Inleiding en vraagstelling	155
6.2	Opzet van het vragenlijstonderzoek	156
6.2.1	de onderzoeksvariabelen	156
6.2.2	keuze van instrument, onderzoeksgroepen en meetmomenten	158
6.2.3	analyses m.b.t. de onderzoeksvragen	159
6.2.4	analyses m.b.t. de kwaliteit van de gegevens en van de onderzoeksopzet	159
6.3	Operationalisatie van de onderzoeksvariabelen	161
6.3.1	constructie van de vragenlijst	161
6.3.2	beschrijving van de vragenlijst	162
6.3.3	berekening van waarden voor de variabelen	165

6.4	Gegevens van de deelnemende klassen	166
6.5	De kwaliteit van de vragenlijst	167
6.5.1	kwaliteit van de vragenlijstgegevens	167
6.5.2	kwaliteit van de onderzoeksopzet	169
6.6	Resultaten van het vragenlijstonderzoek: wendbaarheid	170
6.6.1	globale resultaten voor de tweede ronde	170
6.6.2	toetsing van hypothesen 2a en 2b	171
6.6.3	toetsing van hypothese 2c	173
6.7	Resultaten van het vragenlijstonderzoek: denkbeelden	176
6.7.1	denkbeeldgebruik	176
6.7.2	vergelijking met de resultaten van het protocolonderzoek	178
6.8	Conclusies van het vragenlijstonderzoek	179
7	Slotbeschouwing	181
7.1	Discussie over de opbouw van het energiebegrip	181
7.1.1	de op energie toegespitste probleemstelling	181
7.1.2	de mate waarin en de wijze waarop het curriculum geslaagd is	181
7.1.3	aanbevelingen t.a.v. de opbouw van het energiebegrip	184
7.2	Terugblik op realiteitsgericht onderwijs	185
7.2.1	de algemene probleemstelling	185
7.2.2	realiteitsgerichtheid	185
7.2.3	STS-doelstellingen en begripsontwikkeling	186
7.2.4	het thema/blok-model: praktijkgericht en vakstructuurgericht	187
7.2.5	conclusie	188
7.3	Tot slot	188
Literatuur		191
Bijlagen		199
Bijlage 1:	De inhoudsopgave van het thema 'Energie'	199
Bijlage 2:	De inhoudsopgave van het blok 'Arbeid en Energie' (1985)	200
Bijlage 3:	De inhoudsopgave van het thema 'Energievoorziening'	201
Bijlage 4:	De inhoudsopgave van het blok 'Arbeid en Energie' (1988)	202
Bijlage 5:	Vragenlijst 'Energie en Arbeid'	203
Summary		211
Curriculum Vitae		217

Woord vooraf

Dit proefschrift is, op dit woord vooraf na, in de wij-vorm gesteld. Daarin heb ik tot uiting willen brengen dat aan het onderzoek en het tot stand komen van dit boek is bijgedragen door talrijke personen.

Piet Lijnse is vanaf het begin bij het onderzoek betrokken geweest. Hij heeft het grootste deel van de begeleiding verzorgd. Met zijn kritische en scherpzinnige commentaren heeft hij mij gestimuleerd om - wat hij noemde - 'gedachten van Ton' aan te scherpen tot onderbouwde en verdedigbare interpretaties. Daarnaast heeft hij de hoofdlijn van het onderzoek bewaakt. Mijn andere promotor, Herman Hooymayers, heeft me (onder andere) geholpen bij het vinden van heldere termen en formuleringen.

Onmisbaar was ook de steun van degenen die meewerkten aan SVO-project 6085 waaruit dit proefschrift is voortgekomen. Ruurd Taconis en Frans Bormans bezochten vele lessen, werkten kilometers audioband uit en hadden een belangrijke inbreng bij de analyse ervan. Henk Bruins, Ruurd Taconis en Pieter Licht verzorgden de verwerking van de vragenlijstgegevens en droegen bij aan de interpretatie ervan.

Een andere groep die een belangrijke inbreng heeft gehad wordt gevormd door de ontwikkelaars van het lesmateriaal. Het oorspronkelijke PLON-lesmateriaal dat we gebruikt hebben is ontwikkeld door PLON-leraren (de 'schrijfgroep Nijmegen') en medewerkers van het PLON-project. Bij de revisie van het lesmateriaal heb ik een jaar lang met veel genoegen samengewerkt met Hans Poorthuis en Eric Payens. Het Project Bovenbouw Natuurkunde (PBN) bood de mogelijkheid voor deze samenwerking.

En dan de leraren. Zij gebruikten met grote inzet het experimentele lesmateriaal in de klas. Zij boden ons de gelegenheid de nodige gegevens te verzamelen door het afnemen van vragenlijsten. Ik noem hier met name de leraren die hun lessen bovendien openstelden voor het maken van audio-opnamen: Jan Brouwers, Eric Payens, Hay Verstappen, Martin van der Lee en Huib van Bergen.

Tenslotte hebben ongeveer 250 leerlingen een belangrijke bijdrage geleverd. In het bijzonder noem ik de leerlingen waarbij we bandopnamen mochten maken: Sandor, Willem-Jan, Robert, Belinda, Anita, Jeroen, Cindy, Oscar, Edward, Ronny, Henri, Paul, Simone, Elles, Jibbe, Bas, Ron, Michel.

Alle genoemde en niet genoemde mensen die aan het welslagen van het onderzoek en het tot stand komen van dit proefschrift hebben bijgedragen dank ik van harte. Mijn collega's van de Vakgroep Didactiek van de Natuurkunde dank ik omdat zij mij ontzien hebben door taken van mij over te nemen. Mieke Brekelmans dank ik voor haar adviezen over de statistische verwerking van de gegevens. Dank ook aan Rob Jamin voor zijn suggesties voor het verbeteren van het Nederlands, aan mijn

schoolcollega Diderick den Bakker voor het verbeteren van de Engelse samenvatting, aan Huib Wouterse voor de tekeningen en aan Jenny Andriese voor het verzorgen van de lay-out.

Tenslotte vermeld ik dat in de tekst de mannelijke vorm heb gebruikt waar zowel mannelijke als vrouwelijke leerlingen worden bedoeld. Dit om gekunsteld taalgebruik te vermijden.

1 Inleiding en probleemstelling

1.1 Achtergronden van het onderzoek

Dit proefschrift beschrijft een onderzoek naar het onderwijzen en leren van natuurkunde in de bovenbouw van het Voorbereidend Wetenschappelijk Onderwijs (VWO). Het onderzoek betreft een experimenteel thema/blok-curriculum waarvan de ontwikkeling is gestart in het kader van het Project Leerpakket Ontwikkeling Natuurkunde (PLON) (Eijkelhof e.a., 1986).

Het PLON-project liep van 1972 tot 1986. Het heeft het natuurkundeonderwijs voor leerlingen meer betekenisvol willen maken. Daartoe heeft het willen aansluiten bij voorkennis en interesses van leerlingen, hen actief bij de lessen willen betrekken en, wat Ten Brinke en Hooymayers (1986) noemen, een 'natuurkundige oriëntatie op de wereld' willen bieden. In samenwerking met leraren heeft het PLON voor het MAVO, de onderbouw HAVO/VWO en de bovenbouw HAVO volledige curricula ontwikkeld. In aansluiting hierop zijn er voor de bovenbouw van het VWO grote delen van een curriculum ontwikkeld door het *VWO-Bovenbouw Natuurkunde Project* (Van der Valk, 1986a; Dekker & Van der Valk, 1986). Hierin werkten het PLON en de Vakgroep Natuurkunde Didactiek van de Rijksuniversiteit te Utrecht samen met de afdelingen Natuurkunde Didactiek van de Universiteit van Amsterdam en van de Rijksuniversiteit Groningen en met schrijfgroepen van leraren. Dit *PLON-VWO-curriculum* is gemaakt op basis van een 'Experimenteel PLON Examen Programma VWO' (PLON, 1983). Het bestaat uit praktijkgerichte *thema's* en vakstructuurgerichte *blokken*. Deze curriculumstructuur is onderwerp van dit onderzoek, toegespitst op de thema/blok-combinatie 'Energie/Arbeid en Energie' (PLON, 1985a, 1986). Met deze combinatie wordt beoogd dat bij leerlingen een wendbaar energiebegrip ontstaat. Na het onderwijs met het thema 'Energie' moeten de leerlingen het energiebegrip kunnen gebruiken bij natuurkundige vraagstellingen in de context van energiegebruik en energievoorziening. Na het onderwijs met het blok 'Arbeid en Energie' moeten zij het energiebegrip ook kunnen hanteren in allerlei andere situaties.

1.1.1 het organisatorische kader van het onderzoek

Het onderzoek is uitgevoerd bij de Vakgroep Natuurkunde Didactiek van de Rijksuniversiteit Utrecht. Het is voor een belangrijk deel gefinancierd door het Instituut voor Onderzoek van het Onderwijs SVO als project 6085 onder de naam 'Begripsontwikkeling bij leerlingen in realiteitsgericht natuurkundeonderwijs'. Dit proefschrift vormt tevens het eindverslag van het SVO-project. Verder werd het onderzoek gefinancierd door genoemde Vakgroep in het kader van het Voorwaardelijke Financie-

ringsprogramma 'Begripsontwikkeling en curriculumonderzoek in de wiskunde en natuurwetenschappen'.

Het onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met een zestal VWO-scholen die (delen van) het PLON-VWO-curriculum gebruikten. Het werken met dit lesmateriaal vond plaats onder vrij moeilijke omstandigheden. Ondanks de aanzienlijke inhoudelijke veranderingen die werden uitgetest moesten de scholen toewerken naar het reguliere examenprogramma (Van Bergen, 1986). Dit in tegenstelling tot de MAVO-en HAVO-proefscholen van het PLON. Voor die scholen stemde het Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen in met het afnemen van examens die gebaseerd zijn op experimentele PLON examenprogramma's (Van Aalst, 1986; Gravenberch, 1986). Wij konden dit onderzoek uitvoeren dankzij de grote inspanningen van de betrokken leraren en hun bereidheid weer een nieuwe versie van het lesmateriaal in de klas uit te proberen.

Na beëindiging van het PLON-project in 1986 is een verdere ontwikkeling van VWO-curricula ter hand genomen door het *Project Bovenbouw Natuurkunde* (PBN) (Gravenberch e.a., 1990). Daarin werd het samenwerkingsverband tussen de partners van het VWO-Bovenbouw Natuurkunde Project uitgebreid met onder andere het Instituut voor de Leerplanontwikkeling SLO. In het PBN is voorbeeldlesmateriaal ontwikkeld dat aansluit bij het HAVO/VWO-advies van de Werkgroep Examenprogramma's Natuurkunde (WEN, 1988) en is onderzoek gedaan naar het functioneren van dit materiaal in de praktijk. Het onderzoek waarover wij in dit proefschrift rapporteren, is ingebracht in het PBN als de bijdrage vanuit de Rijksuniversiteit Utrecht. De samenwerking in het PBN heeft er onder meer toe geleid dat de PLON-thema/blok-combinatie over energie door SLO-ontwikkelaars is herschreven op grond van aanwijzingen vanuit ons onderzoek.

1.1.2 STS-onderwijs

Het PLON is beïnvloed door internationale trends in de ontwikkeling van onderwijs, in het bijzonder van het natuurkundeonderwijs. We zullen in dit hoofdstuk op twee daarvan ingaan: de trend naar meer maatschappelijk gericht onderwijs en naar aandacht voor denkbeelden van leerlingen.

In de jaren '80 is ervoor gepleit in het Voortgezet Onderwijs meer aandacht te besteden aan de wisselwerking tussen wetenschap, techniek en samenleving (ASE, 1981; NSTA, 1982; Aikenhead, 1985; Yager, 1985): het zogenaamde Science, Technology and Society-onderwijs of STS-onderwijs. Eijkelhof (1990) signaleert in deze internationale discussie over het opnemen van STS in het secundair onderwijs drie uiteenlopende doelstellingen:

- de moderne samenleving vereist van alle burgers een zeker inzicht in wetenschap en techniek omdat deze zo'n belangrijke rol spelen in ieders persoonlijk en maatschappelijk leven ("science for all");
- de belangstelling van leerlingen voor de natuurwetenschap dreigt af te nemen. Veel leerlingen vinden dat natuurwetenschap saai is en slechts bijdraagt aan negatieve zaken als vervuiling en bewapening. Dit beeld zou kunnen worden bijgesteld door meer aandacht te besteden aan de relaties tussen natuurwetenschap en samenleving;

- door meer nadruk op STS zou het natuurwetenschappelijk onderwijs beter aansluiten bij de wereld van de leerlingen. Dat zou leiden tot betere onderwijsresultaten omdat leerlingen hun kennis moeten toepassen in bekende contexten. Bovendien zouden zij daardoor bereid zijn zich meer in te zetten voor leertaken.

Eijkelfhof vindt in het algemeen weinig overeenstemming over wat STS-onderwijs zou moeten inhouden. Hij wijt dat aan de uiteenlopende doelen die in de verschillende STS-leergangen nagestreefd worden en aan het ontbreken van een traditie t.a.v. de keuze van inhouden. Ons inziens is er in ieder geval overeenstemming over het belang van aandacht voor 'de maatschappelijke energieproblematiek'. Dit onderwerp is te vinden in elke ons bekende STS-leergang. Aanvankelijk heeft de STS-trend vooral geleid tot het schrijven van lesmateriaal dat bedoeld is voor gebruik *naast* het gewone curriculum. Voorbeelden daarvan zijn de producten van 'Science in Society' (Lewis, 1981) en 'Science In a Social Context' (SISCON, Solomon, 1983a). In Nederland is de lijst van keuzeonderwerpen in het Examenprogramma Natuurkunde VWO (O&W, 1976) uitgebreid met het onderwerp 'Natuurkunde in de Samenleving' (Eijkelfhof e.a., 1981). In genoemde lesmaterialen vormt de verwevenheid tussen natuurkunde, techniek en samenleving een aanvullend toepassingsgebied voor onderwerpen die al eerder strikt natuurkundig onderwezen zijn. In de PLON-curricula daarentegen vormt de STS-inbedding geen aanvulling op natuurkundige onderwerpen, maar is het curriculum ervan doortrokken. Er zijn maatschappelijk gerichte thema's zoals 'Ioniserende Straling' en 'Automatisering' en thema's die vooral betrekking hebben op de eigen omgeving en het persoonlijk leven van de leerlingen, bijvoorbeeld 'Verkeer' en 'Muziek'. Het thema 'Energie' heeft zowel betrekking op de directe omgeving (energiegebruik in huis) als op de samenleving (de energievoorziening).

Deze betrokkenheid van natuurkunde op *praktijksituaties* uit de wereld om ons heen betekent een belangrijke verandering ten opzichte van het gangbare natuurkundeonderwijs en heeft consequenties voor de keuze van leerstof. Bij het ontwerpen van de experimentele PLON-examenprogramma's was het dan ook een belangrijk criterium of de voorgestelde onderwerpen op een voor leerlingen zinvolle en interessante manier betrokken kunnen worden op bedoelde praktijksituaties. In het noemen van deze situaties in de examenprogramma's komt tot uiting dat deze situaties ook tot de leerstof dienen te behoren (Van Genderen, 1989).

1.1.3 rekening houden met denkbeelden van leerlingen

Tegen de tijd dat leerlingen natuurkundeonderwijs krijgen, hebben ze in hun *leefwereld* reeds allerlei ideeën opgedaan over verschijnselen in natuur en techniek. Tevens hebben ze bij het omgaan met die verschijnselen termen geleerd als kracht, energie en stroom, die in de natuurwetenschappelijke schoolvakken een specifieke vakbetekenis hebben. Een aantal van deze ideeën uit de leefwereld is van groot belang voor het leren van natuurkunde. Sinds het einde van de jaren '70 zijn talrijke publicaties verschenen over het gebruik van zulke ideeën door leerlingen in het natuurwetenschappelijk onderwijs. Ze worden met diverse termen aangeduid, zoals 'preconcepties', 'misconcepties', 'common sense beliefs', 'children's science', 'voorschoolse

beelden' of 'intuïtieve ideeën'. In dit proefschrift zullen we de term *denkbeelden* gebruiken.

Onder denkbeelden over een begrip verstaan we ideeën en regels van leerlingen, die van belang zijn voor het leren van het betreffende begrip en die hun wortels (lijken te) hebben in de leefwereld.¹⁾

Aanvankelijk hebben denkbeelden vooral aandacht getrokken omdat ze tot leerproblemen kunnen leiden. We zullen in dit verband van *blokkerende* denkbeelden spreken. In de laatste jaren heeft men oog gekregen voor het feit dat er ook denkbeelden zijn waarvan het onderwijs gebruik kan maken (*productieve* denkbeelden).

Er is zowel door onderwijspsychologen (Carey, 1985; De Corte, 1990; Resnick, 1988) als door vakdidactici onderzoek gedaan naar denkbeelden. Het natuurkunde-didactisch onderzoek heeft betrekking op alle belangrijke onderwerpen uit de schoolnatuurkunde, zoals mechanica (Viennot, 1979; Van Genderen, 1989), elektriciteit (Duit e.a., 1985; Licht, 1988, 1990), radioactiviteit (Eijkelhof, 1990), licht (Andersson & Kärrqvist, 1983; Wubbels, 1986), energie (Driver & Millar, 1986; Van der Valk e.a., 1990a). Driver, Guesne en Tiberghien (1985) en een 'special issue' van het *International Journal of Science Education* (1989) bieden een overzicht van dit gebied. Het gangbare natuurkundeonderwijs blijkt in veel gevallen niet in staat te bewerkstelligen dat leerlingen natuurkundige begrippen en relaties blijvend de voorkeur geven boven bepaalde ongewenste denkbeelden. Zelfs veel universitaire natuurkundestudenten geven nog blijk van denkbeelden die op gespannen voet met de natuurkunde staan (Viennot, 1979).

Natuurkundeonderwijs dat gebruik maakt van praktijksituaties doet, meer dan het gangbare natuurkundeonderwijs, een beroep op leefwereldkennis en zal daarom ook in sterkere mate denkbeelden oproepen (Lijnse, 1986a). Of dat een voordeel of nadeel is hangt af van de vraag of het gebruik van die denkbeelden vooral bruikbare aanknopingspunten biedt of hoofdzakelijk tot begripsproblemen leidt. In ieder geval geeft dergelijk *realiteitsgericht onderwijs* de mogelijkheid verschillen tussen het 'leefwereld-denken' (Schutz & Luckmann, 1974) en het natuurkundige denken aan de orde te stellen. Solomon (1983b) heeft gevonden dat leerlingen die flexibel heen en weer kunnen denken tussen het 'leefwerelddomein' en het domein van de natuurkunde blijk geven van een beter inzicht dan leerlingen die dit niet kunnen. Veel onderzoekers op het gebied van de vakdidactiek en onderwijspsychologie pleiten voor het gebruik van betekenisvolle realistische situaties in onderwijs dat rekening houdt met denkbeelden (Driver, 1988; De Corte, 1990; Kanselaar, 1989).

Onderzoek naar denkbeelden heeft bijgedragen aan het besef dat men er in het onderwijs niet van mag uitgaan dat leerlingen "tabulae rasae" zijn (Gilbert, Osborne & Fensham, 1982) of "lege vaten waarin men a.h.w. informatie kan uitstorten" (De

1. Door deze term aan de 'leefwereld' te koppelen gebruiken we 'denkbeeld' in beperkter zin dan Van Genderen (1989, blz.89) die ook van "natuurkundige denkbeelden waarmee leerlingen op school kennis maken" spreekt.

Corte, 1990). Integendeel, leerlingen komen het onderwijs binnen met een zekere cognitieve structuur. Nieuwe ervaringen en begrippen worden daarin ingepast en geven aanleiding tot meer of minder vergaande veranderingen van die kennisstructuur (Treffers, 1990a). Door dit actieve invoegen of aanpassen nemen leerlingen aangeboden begrippen niet zonder meer over in de betekenis die in het onderwijs bedoeld is, maar construeren ze een eigen betekenis. In deze visie is leren een proces van *actieve constructie*. Het inpassen in de bestaande cognitieve structuur is vergelijkbaar met wat Piaget 'assimilatie' noemde. De verandering van kennisstructuur, die optreedt in het geval dat de nieuwe ervaringen en/of begrippen niet passen bij de bestaande cognitieve structuur van een leerling, is vergelijkbaar met Piaget's accommodatie.

Onder invloed van het onderwijs kunnen nog vage, direct aan de leefwereld gekoppelde denkbeelden verscherpt en gewijzigd worden. Dat kan een stap betekenen in de richting van de gewenste natuurkundige regel, ook al wijkt het nieuw gevormde denkbeeld daarvan nog af. Door opeenvolgende aanscherpingen en het toenemend gebruik van vaktermen kan de relatie van een denkbeeld met de leefwereld steeds meer uit het gezichtsveld verdwijnen. Het onderwijs kan daarvan gebruik maken. Om dat met succes te doen moeten nieuwe onderwijsstrategieën ontwikkeld worden die niet stoen op de gebruikelijke methode van kennisoverdracht, maar gericht zijn op 'conceptual change' (Posner e.a., 1982; Strike & Posner, 1985; Driver 1988), 'begripsontwikkeling' (Van Driel, 1990) of 'omleren' (Lijnse, 1990). De uitwerking van dergelijke strategieën vertoont echter een grote diversiteit. Treffers (1990a,b) heeft een vijftal belangrijke kenmerken voor 'ontwikkelen onderwijs' kernachtig geformuleerd. We zullen deze vijf *onderwijs/leerprincipes* in §1.3 gebruiken om terug te kijken op leren en onderwijzen in het PLON-VWO-curriculum.

1.2 Het PLON-VWO-curriculum

1.2.1 'context'

In beschrijvingen van het PLON-VWO-curriculum en andere PLON-curricula wordt de term context veel gebruikt. Van Genderen (1989) heeft 'context' als volgt omschreven: "de contexten van een natuurkundige regel zijn de situaties waarop deze regel wordt betrokken". Met de term 'regel' worden begrippen en relaties tussen begrippen bedoeld. Met deze omschrijving betreft Van Genderen de term 'context' op de te leren inhouden. Vanuit het perspectief van de leerlingen schuilt hier een probleem. Het spreekt niet vanzelf dat leerlingen de te leren begrippen en relaties op de situaties betrekken zoals door het onderwijs bedoeld is. Het is mogelijk dat voorgelegde situaties voor leerlingen geen context vormen van de regels die door de leraar of het lesmateriaal bedoeld zijn. Ook is het mogelijk dat ze context worden van andere dan de bedoelde regels. Voor ons is dat de reden om een wijziging in de formulering van Van Genderen voor te stellen:

de contexten van een natuurkundige regel zijn de situaties waarop de leerlingen de regel in onderwijs dienen te betrekken.

Deze formulering sluit aan bij de wijziging die Eijkelhof (1990) voorstelt. De termen praktijkcontext, schoolcontext en contextgebied van Van Genderen kunnen we nu overnemen. *Praktijkcontexten* zijn praktijksituaties uit natuur, maatschappij, techniek of wetenschap. *Schoolcontexten* zijn speciaal voor het onderwijs geconstrueerde situaties. Met een *contextgebied* bedoelen we, met Van Genderen, een verzameling van praktijkcontexten in het onderwijs die (door de materiaalontwikkelaar en/of de leraar) niet alleen vanuit de werkelijkheid, maar ook vanuit de natuurkunde als samenhangend gezien kunnen worden, zoals 'verkeer' en 'energiegebruik in huis'.

1.2.2 de opzet van het curriculum

Aan de basis van het PLON-VWO-curriculum voor 4, 5 en 6VWO ligt het Experimenteel PLON Examenprogramma voor VWO (PLON, 1983). Als algemene onderwijsdoelen voor het VWO worden daarin genoemd:

- a. de persoonlijke ontwikkeling van de leerling tot zelfstandig en mondig burger;
- b. de kennismaking met het kennisbestand van de wetenschap, met wetenschapsbeoefening en met de toepassing van wetenschap;
- c. de scholing van de leerling voor beroep en vervolgstudie.

Op grond van deze doelstellingen heeft de projectgroep een aantal vernieuwingen ten opzichte van het gebruikelijke VWO-onderwijs nagestreefd. Twee daarvan zijn voor het onderhavige onderzoek van belang.

De eerste vernieuwing behelst dat de doelstellingen a. en b. een gelijkwaardige plaats moeten krijgen naast doelstelling c., die naar de mening van het PLON in het gangbare natuurkundeonderwijs te eenzijdig wordt benadrukt. Daartoe hebben de opstellers van het experimentele PLON-VWO examenprogramma een inventaris gemaakt van belangrijk geachte en naar verwachting voor leerlingen interessante contextgebieden. In de uitwerking van het programma in lesmateriaal wordt in *thema's* op een natuurkundige manier gekeken naar praktijksituaties uit zo'n gebied. Aan de hand van deze praktijksituaties worden natuurkundige begrippen en relaties aan de orde gesteld. We spreken van *praktijkgericht* onderwijs.

De tweede vernieuwing betreft het aanbrengen van een onderscheid tussen begrippen die in hoofdzaak praktijkgericht gebruikt behoeven te worden en begrippen waarover leerlingen met een grote mate van wendbaarheid in allerlei contextgebieden moeten kunnen beschikken. In het Experimentele PLON Examenprogramma VWO wordt hierover gezegd:

Een aantal basisbegrippen van de natuurkunde is relevant in veel of zelfs alle gebieden. Van deze begrippen moet dus een hoge mate van wendbaarheid van VWO-leerlingen geëist worden. Verwacht mag worden dat de wendbaarheid vergroot wordt als leerlingen de begrippen in veel verschillende gebieden tegenkomen en bovendien als de onderlinge samenhang van de begrippen benadrukt wordt. Daarom worden deze begrippen en hun onderlinge samenhang in *groepen systematische natuurkunde* bijeengezet.

Voorbeelden van deze 'groepen systematische natuurkunde' in het Experimentele PLON-VWO Examenprogramma zijn 'mechanica' en 'energie'. Voor de term 'wendbaarheid' wordt in dat examenprogramma verwezen naar Van Parreren (1974):

"wij noemen een handelingsstructuur wendbaar als degenen die over die handelingsstructuur beschikt, ook in staat is allerlei andere handelingen uit te voeren".

Bij de uitwerking van het examenprogramma in lesmateriaal is deze vernieuwing vooral vormgegeven in zogenaamde *blokken*. Daarin wordt het bereiken van wendbaarheid nagestreefd door speciale aandacht voor de samenhang tussen de begrippen uit deze groepen systematische natuurkunde en door toepassing in een variatie aan praktijksituaties. Omdat het in blokken gaat om de samenhang van begrippen in de natuurkundige vakstructuur² spreken we van *vakstructuurgericht* onderwijs.

1.2.3 praktijkgerichte thema's

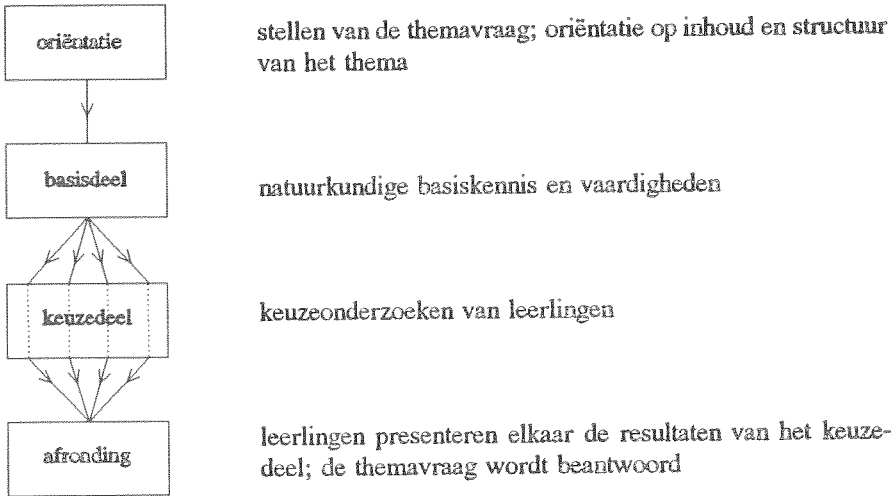
Thema's zijn lessenseries van ongeveer 20 lessen waarvan de inhoud betrekking heeft op een bepaald contextgebied. Om een contextgebied af te bakenen en op de natuurkunde te betrekken wordt een *themavraag* geformuleerd (Van der Valk, 1986b) waarop met behulp van de leerstof uit het thema een antwoord kan worden gevonden. De themavraag vormt aldus een selectie criterium voor begrippen, relaties en praktijksituaties in het thema. Het praktijkgerichte karakter van thema's heeft een drietal functies. De eerste betreft de STS-doelstelling van het PLON-onderwijs: een natuurkundige oriëntatie op de wereld. De tweede functie is het wekken van interesse bij de leerlingen en het motiveren tot leeractiviteiten. De derde functie is aansluiten bij de cognitieve structuur van de leerlingen.

In de 'Oriëntatie', het begindeel van een thema (zie figuur 1-1), worden kennis en ervaringen rond het betreffende contextgebied opgeroepen en wordt de themavraag geïntroduceerd. Hier wordt aangesloten bij de betekenis(sen) die begrippen hebben in het dagelijks leven of die de leerlingen kennen uit de onderbouw.

Het dan volgende 'Basisdeel' is gericht op het verwerven van natuurkundige basiskennis en vaardigheden. Daartoe doen de leerlingen in groepen experimenten en maken ze opgaven over praktijksituaties. De resultaten worden door leerlingen aan elkaar gepresenteerd en klassikaal besproken.

Daarna werken de leerlingen gedurende enkele lessen groepsgewijs aan een keuzeonderzoek waarin zij dieper ingaan op een aspect van de themavraag. In de 'Afronding' tenslotte presenteren zij de resultaten van de keuzeonderzoeken aan elkaar. Er wordt dan teruggekeken op het thema, onder andere door de themavraag te beantwoorden.

2. We bedoelen hier de academische vakstructuur die in het VWO gebruikt wordt voor "de benadering van de leerling als toekomstig onderzoeker" (De Vos en Verdonk, 1991).



Figuur 1-1: Algemene structuur van een thema uit het PLON-VWO-curriculum

1.2.4 vakstructuurgerichte blokken

Blokken zijn lessenseries van 15 à 25 lessen waarvan de inhoud geordend is volgens de natuurkundige vakstructuur. De inhoud wordt geplaatst in praktijksituaties uit allerlei gebieden. In blokken wordt voortgebouwd op thema's, meestal op één thema in het bijzonder. Met zo'n thema vormt een blok dan een thema/blok-combinatie. In het VWO-curriculum zijn drie blokken uitgewerkt: 'Bewegingen', 'Arbeid en Energie' en 'Deeltjes in Velden'. In een blok worden één of meer basisbegrippen 'verdiept en verbreed' (Van der Valk, 1986a). Het verdiepen betreft het uitwerken van relaties met andere begrippen en het aanleren van fysisch/mathematische technieken als vector-rekening of het opstellen van bewegingsvergelijkingen. Verbreden houdt in dat een breed scala van praktijksituaties tot context van het basisbegrip wordt gemaakt, vooral situaties waarop het begrip nog niet eerder in het onderwijs is betrokken. Een blok bestaat uit een 'Oriëntatie' waarin basisbegrippen uit het voorafgaande thema worden opgehaald en een vooruitblik gegeven wordt op de leerstof van het blok. Dan volgt een aantal hoofdstukken met theorie en opgaven over de leerstof. Bij de behandeling daarvan worden klassikale werkvormen afgewisseld met groepswork. Elk hoofdstuk eindigt met een aantal uitgebreide opgaven over praktijksituaties waarin leerlingen de leerstof moeten toepassen en moeten terugkijken naar de manier waarop ze de vraagstukken hebben opgelost.

1.3 Reflectie op het PLON-VWO-curriculum

1.3.1 Inleiding

Bij het ontwerpen van het curriculum is niet uitgegaan van een bepaalde theorie over leren en onderwijzen noch van een expliciet geformuleerde visie daarop. De lesmateriaalontwikkelaars zijn pragmatisch aan het werk gegaan en hebben, op grond van uiteenlopende literatuur, van onderlinge discussies en vooral van ervaringen op proefscholen, gekozen voor een aantal curriculumkenmerken:

- *leren door zelf doen en leren in context*: kennis wordt zowel verweven met eigen ervaringen (door leerlingen bijvoorbeeld proeven te laten doen) als met rijke contexten door praktijksituaties in het onderwijs te betrekken;
- *oriënteren, kiezen en afsluiten*: er zijn momenten in het curriculum ingelast waarop leerlingen vooruitkijken op wat ze (willen) gaan leren, kiezen voor bepaalde onderwerpen of leerwijzen en terugblikken op wat ze geleerd hebben;
- *leren van en met elkaar*: leerlingen werken samen aan opdrachten en zij verzorgen rapportages aan medeleerlingen;
- *aandacht voor de opbouw van begrippen*: bijvoorbeeld van concreet naar formeel, van praktijkgericht naar vakstructuurgericht.

Wierstra (1990) heeft evaluatieonderzoek gedaan naar het eerste en het derde kenmerk. Hij ging na in hoeverre leerlingen de PLON-MAVO- en HAVO-curricula 'leefwereldgericht' en 'participatiegericht' vonden. Omdat het PLON-project ten einde liep toen het VWO-curriculum werd ontwikkeld is zulk onderzoek voor dat curriculum niet gedaan. Tegen het einde van het PLON-project is vakdidactisch onderzoek gestart naar denkbeelden bij leerlingen in PLON-onderwijs. Van Genderen (1989) heeft onderzocht in hoeverre in het PLON-thema 'Verkeer' voor 4HAVO en 4VWO voldoende rekening wordt gehouden met denkbeelden van leerlingen over mechanica. Eijkelhof (1990) heeft zich gericht op het PLON-thema 'Ioniserende Straling' voor 5HAVO en 5VWO. Hij heeft onder andere onderzocht in hoeverre denkbeelden over radioactiviteit een belemmering vormen voor het bereiken van de STS-doelstelling van dat thema, te weten het inschatten van risico's in stralingssituaties. Lijnse (1986a) heeft een onderzoek gedaan naar het gebruik van denkbeelden door leerlingen van 4HAVO rond het PLON-thema 'Energie en Kwaliteit'.

Ons onderzoek sluit bij deze onderzoeken aan maar richt zich nadrukkelijker op het onderwijsleerproces in relatie tot de structuur van het curriculum. Daarom proberen we in deze paragraaf de impliciete visie op het onderwijsleerproces van de VWO-ontwikkelaars te verhelderen. Aan de hand van de vijf onderwijs/leerprincipes van Treffers³⁾ (1990a) kijken we terug op het PLON-VWO-curriculum.

3. Waar Treffers verwijst naar zijn onderwerp, het vak rekenen op de basisschool, hebben wij algemenere termen gebruikt.

1.3.2 kennisconstructie versus kennisoverdracht

Bij het ontwikkelen van het PLON-VWO-curriculum is slechts gedeeltelijk uitgegaan van het eerste leer- en onderwijsprincipe dat Treffers noemt. Dat 'constructieprincipe' houdt in dat nieuwe kennis door de lerende zelf wordt geconstrueerd. Het onderwijs zal dit principe moeten respecteren en benutten.

In het PLON-lesmateriaal wordt de aanwezigheid van een 'cognitieve structuur' bij leerlingen verondersteld. Die wordt in belangrijke mate bepaald door ervaringen uit het dagelijks leven, met name door 'voorschoolse beelden' (Gravenberch & Wubbels, 1980) of 'straatbeelden' (Lijnse, 1982). Er wordt vanuit gegaan dat leerlingen nieuwe begrippen kunnen overnemen zoals ze in het lesmateriaal bedoeld zijn. Een voorwaarde daarbij is dat er op een goede manier bij de cognitieve structuur wordt aangesloten en er geen stappen in de redenering ontbreken. Dat probeerde men in de 'Oriëntatie' van een PLON-lessenserie te bereiken, zowel door 'leefwereldkennis' over de gebruikte praktijksituaties op te roepen als door aandacht te besteden aan mogelijke denkbeelden van leerlingen. Naarmate het Project vorderde werd daar meer nadruk op gelegd (Van der Valk, 1986b). Ook de inhoudelijke aansluiting tussen de lessenseries kreeg bij de ontwikkeling van het PLON-VWO-curriculum steeds meer aandacht. Dat kwam enerzijds voort uit het inzicht dat begrippen in lesmaterialen niet zelden in verschillende betekenissen gebruikt worden, anderzijds uit de noodzaak tot inhoudelijke coördinatie van de producten van de verschillende schrijfgroepen van leraren (Verhagen, 1986). Het één en ander komt naar voren in een verslag van een PLON-VWO-conferentie (PLON, 1984):

Er zijn nu een aantal thema's af. Die zijn vrij sterk op zichzelf ontwikkeld. De vraag is: hoe sluiten ze op elkaar aan?

De *begripsontwikkeling* door de thema's heen moet in kaart gebracht worden. Zit er bijvoorbeeld een logische didactische lijn in de *opbouw van begrippen* zoals snelheid, kracht, energie, arbeid, stroom, spanning enz? En vallen er ook geen gaten: belangrijke begrippen die in een thema bekend verondersteld worden zonder dat ze ervoor aan de orde geweest zijn? (onze *cursivering*)

In deze passage worden de termen 'begripsontwikkeling' en 'begripsopbouw' door elkaar gebruikt. Tijdens dezelfde conferentie werd een artikel van Roest (1968) door een leraar aan de orde gesteld. Daarin heeft de term 'begripsontwikkeling' betrekking op de verandering van begrippen bij leerlingen. De discussie over dat artikel kwam destijds niet van de grond. Achteraf gezien kan de verwarring over de term begripsontwikkeling daarvan de oorzaak geweest zijn. In deze studie zullen we de term *begripsopbouw* uitsluitend gebruiken voor de wijze waarop begrippen in het onderwijs worden aangeboden, dus inclusief de opbouw in lesmateriaal. Met de term *begripsontwikkeling* bedoelen we de veranderingen in betekenis van een begrip bij leerlingen. De lesmateriaalontwikkelaars en leraren verwachtten geen groot verschil tussen begripsopbouw en begripsontwikkeling. Ze veronderstelden immers dat de leerlingen de begrippen in de door hen bedoelde zin overnemen en dat dus de begripsontwikkeling parallel verloopt met de begripsopbouw.

1.3.3 rijk gestructureerde kennis

Het tweede leer- en onderwijsprincipe van Treffers zegt: "het onderwijs moet rijke, welgeordende kennisstructuren bij de lerende ontwikkelen. Dat wil zeggen vakkennis die hecht geïntegreerd is, kennis die correspondeert met de kennis van experts en die verbonden is met alle mogelijke toepassingen in de realiteit en binnen de vakstructuur zelf."

In het PLON-VWO-curriculum wordt 'rijke structurering' nagestreefd door leerlingen veel ervaringen rond begrippen te bieden, onder andere via leerlingproeven en vooral door het gebruik van praktijksituaties. Freudenthal (1990) heeft kritiek geuit op de beperking tot één contextgebied in de thema's van het PLON. Er kan zo niet geoefend worden in het flexibel heen en weer schakelen tussen verschillende thema's, er worden 'oogkleppen' opgezet. Met andere woorden: er wordt niet tegemoet gekomen aan de eis van Treffers dat *alle mogelijke* toepassingen aan de orde komen. Deze 'oogkleppen' vinden we inderdaad in de thema's, maar niet in de blokken. Dat hangt onder andere samen met de STS-doelstelling die met name in de thema's wordt nagestreefd. In de blokken komen daarentegen praktijksituaties uit velerlei contextgebieden aan de orde, net zoals in het 'realistisch wiskundeonderwijs' dat Freudenthal voorstaat.

Treffers stelt bij dit tweede leer- en onderwijsprincipe ook dat kennis verbonden moet worden met toepassingen binnen de vakstructuur. De natuurkundige vakstructuur omvat niet alleen begrippen en relaties, maar ook allerlei 'geïdealiseerde situaties' waarin afgezien wordt van 'storende effecten' zoals het optreden van wrijving, elektrische weerstand of 'weglekken' van warmte. Het gangbare natuurkundeonderwijs besteedt veel aandacht aan deze geïdealiseerde situaties, bijvoorbeeld aan de 'wrijvingsloze beweging'. De leerling kan daardoor de indruk krijgen dat natuurkunde niet van toepassing is op de realiteit om hem heen. In het PLON is geprobeerd deze indruk te vermijden door steeds uit te gaan van praktijksituaties.

Van Genderen (1989, blz.193) betwijfelt of het opnemen van blokken in een VWO-curriculum noodzakelijk is. Belangrijke begrippen zullen ook in een goed geconstrueerd thema veel aandacht krijgen en naarmate ze in meer thema's voorkomen zullen ze meer wendbaar worden. Niettemin geeft Van Genderen toe (blz.206): 'thematische mechanica betekent inderdaad een beperking in contexten en minder wendbaarheid'. Maar hij voegt daar aan toe 'een belemmering van begrip hoeft dat niet te zijn'. Naar onze mening heeft Van Genderen onvoldoende oog voor het verschil tussen de praktijkgerichte en vakstructuurgerichte doelstellingen van het curriculum. Als er geen aandacht wordt besteed aan een vakstructuurgerichte begripsopbouw kunnen contextgebonden betekenissen naast elkaar ontwikkeld worden zonder integratie tot één vakstructuurgericht begrip.

1.3.4 reflectieve attitude

Het derde leer- en onderwijsprincipe van Treffers luidt: "het onderwijs zou een reflectieve attitude bij de lerende moeten opwekken. Deze moet het mogelijk maken dat de leerlingen hun eigen denkproces controleren en reguleren, kortom hun strategische kennis inzetten om problemen op te lossen."

In het PLON-VWO-curriculum vinden we hier en daar activiteiten die op het verwerven van een reflectieve attitude gericht zijn. Als voorbeelden noemen we de oriëntatie en de terugblik op het thema aan de hand van de themavraag, het schatten van waarden alvorens ze te meten (bijvoorbeeld bij het meten van het rendement van een apparaat) en het terugblikken op gevonden oplossingen in het blok. Er wordt echter nauwelijks gebruik gemaakt van gestructureerde 'metacognitieve' vaardigheden waarvoor veel onderzoekers pleiten (De Corte, 1989), zoals het maken van 'concept maps' (Novak, 1989) en het maken van posters (CLIS, 1987). Dientengevolge zijn de oriëntatie en de terugblik in het PLON-VWO-lesmateriaal in het algemeen onvoldoende helder uitgewerkt, hetgeen kan verklaren waarom leraren er betrekkelijk weinig aandacht aan besteden.

1.3.5 sociaal aspect

Dit vierde leer- en onderwijsprincipe zegt: "leren is niet louter een solo-activiteit, maar mede een sociale bezigheid, waarvan het interactieve karakter in het onderwijs tot uitdrukking moet komen". Van Driel (1990) spreekt in dit verband van het omvormen van persoonlijke kennis tot publieke kennis, Driver (1988) heeft het over 'onderhandelen over betekenissen'.

In het PLON is veel aandacht besteed aan het realiseren van 'leren met en van elkaar' door middel van groepswork en presentaties aan de klas, want (Pelupessy, 1986):

- leren met en van elkaar ontwikkelt de eigen verantwoordelijkheid;
- leren van en met elkaar bevordert het opnemen en verwerken van de leerstof.

Kortland en Van der Loo (1986) vinden bovendien leren met en van elkaar een doel op zich omdat in de maatschappij veel 'teamwork' vereist wordt. In het VWO-curriculum is 'leren met en van elkaar' hoofdzakelijk beperkt tot de werkvorm groepswork. Het presenteren van resultaten door leerlingen aan elkaar levert in de praktijk problemen op. Het kost de leraar veel leestijd de natuurkundige 'fouten' die leerlingen in hun presentatie naar voren brengen, in discussie met de leerlingen te 'corrigeren'. Zo'n discussie verloopt niet altijd bevredigend voor leraar en leerlingen. Daarom gebruiken veel PLON-leraren deze werkvorm minder dan bedoeld. Ze beperken zich tot het uitleggen van het 'juiste' antwoord. De achtergrond daarvan is echter dat de 'fouten' voortkomen uit denkbeelden die op gespannen voet staan met de natuurkunde en die zich niet zomaar laten wegnemen. Soortgelijke problemen spelen ook in andere curricula waarin leren met en van elkaar in de praktijk wordt gebracht (Driver, 1988).

Het werken in groepen in PLON-VWO biedt de mogelijkheid het proces van actieve constructie van begrippen te volgen. Daarvan hebben we in ons onderzoek dankbaar gebruik gemaakt.

1.3.6 niveau-karakter

Dit leer- en onderwijsprincipe zegt: "in het leerproces kunnen verschillende niveau's worden onderscheiden tussen informeel, contextgebonden en formeel vaksystematisch opereren". Niveau's onderscheiden zich van elkaar door een verschil in kennisstruc-

tuur (Treffers, 1990b). Begripsontwikkeling bij leerlingen betreft de verandering van de kennisstructuur waarin het begrip is opgenomen. Het begrip verandert daarmee van betekenis (Van Hiele, 1973). In de literatuur wordt gediscussieerd over de vraag in hoeverre een 'niveau-overgang' een proces betreft waarin een tamelijk discontinue verandering in betekenis optreedt (Ten Voorde, 1977) of een proces dat zich over een langere termijn uitstrekt en waarin eerder sprake is van verschuivingen dan van plotselinge veranderingen (Treffers, 1986).

Bij de overgang van een praktijkgericht thema naar een vakstructuregericht blok is sprake van een verandering van netwerk waarin behandelde begrippen opgenomen worden. Dat hebben we schematisch weergegeven in figuur 1-2. In een thema is sprake van praktijksituaties die samenhangen in een contextgebied (voorgesteld door de linker cirkel in figuur 1-2a) en van begrippen die samenhangen vanuit de vakstructuur (de rechter cirkel in figuur 1-2a). De praktijksituaties zijn zodanig geselecteerd dat de natuurkundige begrippen erop van toepassing zijn en omgekeerd. Dit wordt voorgesteld door de dubbele pijl tussen beide cirkels in figuur 1-2a. In het thema zijn de natuurkundige begrippen nog contextgebonden 'ingekleurd': hun betekenis wordt niet alleen door hun onderlinge samenhang, maar ook door binding aan het contextgebied bepaald. We zullen dit een *praktijkgerichte begripsopbouw* noemen.

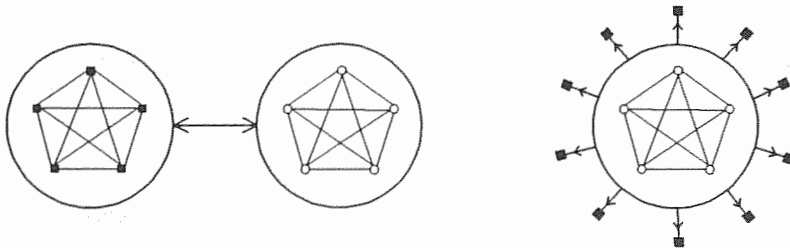
a. thema

in een contextgebied samenhangende praktijksituaties

samenhangende begrippen uit de vakstructuur

b. blok

in de vakstructuur samenhangende natuurkundige begrippen toegepast op 'losse' praktijksituaties



Figuur 1-2: Het gebruik van praktijksituaties in het thema en het blok. De vierkantjes stellen praktijksituaties voor, de rondjes staan voor begrippen en de lijntjes staan voor relaties.

In een blok wordt de contextgebondenheid verlaten. De betekenis van begrippen wordt niet langer mede bepaald door de praktijksituaties waarop ze betrokken worden, maar slechts door hun onderlinge relaties ('decontextualisering', zie figuur 1-2b). Dit netwerk ontstaat door abstractie uit de veelheid van praktijksituaties waarin juist het vakstructurele netwerk het gemeenschappelijke is. Deze begripsopbouw zullen we aanduiden als een *vakstructuregerichte begripsopbouw*. Het op een niveaustructuur gelijkende kenmerk van een thema/blok-combinatie bestaat dus, samenvattend,

daaruit, dat in het thema de stap van 'de leefwereld' naar het contextgebonden gebruik van vakbegrippen gezet wordt. In het blok wordt overgestapt naar het decontextualiseren van de vakbegrippen.

1.3.7 afsluiting

De kenmerken van het PLON-VWO-curriculum sluiten dus gedeeltelijk aan bij de vijf onderwijs/leerprincipes van Treffers, het meest bij de principes 'rijkgestructureerde kennis' en 'sociaal aspect', terwijl er ook een zekere niveauctuur in te herkennen is. Het curriculum is niet op de eerste plaats vanuit het perspectief van het leren van de leerlingen, maar vanuit het vormgeven van nieuwe onderwijsdoelstellingen ontwikkeld. Niettemin biedt het door zijn realiteitsgerichtheid en nadruk op leerlingactiviteiten naar verwachting leerlingen voldoende ruimte om de aangeboden kennis te integreren in hun bestaande cognitieve structuur. Het een en ander betekent dat het curriculum een geschikt uitgangspunt biedt voor onderzoek naar de begripsontwikkeling bij leerlingen met het oog op het verbeteren van onderwijs.

1.4 Probleemstelling en onderzoeksvragen

1.4.1 algemene probleemstelling

Het beschreven PLON-VWO-curriculum is een voorbeeld van een breder streven om in het natuurkundeonderwijs gebruik te maken van realistische situaties. In Nederland (Hooymayers, 1986; O&W, 1988, 1989a; Hooymayers e.a. 1989), en ook in diverse andere landen (Engeland, Australië), heeft dat streven naar realiteitsgericht onderwijs zelfs gevolgen gehad voor de examenprogramma's natuurkunde voor het secundair onderwijs. Eenzelfde tendens zien we in verwante vakken als wiskunde (De Lange, 1987) en biologie (Westerhout, 1990). In de voorstellen voor Eindtermen voor de Basisvorming (O&W, 1989b) is deze tendens zelfs voor allerlei vakken herkenbaar.

Realiteitsgericht onderwijs brengt met zich mee dat de samenhang in de leerstof niet alleen wordt bepaald door de vakstructuur maar ook door het contextgebied dat aan de orde komt. In welke mate beide structuren benadrukt moeten worden hangt af van onderwijsdoelstelling, leerjaar en onderwijstype. Voor het schoolvak natuurkunde in de bovenbouw van het VWO is in ieder geval inzicht in de vakstructuur vereist, onder andere vanwege een wendbare beheersing van begrippen.

Dit roept de vraag op hoe realiteitsgericht onderwijs enerzijds kan voldoen aan de praktijkgerichte doelstelling en anderzijds kan helpen inzicht te krijgen in de vakstructuur. In het PLON-VWO-curriculum is een thema/blokmodel ontwikkeld, waarin deze beide aspecten worden nagestreefd. Als een curriculum volgens dit thema-/blok-model succesvol is voor het vak natuurkunde in het VWO, is het wellicht ook van waarde voor andere schooltypen en voor andere vakken. Dat leidt ons tot de algemene probleemstelling van dit onderzoek:

In welke mate en op welke wijze slaagt een realiteitsgericht natuurkundecurriculum, ingericht volgens het thema/blokmodel, er in zowel een praktijkgerichte als een vakstructuurgerichte begripsontwikkeling bij leerlingen te realiseren?

1.4.2 toespitsing op energie

Om deze algemene probleemstelling met voldoende diepgang te kunnen uitwerken was beperking tot één thema/blok-combinatie nodig. Hiervoor is in deze studie de thema/blok-combinatie 'Energie/Arbeid en Energie' (PLON, 1985/1986) gekozen. Het feit dat energie zowel een kernbegrip is in de natuurkunde als een belangrijk maatschappelijk begrip was bepalend voor deze keuze. De probleemstelling van het onderzoek, toegespitst op het energiebegrip, luidt:

In welke mate en op welke wijze slaagt een thema/blok-combinatie over energie erin zowel een praktijkgerichte als een vakstructuurgerichte ontwikkeling van het energiebegrip bij leerlingen te realiseren?

1.4.3 onderzoeksvragen

Om na te gaan in hoeverre de thema/blok-structuur succesvol is richten we ons onderzoek zowel op het proces van begripsontwikkeling bij leerlingen als op het resultaat ervan, de wendbaarheid waarmee leerlingen het energiebegrip⁴⁾ uiteindelijk kunnen gebruiken. Het onderzoek naar het energiebegrip bij leerlingen dat tot nu toe in de literatuur gerapporteerd wordt heeft hoofdzakelijk betrekking op het gebruik van denkbeelden door leerlingen op een zeker *moment* vóór, tijdens of na onderwijs. Dergelijk onderzoek geeft wel inzicht in de aard en de mate van het gebruik van denkbeelden, maar het biedt geen perspectief voor het gebruik maken van productieve en het wegnemen van blokkerende denkbeelden. In onderzoek van wiskunde- en scheikundeonderwijs is echter gebleken dat gedetailleerd bestuderen van het begripsontwikkelingsproces wel zo'n perspectief biedt (Ten Voorde, 1977; Streefland, 1988; Van Driel, 1990; Vogelesang, 1990). De eerste onderzoeksvraag betreft daarom het verkrijgen van inzicht in het proces van begripsontwikkeling in relatie tot het gegeven onderwijs:

- 1 *Op welke wijze vindt tijdens het betreffende onderwijs een ontwikkeling van het energiebegrip bij leerlingen plaats en in hoeverre kan deze beschreven worden als een opeenvolging van een praktijkgerichte en een vakstructuurgerichte begripsontwikkeling?*

Het proces van begripsontwikkeling bij leerlingen komt in zijn zuiverste vorm naar voren in onderwijsleergesprekken in groeps- en klasverband (De Vos, 1985; Lochhead, 1979). De begripsontwikkeling bij leerlingen kan om praktische redenen slechts gevolgd worden in enkele groepen van samenwerkende leerlingen.

De wendbaarheid waarmee leerlingen het energiebegrip kunnen gebruiken kan voor grotere groepen gemeten worden. Deze wendbaarheid hangt niet alleen af van de betekenis die het energiebegrip voor leerlingen heeft gekregen, maar ook van bijvoorbeeld de beheersing van wiskundige vaardigheden. In dit onderzoek bepalen we ons echter tot de mate waarin de wendbaarheid beperkt wordt door (van de schoolna-

4. Aanvankelijk (Van der Valk en Lijnse, 1986) richtten we ons ook op het arbeidsbegrip. Vanwege de noodzaak ons te beperken hebben we dat begrip uiteindelijk slechts meegenomen voor zover dat voor het energiebegrip vereist is.

tuurkunde afwijkende) betekenissen die het energiebegrip voor leerlingen kan hebben. Probleemstellingen die een kwalitatieve redenering vereisen roepen antwoorden op waaruit de gebruikte betekenis het beste blijkt (Brook & Driver, 1984; Lijnse, 1986b). We omschrijven de *kwalitatieve wendbaarheid* waarmee het energiebegrip beheerst wordt als de mate waarin leerlingen correcte kwalitatieve redeneringen over energie kunnen herkennen en produceren. We verwachten na het thema een beperkte en na het blok een grote mate van kwalitatieve wendbaarheid. De tweede onderzoeksvraag luidt nu:

- 2 *In welke mate verandert de kwalitatieve wendbaarheid waarmee de leerlingen het energiebegrip gebruiken tijdens het thema respectievelijk het blok?*

We verwachten dat zowel de begripsontwikkeling als de bereikte kwalitatieve wendbaarheid beperkt wordt door het gebruik van sommige denkbeelden. Zowel in gesprekken in de klas als in de antwoorden op kwalitatieve vragen kan het gebruik van denkbeelden door leerlingen tot uiting komen. Het optreden van denkbeelden kunnen we dus gebruiken om een relatie te leggen tussen beide deelonderzoeken:

- 3 *In hoeverre kunnen de gemeten veranderingen in kwalitatieve wendbaarheid verklaard worden door verandering in het gebruik van denkbeelden over energie en aldus in verband gebracht worden met de waargenomen begripsontwikkeling tijdens het onderwijs?*

1.5 Globale opzet en uitvoering van het onderzoek

1.5.1 twee deelonderzoeken in twee ronden

Het hier gerapporteerde onderzoek kende twee ronden, elk met twee deelonderzoeken: een 'protocolonderzoek' naar de ontwikkeling van het energiebegrip bij leerlingen en een 'vragenlijst-onderzoek' naar de verandering van kwalitatieve wendbaarheid waarmee leerlingen het energiebegrip gebruiken.

Het eerste ronde onderzoek was oriënterend van aard en betrof het onderwijs met de PLON-thema/blok-combinatie 'Energie/Arbeid en Energie'. Het werd uitgevoerd in drie klassen aan twee scholen in de schooljaren 1986/87 en 1987/88. Op grond van de resultaten uit de eerste ronde is het lesmateriaal in de periode 1987-1988 gereviseerd tot de thema/blok-combinatie 'Energievoorziening/ Arbeid en Energie' (Poorthuis, Payens en Van der Valk, 1988a,b).

Het tweede ronde onderzoek evalueerde het onderwijs dat aan de hand van het gereviseerde lesmateriaal gegeven werd. In de schooljaren 1987/88 en 1988/89 zijn bij het vragenlijstonderzoek negen klassen van vijf scholen betrokken geweest, waarvan twee klassen van twee scholen ook aan het protocolonderzoek deelnamen. De betrokken leraren hadden een nascholingscursus over het gereviseerde lesmateriaal gevolgd.

1.5.2 het protocolonderzoek naar begripsontwikkeling

Het protocolonderzoek betreft het proces van begripsontwikkeling tijdens het onderwijs in enkele groepen van samenwerkende leerlingen. De gesprekken die deze leer-

lingen tijdens het onderwijs met elkaar en met de leraar voerden zijn op audioband opgenomen en tot protocollen uitgewerkt. Door protocolanalyse (Ten Voorde, 1977; Van Driel, 1990) is vastgesteld hoe betekenissen veranderen waarmee leerlingen het energiebegrip gebruiken. We hebben geprobeerd een verband te leggen tussen de gebruikte betekenissen en belangrijke kenmerken van de onderwijssituatie, met name de begripsopbouw in het lesmateriaal en de begripsopbouw in het feitelijke onderwijs. De begripsopbouw in het lesmateriaal wordt beschreven als de opeenvolging van betekenissen waarin het energiebegrip in het lesmateriaal wordt gebruikt. De begripsopbouw in het feitelijke onderwijs wordt verkregen door aanvullende protocolanalyse van opgenomen klasgesprekken.

Bij de ontwikkeling van het tweede ronde lesmateriaal is rekening gehouden met het feit dat de betekenis waarin leerlingen een begrip opvatten kan afwijken van de betekenis in de natuurkunde. Het gereviseerde lesmateriaal is gericht op een stapsgewijze verschuiving in betekenis in de richting van de (school)vakbetekenis wat betreft energie en aanverwante begrippen. De analyse van onderwijsleergesprekken is daarom gericht op de vraag in hoeverre deze verschuivingen inderdaad bij leerlingen optreden.

1.5.3 het vragenlijstonderzoek naar wendbaarheid

Het vragenlijstonderzoek heeft betrekking op de kwalitatieve wendbaarheid waarmee leerlingen het energiebegrip gebruiken. Deze is op vier momenten met een vragenlijst gemeten: bij aanvang en na afloop van het themaonderwijs en bij aanvang en na afloop van het blokonderwijs. Het betreft dus twee opeenvolgende voortest-natest designs zonder controlegroep. Gegevens die in de eerste ronde zijn verzameld zijn in de tweede ronde als controlegegevens gebruikt.

De vragenlijst bestaat uit een gedeelte met open en een gedeelte met gesloten vragen. Met de open vragen is nagegaan in hoeverre de leerlingen zelf correcte redeneringen kunnen produceren, met de gesloten vragen is nagegaan in hoeverre ze een gegeven redenering als correct of incorrect kunnen beoordelen. De antwoorden op de open vragen zijn door twee onderzoekers beoordeeld op correct gebruik van het energiebegrip. Tevens is beoordeeld van welke denkbeelden over energie gebruik wordt gemaakt.

De kwalitatieve wendbaarheid waarmee een leerling het energiebegrip gebruikt, is geoperationaliseerd als de mate waarin een leerling de open en gesloten vragen van de vragenlijst correct beantwoordt. Voor de onderzoeksgroepen zijn de gemiddelde waarden van de kwalitatieve wendbaarheid bepaald. Met een *repeated measures analysis* is nagegaan of de wendbaarheid en het afnamemoment met elkaar samenhangen. Met gepaarde t-toetsen is de verandering in wendbaarheid bij de leerlingen vastgesteld. Met t-toetsen is vastgesteld in hoeverre er verschil is in wendbaarheid op overeenkomstige momenten in de eerste en tweede ronde.

We zijn nagegaan welke denkbeelden leerlingen gebruikten, in welke mate dat gebeurde en welke verandering daarin optrad bij de opeenvolgende afnamen. Die verandering hebben we gelegd naast de begripsontwikkeling die we voor enkele proefgroepen in het protocolonderzoek gevonden hebben.

1.6 Indeling van dit proefschrift

In hoofdstuk 2 beschrijven we het energiebegrip in de natuurkunde, bij leerlingen en in het onderwijs. We bespreken de verschillende aspecten die de energiebegrippen bepalen. Ook bespreken we de literatuur over denkbeelden rond het energiebegrip bij leerlingen en beschrijven we de opbouw van het energiebegrip in de thema/blok-combinatie 'Energie/Arbeid en Energie' in grote lijnen. Dat mondt uit in het formuleren van aandachtspunten voor het protocolonderzoek en het vragenlijstonderzoek.

In hoofdstuk 3 beschrijven we de uitvoering en de resultaten van het eerste ronde protocolonderzoek en bediscussiëren we de opbouw van de thema/blok-combinatie 'Energie/Arbeid en Energie'.

In hoofdstuk 4 beschrijven we hoe we deze resultaten gebruikt hebben bij het ontwerpen van een nieuwe begripsopbouw. We beschrijven hoe die begripsopbouw is uitgewerkt in de gereviseerde thema/blok-combinatie 'Energievoorziening/Arbeid en Energie'. Verder formuleren we hypothesen over de begripsontwikkeling van leerlingen aan de hand van dit lesmateriaal.

In hoofdstuk 5 gaan we na in hoeverre deze hypothesen in het tweede ronde protocolonderzoek bevestigd worden en bediscussiëren we de gebruikte begripsopbouw.

In hoofdstuk 6 beschrijven we de opzet, uitvoering en resultaten van het tweede ronde vragenlijstonderzoek. De eerste ronde resultaten komen slechts aan de orde voor zover nodig is voor vergelijking met de resultaten van de tweede ronde.

In hoofdstuk 7 geven we een slotbeschouwing. We bediscussiëren de merites van het gegeven realiteitsgerichte natuurkundeonderwijs in het licht van onze resultaten. In het bijzonder gaan we in op de opeenvolging van praktijkgericht en vakstructuregericht onderwijs, zoals is vorm gegeven in thema/blok-combinaties en trekken conclusies met betrekking tot de algemene vraagstelling van het onderzoek.

2 Reflectie op het energiebegrip en op energieonderwijs

2.1 Inleiding

Energie is een kernbegrip in de natuurkunde en, algemener, in de natuurwetenschappen. Als zodanig wordt het op school in het vak natuurkunde en in de andere natuurwetenschappelijke vakken onderwezen. In de leefwereld heeft de term 'energie' allerlei informele betekenissen die sterk afwijken van de natuurkundige betekenis. Desondanks hebben de energiebegrippen uit de natuurkunde en uit de leefwereld iets met elkaar gemeen, namelijk de gedachte dat de processen, die in een bepaalde situatie kunnen plaatsvinden, voor een belangrijk deel worden bepaald door de energie, waarvan in de betreffende situatie sprake is.

In dit hoofdstuk inventariseren we de verschillende betekenissen waarin de term energie in de wetenschappelijke natuurkunde, in het schoolvak natuurkunde, in de leefwereld en door leerlingen op school wordt gebruikt. Dat leidt tot criteria die we gebruiken voor de analyse van de begripsopbouw in de thema/blok-combinatie 'Energie/Arbeid en Energie', het lesmateriaal waarop we onze aandacht in het eerste ronde onderzoek gericht hebben. Op grond daarvan zullen we een aantal aandachtspunten selecteren voor de analyse van onderwijsleergesprekken tijdens het onderwijs met dit lesmateriaal. Hierover rapporteren we in hoofdstuk 3.

2.2 Het energiebegrip in de natuurkunde

Het is niet mogelijk een kort antwoord te geven op de vraag wat energie in de natuurkunde 'is'. Een enigszins toereikend antwoord vereist een uiteenzetting over de ideeën die aan het energiebegrip ten grondslag liggen en over de uitwerking daarvan in fysisch-mathematische relaties met andere kernbegrippen uit de natuurkunde. We beperken ons in deze paragraaf tot het volgende. We geven eerst een korte beschrijving van de historische wortels van het energiebegrip. Verder gaan we in op 'het' energiebegrip in de huidige klassieke natuurkunde en op verschillen in betekenis daarvan voor deelgebieden van de natuurkunde. Tenslotte beschrijven we de vier 'vakaspecten' die in elk volwaardig energiebegrip aanwezig zijn.

2.2.1 historische wortels van het energiebegrip

De oude Griekse wijsgeren twistten over de vraag wat de aard is van de verschijnselen die we waarnemen. Zijn alle veranderingen slechts schijn omdat daarachter 'het ene onveranderlijk zijnde' schuilt, zoals Parmenides meende? Of had Herakleitos

gelijk toen hij zei dat 'alles stroomt', dat alles altijd aan verandering onderhevig is? (Dijksterhuis, 1950, blz.7) Deze intellectuele strijd heeft aanleiding gegeven tot de veronderstelling dat er achter alle verschijnselen die in de natuur optreden, iets onveranderlijks schuil gaat. Een voorbeeld uit de Griekse tijd is het bestaan van onveranderlijke 'atomen', dat door Demokritos en Leukippos werd verondersteld. Een moderner voorbeeld wordt gevormd door het energiebegrip. In de jaren '40 van de vorige eeuw kwamen in dat begrip drie tradities samen, waarin men op zoek was naar het onveranderlijke achter alle veranderingen. Deze drie kunnen beschouwd worden als de historische wortels van het energiebegrip (Elkana, 1974):

- de mechanische traditie, met name de mathematische mechanica waarin het behoudsidee van Leibnitz, behoud van 'vis viva', de 'levende kracht' van bewegende lichamen, evolueerde tot een behoudsregel in conservatieve krachtvelden: de som van de vis viva T en de potentiaalfunctie V is constant;
- de 'warmte'-traditie met enerzijds ambachtelijke inzichten in de werking van apparaten, die culmineerden in de stoommachine, en aan de andere kant theoretische inzichten over behoud van warmtestof (Black, Lavoisier), over warmte als beweging (Rumford), over warmtemachines (Carnot) en daarbij behorende gedetailleerde experimenten (onder andere van Joule);
- de fysiologische traditie waarin een relatie werd gezocht tussen 'levenskrachten' en de (mechanische) wetten van de levenloze materie, uitmondend bij Mayer in het idee van ketens van 'Ursache' en 'Wirkung', waarachter een behouden 'Kraft' schuilgaat.

2.2.2 het huidige klassieke energiebegrip

In zijn artikel 'Über die Erhaltung der Kraft' van 1847 knoopt Helmholtz aan bij deze drie stromingen. Hij veronderstelt dat de hele natuur in termen van de mechanica beschreven kan worden als rekening gehouden wordt met de beweging van atomen. Het idee van 'behoud van Kraft' van Mayer geeft hij een fysisch/mathematische fundering door (via het begrip arbeid) de 'vis viva' en de potentiaalfunctie uit de mechanica te verbinden met warmte en arbeid bij warmtemachines. Uit het begrip 'Kraft' van Helmholtz, aangevuld met het entropiebegrip van Clausius en de statistische interpretatie van Boltzmann is het huidige klassiek-natuurkundige energiebegrip ontstaan. In dat complexe en in hoge mate abstracte begrip vinden we het 'onveranderlijke' terug als energiebehoud en het 'veranderlijke' als het optreden van energieomzettingen, energieoverdracht en degradatie van energie.

Het huidige klassiek-natuurkundige energiebegrip wordt in wezen bepaald door het grondidee dat energie een toestandsgrrootheid is, toegekend aan 'de wereld' of delen daarvan ('systemen'), die geheel bepaald wordt door fysisch/mathematische relaties, met name de Hoofdwetten van de Thermodynamica. Feynman heeft geprobeerd dit energiebegrip kernachtig weer te geven:

There is a certain quantity, which we call energy, which does not change in the manifold changes which nature undergoes. That is a most abstract idea, because it is a mathematical principle; it says that there is a numerical quantity that does not change when something happens. It is not a description of a mechanism, or anything

concrete: it is just a strange fact that we calculate some number and when we finish watching nature go through her tricks and calculate the number again, it is the same. (Feynman, 1963, blz.4-1)

Deze omschrijving is overigens zo algemeen, dat zij met kleine wijzigingen op elke behouden grootheid uit de natuurkunde van toepassing is. Zij is bijvoorbeeld geldig voor het begrip impuls wanneer 'numerical quantity' wordt vervangen door 'vectorial quantity'.

2.2.3 conceptualisaties van energie

Het hierboven geschetste energiebegrip wordt in de deelgebieden van de natuurkunde op verschillende manieren uitgewerkt (Duit, 1984a). In de electrodymanica bijvoorbeeld wordt over energie gesproken alsof het een fluidum is, een abstract 'iets' dat kan stromen. In de thermodynamica is energie daarentegen een wat Duit noemt 'abstracte Bilanzierungsgröße' (abstracte boekhoudkundige grootheid), waarbij de Eerste Hoofdwet van de Thermodynamica zegt dat de 'balans' moet 'kloppen'. Duit onderscheidt verschillende conceptualisaties van energie. Onder 'conceptualisatie' verstaat hij:

[Der Aspekt Konzeptualisierung von Energie] erfaßt den Rahmen, in den der Energiebegriff eingebettet wird, die Grundidee, auf der er ruht. (Duit, 1984a, blz.96)

We kunnen kortweg zeggen dat de conceptualisatie of het grondidee van energie probeert aan te geven wat energie 'in wezen' is. We zullen van verschillende energiebegrippen spreken als zij verschillen van conceptualisatie.

Ons inziens zijn de conceptualisaties die Duit in de deelgebieden van de natuurkunde aanwijst, ondergeschikt aan de in §2.2.2 beschreven conceptualisatie van energie, die we de 'academische' conceptualisatie zullen noemen. De deelgebiedgebonden conceptualisaties bieden een voorstelling en een manier van redeneren die binnen een deelgebied consistent te gebruiken is. Het gebruik van de academische conceptualisatie leidt dan tot een, in de meeste gevallen onnodige, omhaal van woorden. Maar als er grenzen tussen deelgebieden overschreden worden, voldoet een deelgebiedgebonden grondidee niet meer en stappen fysici over op de academische conceptualisatie, die de uiteindelijke norm geeft wat energie in de natuurkunde is en wat ermee kan gebeuren.

2.2.4 de vier vakaspecten van 'het' natuurkundige energiebegrip

De deelgebiedgebonden energiebegrippen die in de natuurkunde gebruikt worden, kunnen van elkaar verschillen in conceptualisatie, maar omvatten tenminste vier *vakaspecten* (Duit, 1984a, spreekt van "grundlegende Aspekte"):

- energiebehoud;
- energiedegradatie;
- energieomzetting;
- energieoverdracht.

Elk aspect geeft aan wat er met energie kan gebeuren.

Het aspect *energiebehoud* wijst erop dat de toestandsgraetheid 'energie van een systeem' in de tijd niet verandert als er geen energieoverdracht is tussen het systeem en zijn omgeving ('geïsoleerd systeem').

Het aspect *energiegradatie* houdt in dat de entropie van een geïsoleerd systeem alleen maar kan toenemen; dit correspondeert met een toenemende spreiding in de verdeling van energie over de mogelijke micro-toestanden van het systeem.

Het aspect *energieomzetting* zegt dat de termen waardoor de energie van een systeem bepaald wordt, ten koste van elkaar kunnen veranderen. Anders gezegd: de energiesoorten kunnen binnen een systeem in elkaar worden omgezet.

Het aspect *energieoverdracht* geeft aan dat de energie van een (afgesloten, niet geïsoleerd) systeem kan veranderen door energieoverdracht tussen het systeem en zijn omgeving.

De interpretatie van deze aspecten hangt af van de gebruikte conceptualisatie. We sluiten ons aan bij Duit waar hij zegt dat een energiebegrip dat één of meer van deze vakaspecten mist, geen volwaardig natuurkundig energiebegrip is. We kunnen deze aspecten daarom gebruiken om te beoordelen in welke mate een energiebegrip in het schoolvak natuurkunde overeenkomt met het energiebegrip uit de academische natuurkunde.

2.3 Energie in het schoolvak natuurkunde

Op examenniveau wordt in het schoolvak natuurkunde een abstract en complex energiebegrip geëist. Als voorbereiding daarop wordt gebruik gemaakt van eenvoudiger en meer concrete energiebegrippen. In de loop van de leerjaren wordt in het schoolvak natuurkunde een drietal 'vereenvoudigde' conceptualisaties gebruikt, die lijken terug te gaan op de drie historische wortels van het natuurkundige energiebegrip (Ogborn, 1981):

- 'energie als behouden oorzaak/werking';
- 'energie als een behouden en bruikbaar iets';
- 'energie als een behouden mechanische grootte'.

In deze paragraaf beschrijven we deze drie conceptualisaties en bespreken we didactische voordelen en problemen die ze met zich meebrengen. We lichten het een en ander toe met voorbeelden uit natuurkundemethoden voor onderbouw- en bovenbouw HAVO/VWO. Tot slot gaan we in op het energiebegrip dat uiteindelijk op VWO-niveau bereikt moet worden, waarbij we in de literatuur, naast de academische, nog een conceptualisatie vinden die in het VWO gebruikt kan worden.

2.3.1 'energie als behouden oorzaak/werking'

In de onderbouw worden *ketens van energieomzettingen* gebruikt om diverse energiesoorten en de vakaspecten energieomzetting, energieoverdracht en energiebehoud kwalitatief te introduceren. Deze lijken terug te gaan op de ketens van 'Ursache' en 'Wirkung' van Mayer (zie §2.2.1). We beschouwen het werken met deze ketens in het onderwijs als uiting van de conceptualisatie 'energie als behouden oorzaak/wer-

king'. In deze conceptualisatie is energie (of een energiesoort) oorzaak van een werking en wordt omgezet in een andere energiesoort die min of meer samenvalt met de werking. Deze energiesoort is op zijn beurt weer oorzaak van een nieuwe werking, enzovoorts. Bijvoorbeeld: in de situatie dat een steen valt wordt 'zwaarte-energie' (oorzaak) omgezet in 'bewegingsenergie' (werking). De bewegingsenergie zorgt op zijn beurt voor het gat dat de steen in de grond slaat ('vervormingsenergie'). Een voorbeeld waaruit deze conceptualisatie gelezen kan worden, vinden we in de methode 'Natuurkunde... Doen!' deel 1 voor 2HAVO/VWO.

Je wordt wakker gemaakt door een wekker waarin energie opgeslagen is in een opgerolde veer. Als de veer zich onttolt draait deze opgeslagen energie - **potentiële energie** - de radertjes van het uurwerk en luidt de bel. **Mechanische energie** wordt dan omgezet in **geluidsenergie**. Je springt uit je bed en de energie die in je lichaam opgeslagen is - **chemische energie** - wordt omgezet in energie van beweging - **kinetische energie** - terwijl je je haastig aankleedt. Het water voor de thee kan gekookt zijn op gas - dan is **chemische energie** omgezet in **warmte-energie** - of elektrisch - dan is **elektrische energie** omgezet in **warmte-energie**. (...)

De elektriciteit werd misschien opgewekt door **kernenergie** of door een met kolen, olie of aardgas gestookte stoomturbine. In het laatste geval is **chemische energie** (brandstof) omgezet in **warmte-energie** (stoom), dan in **mechanische energie** (turbine), vervolgens in **elektrische energie** (generator) en ten slotte in **stralings-energie** (licht). (...)

Energie wordt doorlopend van de ene vorm in de andere omgezet. (...) Je kunt energie niet maken, noch laten verdwijnen; je kunt het alleen in een andere vorm omzetten. (Jardine, 1978, blz.113)

In dit citaat komt het oorzakelijke karakter van energie in deze conceptualisatie naar voren, bijvoorbeeld in de zinsnede "*door kernenergie wordt elektriciteit opgewekt*" en in de voorstelling dat niet de veer, maar zijn 'opgeslagen energie' de radertjes ronddraait. Dit oorzakelijk karakter brengt het didactische probleem met zich mee hoe het onderscheid tussen energie en kracht duidelijk gemaakt kan worden.

Ook de relatie tussen energie en 'werking' leidt tot didactische problemen. Want wat is het verschil tussen de 'werking' en de energie zelf? Dat probleem kan met name naar voren komen bij het lezen van de stukjes die gaan over bewegingssituaties. Zo kan de indruk ontstaan dat het draaien van de radertjes 'mechanische energie' genoemd wordt en dat aankleden 'kinetische energie' is. Daarnaast worden er namen voor energiesoorten gebruikt die natuurkundig discutabel zijn, bijvoorbeeld 'geluidsenergie'. Met deze benaming wordt de suggestie gewekt dat er bij elke 'werking' een andere energiesoort hoort.

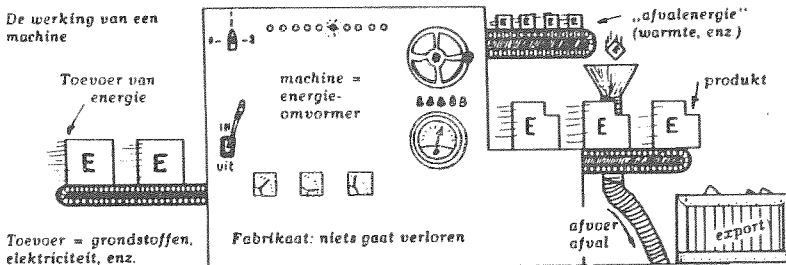
De geciteerde tekst betreft vooral situaties waarin apparaten aan het werk zijn of brandstof gebruikt wordt. Omdat dit soort praktijksituaties in dit proefschrift vaak aan de orde komen, zullen we meestal kortweg van *taaksituaties* spreken. Maar de conceptualisatie 'energie als behouden oorzaak/werking' kan ook gebruikt worden in situaties waarin mensen aan het werk zijn of waarin 'vanzelf verlopende' processen plaatsvinden, zoals vallen of afkoelen.

Mayer had de diepe overtuiging dat er achter alle veranderingen in de ketens van 'Ursache' en 'Wirkung' een 'Kraft' schuilgaat die niet vernietigd kan worden.

Daarvan vinden we in de schoolboeken slechts een schaduw terug. Weliswaar is er in woorden sprake van 'energiebehoud', maar voor leerlingen komt het vooral neer op een litanie van omzettingen. Ogborn (1981) wijst op deze oppervlakkigheid als hij dit gebruik kenschetst als 'energy is the name of the game'.

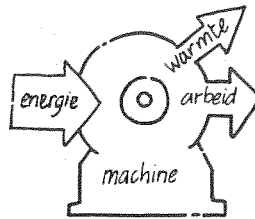
2.3.2 'energie als een behouden en bruikbaar iets'

Het grondidee 'energie als een behouden en bruikbaar iets' heeft uitsluitend betrekking op taaksituaties. Hierin heeft energie het karakter van 'werkingsvoorwaarde', met name voor 'gewenste' taken. Het karakter van 'werking', dat energie bij Mayer ook heeft, ontbreekt. In plaats daarvan is energie een kwantitatief en quasi-materieel 'iets' dat bruikbaar is om apparaten hun taak te laten uitvoeren. Het is aan de ene kant nodig om het apparaat te laten werken, anderzijds produceert het apparaat een 'gewenste energiesoort' en 'ongewenste energiesoorten' die niet bijdragen aan de gewenste taak, maar nog wel bruikbaar zijn voor andere taken. Het 'iets' blijft bij de uitvoering van een taak behouden, maar de bruikbaarheid wordt minder. Dit grondidee gaat terug op de warmte-traditie. Daarin vinden we ideeën over 'warmtestof' die gebruikt kan worden voor verwarming en om apparaten te laten draaien, die in een voorwerp 'opgeslagen' kan liggen, die van het ene voorwerp naar het andere kan stromen en die daarbij, ondanks alle veranderingen (van plaats, temperatuur), behouden blijft. Evenzo kan energie volgens dit grondidee als een 'iets' van het ene voorwerp naar het andere stromen en kan het in een voorwerp opgeslagen liggen. Bovendien kan energie omgezet worden. Maar het blijft bij alle veranderingen (van plaats en vorm) behouden. Vanwege haar (quasi-)materieel karakter kan energie min of meer concreet worden voorgesteld. De aard van het 'bruikbare iets' kan nader geconcretiseerd worden als een 'algemeen soort brandstof'. De mogelijkheid om energie als een 'iets' voor te stellen dat bij omzetting van vorm verandert maar wat betreft hoeveelheid behouden is, wordt in veel Nederlandse natuurkundemethoden gebruikt. We zullen twee voorstellingen bespreken. De voorstelling van energie als 'pakketjes' (zie figuur 2-1) vinden we in een onderbouw-methode. Daarin wordt het beeld gebruikt van energie als een concreet 'iets' met een bepaalde ruimtelijke vorm die bij 'omzetting' verandert. In deze voorstelling wordt een impliciet beroep gedaan op behoud van materie, waarmee leerlingen, naar verondersteld wordt, bekend zijn.



Figuur 2-1: Illustratie uit de methode DBK-na voor MAVO/HAVO/VWO waarin de machine als 'omvormer van energie' wordt voorgesteld (DBK-na, 1985, blok 6, blz. 13).

In bovenbouw-methoden zoals DBK-na (HAVO-bovenbouw) en Scoop (5/6VWO) worden abstracter voorstellingen gebruikt (zie figuur 2-2).



Figuur 2-2: Illustratie uit de methode 'Scoop' voor 5/6VWO (Biezeveld en Mathot, 1987, blz.81)

In figuur 2-2 zien we een voorstelling van de 'toevoer' van 'energie' aan een machine, waarbij de breedte van de pijl een maat is voor de hoeveelheid toegevoerde energie. De energie wordt omgezet in 'arbeid' en 'warmte', die op hun beurt naar een andere plek gevoerd worden. De pijlen voor 'arbeid' en 'warmte' zijn samen even breed als de pijl voor energie', hetgeen voor 'energiebehoud' staat. Voorstellingen zoals die van figuur 2-2 zullen we in dit proefschrift *energiestroomdiagrammen* noemen.

Ogborn (1981) wijst erop dat het gebruik van deze conceptualisatie in de schoolnatuurkunde veel interessante, belangrijke en praktische berekeningen mogelijk maakt, zoals de besparing bij huisisolatie. Duit (1984a, blz.89-93) wijst op het voordeel van de aanschouwelijkheid van de voorstelling van energie als een 'iets', waardoor deze ook binnen de natuurkunde zelf functioneert. In het bijzonder wijst Duit op de mogelijkheid om energiesoorten die aan een voorwerp of systeem toegekend worden, zoals thermische energie en potentiële energie, voor te stellen als 'opslag-energiesoorten' ('Speicherforme') en deze aldus te onderscheiden van 'overdracht-energiesoorten' ('Austauschforme'), dat zijn de procesgrootheden arbeid, warmte en elektrische energie (Duit, 1984a, blz.98). Door dit onderscheid is het minder bezwaarlijk de procesgrootheden ook 'energiesoorten' te noemen en bijvoorbeeld te spreken over 'omzetting van warmte in arbeid', ook al is dit strikt genomen natuurkundig incorrect (Warren, 1983).

Naast de voordelen van de voorstelling van energie als een 'bruikbaar iets' zijn er ook een aantal didactische probleempunten. We zullen er vijf noemen.

Een eerste probleem betreft de voorstelling van energie als een 'iets' in relatie tot waarneembare verschijnselen. Is kinetische energie eigenlijk wel voorstelbaar als een 'opgeslagen iets'? Welke is dan de relatie van dat iets met snelheid of met de formule $\frac{1}{2}mv^2$? En wanneer het verrichten van uitwendige arbeid wordt voorgesteld als de overdracht van energie van het ene naar het andere voorwerp (zie figuur 2-2), welke is dan de relatie tot de formule $W=F \cdot s$? Misschien kan 'beweging' nog wel staan voor het 'iets' (in abstracte zin) dat opgeslagen of doorgegeven wordt. In het geval van potentiële energie ontbreekt 'beweging' zelfs en gaat het nog slechts om een 'toestand' zonder activiteit. Welke is de relatie tussen dat 'iets' en de hoogte? Hoe kan het dat de hoeveelheid 'iets' verandert, terwijl de toestand niet verandert, maar alleen

een ander nulniveau gekozen wordt? Dit soort vragen lijkt minder te spelen voor de energiesoorten warmte, elektrische energie en chemische energie, waarvoor het beeld van een 'iets' in de schoolnatuurkunde ingeburgerd is. Men denke aan zegswijzen als 'de warmte stroomt naar buiten', 'de (elektrische) energie komt uit het stopcontact' en 'er zit (chemische) energie in brandstof'.

Een *tweede probleem* betreft het onderscheid tussen energie als een afgepaste hoeveelheid 'iets' en vermogen als een continue stroom van het 'iets'. In situaties waarin alleen sprake is van de 'omzetting' van de ene overdrachts-energiesoort in de andere is het eenvoudig om energiestroomdiagrammen te tekenen: energiesoorten die een apparaat in- of uitstromen. Meestal gaat het dan niet om de toe- en afvoer van een bepaalde *hoeveelheid energie*, maar, omdat het om continu werkende apparaten gaat, om *hoeveelheid energie per tijdseenheid*, om vermogen dus. In een energiestroomdiagram als die van figuur 2-2 is dit onderscheid echter niet duidelijk. Omdat het moeilijk is een goede voorstelling van een niet-stromende hoeveelheid energie te maken, vinden we in lesmethoden geen 'energie(stroom?)diagrammen' van situaties waarin 'opslag-energiesoorten' toe- of afnemen, behalve als er sprake is van materiestromen (zoals chemische energie, opgeslagen in stromend aardgas).

Warren (1982, 1983) wijst op *een derde probleem*. Hoe kan het dat het 'iets' enerzijds behouden is en anderzijds een 'metamorfose' ondergaat, bij omzetting iets essentieel anders wordt? "This is readily acceptable to young people, who have been conditioned by stories as those of Proteus or Superman, and fairy tales in which toads [padden] change into princes." Ook al omdat de, wat hij noemt 'materialist view', niet overeen komt met het natuurkundige energiebegrip wijst hij deze conceptualisatie scherp af. Figuur 2-1 geeft door zijn analogie met materie weliswaar aan dat behoud en verandering niet in tegenspraak hoeven te zijn, maar deze analogie geeft weinig inzicht in de overeenkomsten en de verschillen tussen energiesoorten.

Een *vierde didactisch probleem* betreft de localiseerbaarheid van energie. Duit (1984a) merkt op dat energie in de relativistische natuurkunde en in de quantummechanica niet meer localiseerbaar is. Maar ook klassiek zijn er problemen. Ten opzichte van een kist op de weg 'zit er kinetische energie opgeslagen' in de bewegende auto, maar als we een inertiaalstelsel nemen dat met de auto meebeweegt, moet de kinetische energie in de kist gelocaliseerd worden. Niettemin is het fysisch correct de kinetische energie, afhankelijk van de keuze van het inertiaalstelsel, aan het ene of het andere voorwerp toe te kennen. Bij potentiële energie is zelfs dat niet mogelijk. De grootte van de potentiële energie is niet afhankelijk van de keuze van inertiaalstelsel, maar alleen van het onderlinge krachtenveld en van de plaats van de twee voorwerpen ten opzichte van elkaar. De potentiële energie moet worden toegekend aan een systeem waarvan beide deel uitmaken¹⁾. Aan de waarde van de potentiële energie kan een willekeurige constante toegevoegd worden hetgeen gezien

1. Duit (1984a, blz.19) vindt dat de potentiële energie aan het veld toegekend moet worden. Deze keuze kan men maken als men energie om didactische redenen wil localiseren. Maar ook dit leidt tot (didactisch misschien niet storende) fysische problemen.

kan worden als vrijheid in de keuze van nulniveau. In de schoolnatuurkunde is het gebruikelijk potentiële energie te localiseren in één van beide voorwerpen (McClelland, 1989; Warren, 1982). Deze didactische keuze maakt het makkelijk in te zien dat er bij een vallend voorwerp sprake is van een energieomzetting ('de potentiële energie *van de steen* wordt omgezet in kinetische energie van de steen'). Een belangrijk nadeel is dat de zwaartekracht dan als een uitwendige kracht op de steen beschouwd moet worden. De arbeid door een uitwendige kracht op de steen gaat altijd samen met energieoverdracht. Deze tegenspraak doet zich niet voor bij de fysisch correcte keuze, als de potentiële energie aan het systeem steen-aarde wordt toegekend. De kinetische energie van de steen neemt weliswaar toe, maar komt dan niet 'van buiten af'. De energie is dan afkomstig van de afname van de zwaarte-energie van het systeem steen-aarde. De zwaartekracht die arbeid verricht is een inwendige kracht (in feite gaat het om het krachtenpaar op de steen en op de aarde) van het systeem steen-aarde en door die arbeid verandert de interne verdeling van de energie in dat systeem.

Het vijfde didactisch probleem betreft het oorzakelijke (causale) karakter dat energie door het aspect bruikbaarheid heeft: een apparaat kan zijn taak uitvoeren *door* de toegevoerde energie. Dat maakt het onderscheid tussen kracht en energie onduidelijk.

2.3.3 'energie als een behouden mechanische grootheid'

De conceptualisatie 'energie als een behouden mechanische grootheid' wordt gebruikt in situaties uit de (school)mechanica. Anders dan in de conceptualisaties die we hiervoor besproken hebben, geeft deze geen min of meer concrete voorstelling van energie als een 'iets' of een 'activiteit'. In deze conceptualisatie heeft energie alleen betrekking op mechanische energie, met dien verstande dat het begrip 'warmte' wordt toegevoegd om aan te geven dat energie ook behouden is in situaties waarin mechanische energie 'verloren' gaat.

Dit grondidee komt in de schoolnatuurkunde tot uiting in het formalisme van de mechanica, waarin energie een grootheid is die in formules 'kracht maal weg' vervangt. Dat wordt in woorden gevat in 'de definitie' van energie als 'het vermogen om arbeid te verrichten'. Het is de meest 'natuurkundige' van de drie besproken vereenvoudigde conceptualisaties. Daarom vindt Warren (1982, 1983) dat 'energie als een behouden mechanische grootheid' de enig juiste manier biedt om het energiebegrip in het secundair onderwijs te introduceren. Toch kleven ook hieraan didactische problemen, die vooral samenhangen met de vraag of dit grondidee wel begrijpelijk is voor leerlingen.

Het eerste probleem is dat deze conceptualisatie weinig aansluit bij het energiebegrip en het arbeidsbegrip dat de leerlingen vanuit het dagelijks leven kennen (Richmond, 1982, 1983).

Een tweede probleem betreft de suggestie die van het gebruik van deze conceptualisatie kan uitgaan, namelijk dat de wet van behoud van energie 'afgeleid' kan worden. Deze suggestie vinden we bijvoorbeeld in het volgende stukje uit de methode 'Natuurkunde op corpusculaire grondslag':

We hebben [eerder] gevonden dat het verschil in potentiële energie van een voorwerp in de punten A en B van een krachtveld gelijk is aan de arbeid die door de veldkracht op dat voorwerp wordt verricht als het van A naar B gaat. In formule:

$$E_{p,A} - E_{p,B} = W_{\text{veldkracht}(A \rightarrow B)} \quad (1)$$

Volgens de wet van kinetische energie en arbeid [zie eerder] is de arbeid van de veldkracht, die op dat voorwerp werkt als het van A naar B gaat, gelijk aan de toename van zijn kinetische energie. In formule:

$$W_{\text{veldkracht}(A \rightarrow B)} = E_{k,B} - E_{k,A} \quad (2) \quad \text{Uit (1) en (2) volgt:}$$

$$E_{p,A} - E_{p,B} = E_{k,B} - E_{k,A} \quad \text{ofwel:}$$

$$E_{p,A} + E_{k,A} = E_{p,B} + E_{k,B}$$

Deze algemene wet heet voor het zwaartekrachtveld en een elastisch krachtveld de *Wet van behoud van mechanische energie*.

(Schweers en van Vianen 1981, deel 3V, blz.120)

Het lijkt alsof de afgeleide 'Wet' het resultaat is van een onvermijdelijke, logische redenering, terwijl het in feite gaat om *keuzen*, die voortkomen uit de veronderstelling dat energie behouden is en die verifieerbaar zijn. Een punt dat verborgen blijft voor veel leerlingen (en leraren?).

Een *derde probleem* betreft toepassingen van de 'definitie' op situaties buiten de mechanica. Bij zo'n toepassing kunnen makkelijk fouten gemaakt worden, niet alleen door leerlingen. Lehrman (1973) en Sexl (1981) merken terecht op dat de 'definitie' (energie is het vermogen om arbeid te verrichten) geen recht doet aan de Tweede Hoofdwet van de Thermodynamica. Volgens Lehrman is de definitie zelfs in strijd met de Tweede Hoofdwet omdat uit het feit dat het maximaal theoretisch rendement van een warmtemachine beperkt is volgt dat 'het vermogen om arbeid te verrichten (= energie)' niet behouden is. Warren (1982) keert zich terecht tegen dit argument. Bij elke energiesoort kan *een* proces gevonden worden waarin deze geheel gebruikt wordt om arbeid te verrichten. Voor inwendige energie is dat bijvoorbeeld adiabatische expansie van een ideaal gas. Maar daarom kan energie nog niet in elk *willekeurig* proces volledig gebruikt worden (als het vermogen) om arbeid te verrichten'. Volgens de Tweede Hoofdwet is dat met name niet het geval bij cyclische processen in een warmtemachine.

2.3.4 het energiebegrip op examen-niveau

Als we in de geraadpleegde VWO-methoden nagaan hoe het energiebegrip op examen-niveau is uitgewerkt, valt op dat vaak 'vereenvoudigde' conceptualisaties gebruikt (kunnen) worden. In de mechanica kan men meestal volstaan met 'energie als een behouden mechanische grootheid'. Bij de onderwerpen 'elektrische apparaten' en 'energieomzetters' kan 'energie als een behouden en bruikbaar iets' gebruikt worden. In het gangbare natuurkunde-onderwijs op VWO-examenniveau functioneren in feite twee conceptualisaties, die elk beperkt zijn tot een bepaald deelgebied van de natuurkunde. Er worden weinig of geen dwarsverbanden tussen de deelgebieden gelegd. Het is daarom twijfelachtig of er bij leerlingen wel een voldoende wendbaar begrip gevormd wordt. Dit wordt in het bijzonder merkbaar door de trend om realistische situaties aan de orde te stellen. De behandeling van die situaties onttrekt zich

per definitie aan de indeling in deelgebieden van de natuurkunde. Daarom is op VWO-niveau behoefte aan een grondidee dat enerzijds het overkoepelende karakter heeft van de academische conceptualisatie, maar dat anderzijds minder abstract en beter voorstelbaar is. Bij verschillende auteurs vinden we suggesties voor zo'n grondidee. Eén van hen is Sherwood (1983) die zich ten doel stelt "to produce better connections between the mechanics and thermodynamics courses". Hij stelt voor om een 'energy equation' op te stellen voor systemen (ook uit de mechanica) als een uitbreiding van de Eerste Hoofdwet. In dezelfde lijn bepleiten Mantei en Täubert (1981) en Arons (1989) een gelijkwaardige behandeling van arbeid en warmte in de Eerste Hoofdwet, die in de gangbare curricula afwezig is. Dat sluit aan bij de onderverdeling in 'opslag-energiesoorten' en 'overdracht-energiesoorten' van Duit (1984a). De kenmerken van de voorgestelde conceptualisatie, '*energie als een behouden entiteit*', zijn:

- energie is een abstracte grootheid
- die behouden is,
- die aan een systeem kan worden *toegevoerd* of door een systeem aan de omgeving kan worden *afgegeven* in de vorm van de 'overdracht-energiesoorten' warmte, arbeid, elektrische energie en stralingsenergie;
- en die in een systeem aanwezig kan zijn vanwege de toestand van het systeem (snelheid, plaats van deelsystemen in elkaars krachtenveld, temperatuur of chemische samenstelling) in de vorm van 'opslag-energiesoorten' als kinetische energie, potentiële energie en inwendige energie.

In deze conceptualisatie is energie een abstract 'iets' dat gelocaliseerd kan worden, een kenmerk dat in de academische conceptualisatie afwezig is (Duit, 1984a). In '*energie als een behouden en bruikbaar iets*' is dat aspect ook aanwezig, maar dat grondidee wordt bovendien gekenmerkt door een oorzakelijk en een doelgericht karakter. Als overkoepelende conceptualisatie zou '*energie als behouden entiteit*' op VWO-niveau de basis kunnen zijn voor een energiebegrip dat wendbaar gebruikt kan worden in tal van realistische situaties. Zoals we in §2.6 zullen zien, is dit grondidee gebruikt in het blok 'Arbeid en Energie'.

2.4 Energiebegrippen in de leefwereld

De term energie heeft in de leefwereld, dat wil zeggen de wereld waarmee leerlingen buiten school te maken hebben, verschillende betekenissen. De leerlingen kunnen die betekenissen opmaken uit het dagelijks spraakgebruik, uit de media en uit voorlichtingspublicaties van 'energiebedrijven'. Het Groot Woordenboek der Nederlandse Taal (Van Dale, 1985) geeft twee betekenissen voor de term energie.

energie, 1. (van pers.) kracht waarmee men iets doet, naar iets streeft; geestkracht, veerkracht, nadruk, klem; -2. (natuurk.) toestandsgrootheid waarvan de vermeerdering bij toestandswijziging gegeven wordt door het verschil van toegevoegde warmte én door het systeem verrichte arbeid: *de zon is een onuitputtelijke bron van energie; elektrische energie*, arbeid geleverd door een elektrische energiebron, arbeidsvermogen van elektriciteit; *-groene energie*, gewonnen uit landbouwgewassen.

Uit de eerste omschrijving komt energie naar voren als een eigenschap van mensen. In de tweede, door Van Dale aangeduid als de betekenis in de natuurkunde, komen in onze optiek verschillende energiebegrippen naar voren. De omschrijving van het natuurkundige energiebegrip is ontleend aan de vakstructuur. Uit de voorbeelden die vervolgens gegeven worden spreekt een andere betekenis. Die heeft betrekking op wat we *taaksituaties* genoemd hebben: situaties waarin met behulp van de zon, gewassen en dergelijke energie gewonnen wordt en waarin we apparaten laten werken. Er is sprake van een technisch/economische betekenis van energie. Dat spreekt ook uit andere energietermen die Van Dale noemt, zoals 'energiebedrijf', 'energiecrisis', 'energieverbruik', 'energievoorziening'. We zullen t.a.v. taaksituaties twee leefwereldconceptualisaties van energie onderscheiden. De meest gebruikte conceptualisatie heeft betrekking op situaties waarin van menselijke inspanning sprake is.

2.4.1 'energie als eigenschap van mensen'

De term energie wordt in het dagelijks spraakgebruik vooral gebruikt in de betekenis van geestkracht en van het energiek zijn van mensen. Daarbij is energie een eigenschap van mensen die tot uiting komt in lichamelijke of geestelijke activiteit en die men heeft als men fit is. Bijvoorbeeld: "hij zit boordevol energie".

'Energie als eigenschap van mensen' heeft belangrijke overeenkomsten met 'kracht' als menselijke eigenschap, hetgeen naar voren komt in de omschrijving van Van Dale. Binnen deze conceptualisatie onderscheiden we drie aspecten die aangeven wat er met energie in relatie tot de mens kan gebeuren. Deze aspecten zijn:

- *een mens kan energie hebben*. Dat is het geval als hij uitgerust, actief en ondernemend is. Energie kan daarbij een voorwaarde zijn voor het actief zijn, maar met energie kan ook het actief zijn zelf bedoeld worden (vergelijk 'oorzaak' en 'werking', blz.22);
- *een mens kan energie krijgen* van uitrusten, sporten (dat tegelijk 'andere' energie kost), (gezond) eten, vitamines en van stimulansen van andere mensen;
- *een mens kan energie verbruiken* bij geestelijke en lichamelijke inspanning. Ook tegenslagen kosten een mens energie.

Dit grondidee van energie wordt veel in reclameboodschappen gebruikt, zoals 'Mars is energie' en 'Dextro geeft je weer energie'. De psychologie heeft van dit grondidee gebruik gemaakt in de term 'psychische energie' die rond de eeuwwisseling in zwang is geraakt en waarbij een analogie met de natuurkunde werd getrokken (Russelman, 1983). Dit energiebegrip is ook populair in semi- en quasi-wetenschappelijke gebieden zoals de diverse soorten alternatieve geneeskunst. In de acupunctuur bijvoorbeeld spelen ideeën over energie en energiestromen in het lichaam een belangrijke rol (Jaspers, 1977).

2.4.2 'energie als een bruikbaar iets'

Sinds de 'energiecrisis' van 1973 zijn veel voorlichtingscampagnes gevoerd om het publiek te bewegen 'zuinig te zijn met energie'. In de laatste jaren zijn die campagnes weer geïntensiveerd vanuit een nieuwe doelstelling, het terugdringen van milieuver-

vuiling. Energie in deze zin is de brandstof of elektriciteit die in taaksituaties als 'werkingsvoorwaarde' nodig is om een apparaat te laten doen waarvoor het bedoeld is, bijvoorbeeld verlichten, verwarmen, vervoeren, en die door het apparaat 'verbruikt' wordt.

Lijnse (1986b) heeft het energiebegrip in voorlichtingsbrochures, onder andere die van de 'Brede Maatschappelijke Discussie' (BMD, 1983), onderzocht en energietermen verzameld die veel in de brochures gebruikt worden. Uit de termen van zijn lijst blijkt dat energie wordt voorgesteld als een 'bruikbaar iets', dat een oorzakelijk en tegelijk een doelgericht karakter heeft. Wat dat betreft lijkt het sterk op het energiebegrip uit de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets'. Het vakaspect 'energiebehoud' ontbreekt echter geheel. In plaats daarvan heeft dit energiebegrip het kenmerk dat het door sommige apparaten 'verbruikt' wordt, door andere apparaten 'opgewekt' wordt en door energiebronnen 'geleverd' wordt. Voorbeelden van energie als een bruikbaar iets zijn 'electriciteit' en 'brandstof': meetbare 'dingen', die maken dat energie in deze conceptualisatie een kwantitatief karakter heeft.

2.4.3 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten'

Door de hierboven genoemde campagnes is het gebruik van de term energie in taaksituaties tot het grote publiek doorgedrongen. Als het om taaksituaties gaat wordt het energiebegrip in het dagelijks spraakgebruik echter niet in de genuanceerde technisch-economische zin, maar veel globaler gebruikt. Het grondidee achter dat gebruik kan niet in publicaties over energie zoals die van 'energiebedrijven' aangewezen worden omdat daarin juist gedifferentieerde energiebegrippen worden gebruikt. We kunnen het vinden bij sommige leerlingen en waarschijnlijk algemener bij niet-onderlegde leken. Met de bespreking van deze conceptualisatie lopen we vooruit op de resultaten van de protocolanalyse.

Vanuit deze conceptualisatie is sprake van energie zolang apparaten aan het werk zijn, maar als ze opgehouden zijn niet meer. Energie is, net zoals in 'energie als een bruikbaar iets', een werkingsvoorwaarde voor apparaten, maar niet een 'iets'. Energie wordt 'gegeven' en meteen 'verbruikt'. Het 'geven' noch het 'verbruiken' is echter gebonden aan één van de dingen die deel uitmaken van de taaksituatie (bijvoorbeeld de brandstof of het apparaat), maar hebben te maken met de situatie als geheel.

2.5 Denkbeelden van leerlingen over energie

In de stroom van publicaties over denkbeelden van leerlingen is er een aantal dat betrekking heeft op het energiebegrip. In deze paragraaf geven we een (niet uitputtend) overzicht van deze literatuur. We gaan in het bijzonder in op de 'frame-

works²⁾ die Watts (1983) beschrijft en op de indeling van de leefwereld in vier 'thema's', die Solomon (1983c) maakt op grond van leerlinguitspraken. Aan het eind van deze paragraaf bediscussiëren we de gevonden energiebegrippen van leerlingen in relatie tot de conceptualisaties van energie die we in de leefwereld en in het onderwijs gevonden hebben.

2.5.1 zeven 'frameworks' van Watts

Watts (1983) heeft ca. 40 leerlingen van 14 tot 18 jaar individueel geïnterviewed volgens de 'interview-about-instances' methode. Hij legde de leerlingen een aantal tekeningen voor en vroeg hen "aan te geven of de afgebeelde situatie *hun* energiebegrip illustreert en redenen te geven waarom dat het geval is". Onder 'frameworks' verstaat hij "well developed ideas around many of the words in science" die leerlingen hebben "long before formal teaching of the [scientific] ideas takes place". Op grond van uitgeschreven protocollen heeft hij zeven 'frameworks' over energie geformuleerd. Met deze zeven wil hij geen uitputtende lijst geven, maar slechts de meest gebruikte en hardnekkigste noemen. We vatten Watts' beschrijving van deze zeven frameworks samen en geven enkele van zijn voorbeelden. Verder vullen we zijn resultaten aan met gegevens uit andere onderzoeken.

Framework 1: 'human centred' energy. Energie heeft vooral met mensen te maken. De beschrijving van 'levenloze' dingen met energie heeft een sterk antropomorf karakter (als dingen die 'energiek' zijn en iets 'willen'). Voorbeelden: "*een kist op een berg heeft geen energie, de mens die er tegen duwt wel*³⁾"; "reagerende stoffen hebben energie in zich vanwege *hun eigen manier van leven*."

Framework 2: A 'depository' model of energy. Sommige dingen hebben energie (zoals een batterij) en zijn oplaadbaar; andere (zoals apparaten) hebben energie nodig en verbruiken de energie die ze krijgen; weer andere (waarvan de activiteiten 'normaal' of 'natuurlijk' zijn) kunnen als 'neutraal' ten opzichte van energie beschouwd worden. Energie is hier een "causal agent, a source of activity based or stored within certain objects". Voorbeelden: water in een waterkrachtcentrale "*geeft kracht aan de generatoren*"; "*de batterij heeft energie, de lamp heeft energie nodig en de draden, dat zijn gewoon de draden*".

Het oorzakelijke karakter dat energie in dit framework heeft zou kunnen verklaren waarom veel onderzoekers bij leerlingen een nauwe samenhang tussen energie en kracht vinden (Watts & Gilbert, 1983; Duit, 1984a). Brook & Driver (1984) analyseerden de geschreven antwoorden van 300 Britse leerlingen van 14-15 jaar (onder andere) op een opgave over de hoogte die een kogel in een u-vormige baan bereikt. Zij vonden een sterke voorkeur voor kracht-redeneringen boven redeneringen met energie(behoud) en merkten op dat de term kracht vaak in de zin van (kinetische) energie werd gebruikt.

2. Watts spreekt van 'frameworks', een term die we zullen gebruiken als we naar zijn publicatie verwijzen.

3. Leerlinguitspraken die door Watts geciteerd worden, hebben we *cursief* weergegeven.

Framework 3: Energy is an 'ingredient'. Hier is energie geen oorzakelijk iets, maar een bestanddeel in voorwerpen of situaties dat een 'trigger' nodig heeft om vrij te komen en dan aan een proces deelneemt. Voorbeeld: "een boek op tafel krijgt pas energie als je het eraf duwt".

Solomon (1986) vond bij 12/13-jarige leerlingen het denkbeeld dat brandstof energie geeft als het wordt aangestoken. Deze leerlingen vonden niet dat er dan ook energie in brandstof opgeslagen is. Ook wordt energie niet *aan* iets anders gegeven, hetgeen in framework 2 wel het geval is.

Framework 4: energy as an 'obvious' activity. Voor veel leerlingen zijn duidelijke blijken van activiteit het enige middel om uit te maken of er van energie sprake is. Daarenboven wordt de activiteit zelf vaak energie genoemd. Dat geldt vooral voor beweging: energie is beweging. Voorbeeld: energie is "het bellen van een telefoon, het branden van een vuur".

Framework 5: energy is a product. Energie is een relatief kortlevend product, dat wordt opgewekt, actief is en dan verdwijnt. Voorbeeld: sommige chemicaliën "veranderen dan laten ze wat van hun energie los en produceren warmte ... hier in de damp"; in sommige uitspraken is energie een afvalproduct zoals rook, zweet of uitlaatgassen.

Framework 6: energy is functional. Energie wordt als een algemeen soort brandstof gezien. Het gebruik van de term energie wordt hoofdzakelijk beperkt tot technische toepassingen die het leven aangenamer maken. Voorbeelden: "energie kan iets laten werken"; "vallende boeken, wolken en dergelijke hebben geen energie want ze doen geen werk voor ons". Stead (1980) wijst erop dat de campagnes voor 'zuinig zijn met energie' ertoe kunnen leiden dat leerlingen denken dat brandstof energie is. Koole e.a. (1988) vonden dat energie door Nederlandse leerlingen van 13-14 jaar vooral met elektriciteit wordt geassocieerd. Zij verkenden de beginsituatie van 213 derde klas leerlingen ten aanzien van het onderwerp 'energiehuishouding' door bij hen een vragenlijst af te nemen. 57% van de leerlingen identificeerde energieverbruik met elektriciteitsverbruik of met verlichting. Slechts 8% legde een relatie met verwarming of brandstoffen. Een resultaat dat overeen komt met de bevindingen van Duit (1984b) bij Duitse leerlingen van ongeveer dezelfde leeftijdscategorie.

Framework 7: A flow-transfer model of energy. Energie is een stof, een soort fluidum. Watts citeert hierbij Warren (1982) die opmerkt dat dit beeld in veel onderwijs gesuggereerd of expliciet gebruikt wordt. Een leerling zegt bijvoorbeeld: "de energie komt uit de negatieve pool... stroomt door de stroomkring... het komt onderweg de lamp tegen... waar het een beetje energie kan afgeven... en gaat terug naar de batterij".

2.5.2 ervaringen van andere onderzoekers met de frameworks

Verschillende onderzoekers hebben het gebruik van de frameworks van Watts bij leerlingen onderzocht en commentaar op de indeling geleverd.

Bliss en Ogborn (1985) hebben 17 meisjes van 13 en 14 jaar tien getekende situaties voorgelegd. Ze vroegen hen drie tekeningen te kiezen waarin energie naar hun mening nodig is of wordt gebruikt. Zij gebruikten de frameworks van Watts als

heuristische basis om de antwoorden te interpreteren met de kanttekening dat hun vragen het 'depository' framework suggereren. Ze vonden dat alle leerlingen 'levende' dingen die duidelijk actief zijn, met energie associeerden en dat de meesten daarbij een bron van energie noemden, zoals 'voedsel' en 'de zon'. Bij niet-levende dingen konden de onderzoekers geen scherp onderscheid maken tussen het 'activity' en het 'functional' framework: als er sprake is van een functioneel gebruik van energie is er ook sprake van een activiteit, bijvoorbeeld bij het branden van een lamp.

Bliss en Ogborn zijn van mening dat in het 'human' framework van Watts het bij hun leerlingen overheersende kenmerk 'animacy' te weinig naar voren komt. Activiteit zien ze als een ander belangrijk kenmerk dat naar energie verwijst (maar geen energie hoeft te zijn). Uit hun problemen met het categoriseren van de leerlingantwoorden concluderen ze dat er 'multiple frameworks' nodig zijn. Het functional framework zou volgens hen misschien vervangen kunnen worden door een 'activity' en een 'depository' framework die op een causale manier met elkaar verbonden zijn. Bijvoorbeeld in de volgende 'functional' situatie: voor het branden van een lamp ('activity') is elektriciteit nodig ('depository'). Verder signaleren ze dat de manier waarop hun leerlingen de verschillende situaties in relatie brachten met energie, sterk afhangt van hun bekendheid met de situatie en kennis van het functioneren van de dingen en dus situatiegebonden is. "This would suggest that frameworks might be very significantly dependent both on learning and development".

Lijnse (1986b) heeft 97 4HAVO-leerlingen uit FLON-classes vóór de aanvang van energieonderwijs een vragenlijst met open vragen voorgelegd. Daarin werd onder andere gevraagd het energiebegrip in eigen woorden te omschrijven en deze omschrijving toe te lichten met een voorbeeld. De antwoorden heeft hij aan de hand van de frameworks van Watts geanalyseerd. Daarbij nam hij de frameworks 'ingredient' en 'product' samen. Met de frameworks kon hij alle niet-natuurkundige uitspraken (90% van de gegeven antwoorden) categoriseren, zij het dat bij 75% van die antwoorden twee tot vier frameworks nodig bleken. Hij vond dat de 'functional' en de 'depository' frameworks het meest gebruikt werden (68% resp. 58%) en het 'flow transfer' framework het minst (3%).

Lijnse veronderstelt dat "leerlingen ten aanzien van energie een soort 'natuurlijk' denkkader hebben ontwikkeld, dat zij voornamelijk associatief lijken te koppelen aan situaties die voor hen met energie te maken hebben. De genoemde frameworks vervullen hierin de functie van belangrijke basisideeën, waarover leerlingen, situationeel bepaald, flexibel lijken te kunnen beschikken."

2.5.3 de vier 'thema's' van Solomon

Solomon (1983c) vroeg 300 leerlingen van 11 tot 14 jaar enkele zinnen op te schrijven waaruit moest blijken wat het woord energie voor hen inhield. Uit deze antwoorden leidde zij het bestaan van vier "provinces of meanings" of "thema's" af. Deze indeling legt minder nadruk op wat 'fout' is vanuit natuurkundig gezichtspunt dan die van Watts. De thema's zijn:

- I 'vitalism': uitspraken waarin de relatie tussen energie en leven tot uitdrukking komt, zoals 'we hebben energie nodig om te leven' en 'inspanning is goed voor je, je bouwt er energie mee op';
- II 'activity': uitspraken waarin energie in relatie tot menselijke activiteit gebracht wordt, zoals 'we hebben energie nodig om te bewegen', 'bij inspanning verbruik je je energie en word je moe';
- III 'apparaten aan het werk': uitspraken over energie in relatie tot apparaten die kunnen werken omdat er energie (elektriciteit, brandstof) ingestopt wordt;
- IV 'energietekort': uitspraken over energietekort als 'de hele wereld heeft energie nodig' en 'we hebben nieuwe energiebronnen nodig'.

De thema's 'vitalism' en 'activity' overlappen elkaar gedeeltelijk, evenals de thema's 'apparaten aan het werk' en 'energietekort'. Solomon vond dat het aantal associaties met 'leven' (de thema's I en II) bij leerlingen van 11 jaar sterk overheerst, bij meisjes nog meer dan bij jongens. Voor deze leerlingen is het energiebegrip "adjectival in nature". Dat wil zeggen dat energie een eigenschap is en dus geen kwantificeerbaar 'iets'. Op 14-jarige leeftijd is het aantal associaties met 'apparaten aan het werk' en (in mindere mate) met energietekort toegenomen. Toch vond zij een aanzienlijk aantal veertienjarige leerlingen die nog steeds uitsluitend associaties met 'leven' gaven en de vraag 'is energie meetbaar?' met 'nee' beantwoordden (Solomon, 1986).

De Jager, Koole en Van der Loo (1987) vonden aanwijzingen dat ook Nederlandse leerlingen van 13 jaar weinig kennis hebben van 'het energieprobleem'. Deze leerlingen gebruikten de term energie hoofdzakelijk in relatie tot 'mensen' en tot 'elektriciteit'.

2.5.4 discussie

Watts suggereert dat zijn zeven frameworks door leerlingen min of meer los van elkaar gebruikt worden. Lijnse (1986b) en Solomon (1984) argumenteren dat de frameworks onderling samenhangen. We zullen discussiëren over de vraag of de samenhang tussen verschillende denkbeelden berust op een gemeenschappelijke conceptualisatie.

Met denkbeelden over energie bedoelen we (zie blz.4) 'ideeën en regels van leerlingen over energie die van belang zijn voor het leren van het energiebegrip en die hun wortels (lijken te) hebben in leefwereld'. Uit de hierboven beschreven literatuur komen allerlei ideeën en regels van leerlingen naar voren, die weliswaar op elkaar lijken, maar toch, door de specifieke situatie waarin ze gebruikt worden, op allerlei min of meer belangrijke punten van elkaar verschillen. Daardoor kunnen ze moeilijk in enkele heldere categorieën ingedeeld worden. We beschouwen denkbeelden als uitingen van dieper liggende conceptualisaties bij leerlingen. Terwijl een denkbeeld van een leerling kan afhangen van de beschouwde situatie, heeft de gebruikte conceptualisatie betrekking op een veel grotere groep situaties, bijvoorbeeld 'taaksituaties'. Vanuit één conceptualisatie zijn meerdere denkbeelden over een situatie mogelijk. Bijvoorbeeld: vanuit 'energie als een bruikbaar iets' kan de ene leerling vinden dat brandstof energie *geeft*, een andere leerling dat brandstof energie is en

nog een andere leerling dat er energie in de brandstof zit. In alle drie gevallen vinden leerlingen dat de energie 'op is' als de brandstof is verbruikt.

We veronderstellen dat achter de meeste in de literatuur gerapporteerde denkbeelden de in §2.4 beschreven conceptualisaties schuilgaan:

- 'energie als een eigenschap van mensen': leerlingen brengen energie vaak, en in het begin van het secundair onderwijs zelfs voornamelijk of uitsluitend, met mensen in verband: het 'human' framework van Watts, het aspect 'animacy' bij Bliss en Ogborn en de thema's 'vitalism' en 'activity' van Solomon;
- 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten': als leerlingen eenmaal het secundair onderwijs volgen gaan ze in toenemende mate taaksituaties met energie in verband brengen, waarbij ze aanvankelijk nog geen vaktermen gebruiken (zie de besproken onderzoeken van Solomon, Koole e.a. en Bliss & Ogborn).
- 'energie als een bruikbaar iets': maar ook vinden we aanwijzingen (met name bij de wat oudere leerlingen uit de onderzoeken van Watts en Lijnse) dat leerlingen over energie praten als een 'bruikbaar iets'. Deze conceptualisatie kunnen ze uit kranten en dergelijke opdoen. Maar ook is het goed mogelijk dat ze elementen van de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' uit de schoolnatuurkunde (zie §2.3), met name ten aanzien van apparaten, hebben leren gebruiken. Evenzo zou het gebruik van het 'activity' framework, waarin de activiteit soms aan energie gelijk wordt gesteld, kunnen samenhangen met de conceptualisatie 'energie als behouden oorzaak/werking', waarin de 'werking' energie is.

We merken op dat 'energie als een eigenschap van mensen' een ander soort situaties betreft dan de twee andere conceptualisaties uit de leefwereld. Dat is voor ons reden om te veronderstellen dat er een 'leefwereld-indeling' van situaties met betrekking tot energie bestaat:

- (1) situaties die met energie te maken hebben omdat er sprake is van inspanning of activiteit van mensen (eventueel uit de breiden tot dieren). De conceptualisatie 'energie als een eigenschap van mensen' heeft op dit soort situaties betrekking. Energie lijkt een 'werkingsvoorwaarde' van en voor mensen te zijn;
- (2) situaties die met energie te maken hebben omdat er sprake is van apparaten die energie (of brandstof) als 'werkingsvoorwaarde' nodig hebben. Deze situaties hebben we reeds eerder 'taaksituaties' genoemd. De conceptualisaties 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten' en 'energie als een bruikbaar iets' hebben op dit soort situaties betrekking;
- (3) situaties die niet tot (1) of (2) behoren. In die situaties gebeuren de dingen 'vanzelf', dat wil zeggen zonder doelgericht ingrijpen van mensen (al dan niet via machines). Men denke aan vallen en afkoelen. Er is in deze situaties dus geen energie als 'werkingsvoorwaarde' nodig. Daarom hebben deze situaties vanuit de leefwereld niets met energie te maken. Onder invloed van het onderwijs kunnen ze natuurlijk wel op energie betrokken worden.

Bij Watts vinden we een leerlinguitspraak die we interpreteren als 'vallen heeft niets met energie te maken'. Deze uitspraak zegt dat een vallend boek geen energie heeft omdat "*falling books do not work for us*". In het lesmateriaal dat we onderzoeken, komen veel situaties voor waarin van vallen sprake is. Daarom zullen we

daarvoor de term *valsituaties* gebruiken. Die term zullen we ook in ruimere zin gebruiken: voor andere niet aangedreven bewegingen in het zwaartekrachtsveld, zoals de worp omhoog en het 'vanzelf' van een helling af rijden of tegen een helling op rijden.

Wat betreft taaksituaties vinden we aanwijzingen, onder andere bij het beschreven 'depository framework', voor een onderscheid tussen verschillende voorwerpen en apparaten die in taaksituaties voorkomen. Dat onderscheid lijkt aan te sluiten bij 'energie als een bruikbaar iets', want het heeft betrekking op de relatie die voorwerpen of apparaten met energie hebben:

- *energiebronnen* of 'opwekkers van energie'. Dat zijn stoffen die energie 'zijn', stoffen of apparaten die energie 'hebben' of 'bevatten' en/of energie kunnen afgeven;
- *energieverbruikers*: apparaten die energie nodig hebben en verbruiken bij het uitvoeren van hun taak;
- onderdelen die alleen maar *energie doorgeven*, zoals elektriciteitsdraden;
- '*gewone dingen*': voorwerpen die alleen met energie te maken hebben voor zover ze door een energiebron of een energieverbruiker verwarmd, verlicht, bewogen of bewerkt worden. Dan heeft energie te maken met (of is) de oorzaak van het betreffende proces.

Lijnse (1986b) vindt in brochures over energie ook de term 'energieopslag'. Uit de literatuur over het leerlingdenken komt niet naar voren dat leerlingen die term kennen en gebruiken. Maar als ze dat doen zouden ze een vijfde soort van voorwerpen of apparaten kunnen onderscheiden: *energieopslagsystemen*.

Tot slot van deze paragraaf merken we op dat het op grond van de beschreven literatuur aannemelijk is dat in de door ons onderzochte leeftijdsgroep, leerlingen van 15 tot 17 jaar, het gebruik van conceptualisaties van energie uit de leefwereld en daarmee samenhangende denkbeelden in aanzienlijke mate zal voorkomen.

2.6 Begripsopbouw in de thema/blok-combinatie 'Energie/Arbeid en Energie'

In §1.2 hebben we de begripsopbouw in het lesmateriaal van het eerste ronde onderzoek, de PLON-thema/blok-combinatie 'Energie/Arbeid en Energie', globaal omschreven als een opeenvolging van een praktijkgerichte en een vakstructureurgerichte begripsopbouw. In deze paragraaf analyseren we de begripsopbouw aan de hand van drie beoordelingscriteria die we ontleen aan de vorige paragrafen:

- welke conceptualisatie(s) van energie worden gebruikt in de begripsopbouw?
- welke vakaspecten worden er in de begripsopbouw gebruikt?
- welke contexten worden er gebruikt?

2.6.1 het thema 'Energie'

globale opzet van het thema

Het thema wil praktijkgerichte kennis en inzichten bieden, waarmee de leerlingen

de volgende 'themavragen' over 'persoonlijk en maatschappelijk energieverbruik' vanuit natuurkundig gezichtspunt kunnen gaan beantwoorden:

- welke problemen doen zich voor bij de huidige energievoorziening?
- voor welke keuzen staan we als we in de toekomst de energievoorziening van Nederland willen garanderen? ('Energie', blz.12).

Het thema bestaat uit een Oriëntatie, een Basisdeel met gemeenschappelijke leerstof en een Keuzedeel⁴). De inhoudsopgave van het thema is als bijlage 1 opgenomen. Het is de bedoeling dat de leerlingen in groepen werken aan de opgaven en experimenten uit de Oriëntatie en het Basisdeel. In het Keuzedeel voert elke groep één keuzeonderzoek uit en brengt daarvan verslag uit aan de klas. Geschat wordt dat de Oriëntatie en het Basisdeel samen 15 lessen in beslag nemen en het Keuzedeel 5 lessen.

Omdat het Keuzedeel in de klassen die we gevolgd hebben niet aan de orde is gekomen, zullen we verder slechts aandacht besteden aan de Oriëntatie en het Basisdeel van het thema.

begripsopbouw in hoofdstuk E1⁵): 'Oriëntatie'

Dit hoofdstuk oriënteert de leerlingen op 'het energieprobleem' en op de kernbegrippen uit het thema (energiebehoud, energieomzetting, 'energieverlies'⁶, rendement). Verder maken zij kennis met de energiebegrippen die in het thema gebruikt worden, waarbij het verschil tussen het energiebegrip in de leefwereld en in het schoolvak natuurkunde wordt aangeduid.

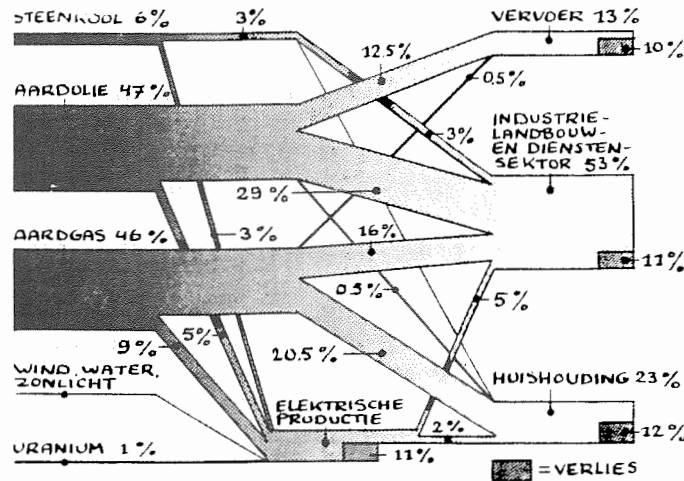
Na een korte schets van 'het energieprobleem' wordt ingegaan op het verkleinen van 'energieverlies' en het vergroten van rendement als een bijdrage aan de oplossing van 'het energieprobleem'. Aan de hand van 'het energiestroomdiagram van Nederland' (zie figuur 2-3) kunnen de leerlingen een idee krijgen van de omvang van het 'energieverlies' in de verschillende gebruiksgroepen. Er wordt aangenomen dat de leerlingen bekend zijn met 'energieverlies' in de maatschappij en met de oorzaken ervan. Uit dit diagram komt energie naar voren als een 'iets', een kenmerk dat we ook vinden in de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets'. Dit diagram heeft ook enkele kenmerken die passen bij de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets':

- energie wordt verbruikt: de energiestromen stoppen bij de 'verbruikersgroepen', wat suggereert dat de energie dan 'op' is;
- evenzo zit er een begin aan de energiestroom, de verticale streep links: energie wordt ergens 'gewonnen' of 'opgewekt'.

4. Zie fig. 1-1 op blz.8 voor een schematische weergave van de opbouw van PLON-VWO-thema's.

5. Een nummer voorafgegaan door een E geeft aan dat we verwijzen naar een hoofdstuk of paragraaf uit het thema 'Energie'.

6. Net zoals in het thema is gedaan, plaatsen we 'energieverlies' in de zin van niet-bruikbare energie tussen aanhalingstekens.

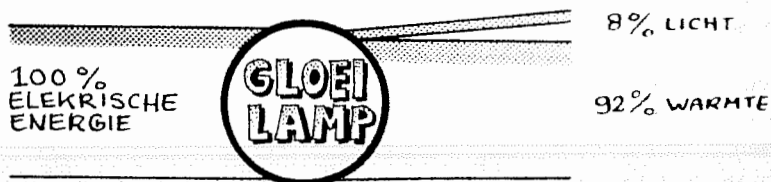


Figuur 2-3: 'Het energiestroomdiagram van Nederland' uit de Oriëntatie (thema 'Energie', blz.5)

We concluderen dat de schrijvers met dit diagram een verbinding hebben willen leggen tussen het energiebegrip in de leefwereld en dat in het thema.

Geen van de vakaspecten komt in de figuur expliciet naar voren. Energie is alleen 'onderweg' behouden, maar niet bij de 'energiebron' (links in de tekening) en niet bij de gebruiksgroepen (rechts). Er zijn ook geen 'energieomzettingen' uitgebeeld, hoewel we daartoe een aanzet vinden bij 'elektrische productie'. Uit het diagram wordt niet duidelijk of er 'energiestromen' of 'energierijke' materiestromen worden bedoeld.

In het tweede deel van het eerste hoofdstuk maken de leerlingen kennis met het energiebegrip dat in het tweede hoofdstuk gebruikt zal worden. Het begrip rendement wordt aan de hand van een 'energiestroomdiagram' van enkele apparaten geïntroduceerd (figuur 2-4).



Figuur 2-4: Energiestroomdiagram van een lamp (thema 'Energie' blz. 6).

Uit dit energiestroomdiagram blijkt dat energie als een 'iets' wordt beschouwd. Bovendien is er sprake van energiebehoud: in het diagram heeft de ingaande energiestroom *geen* begin, de uitgaande energiestroom heeft *geen* einde en de in- en uitgaande energiestromen zijn even groot. Ook de andere vakaspecten komen aan de orde: omzetting, degradatie ('energieverlies'), energieoverdracht (het in- en uitstromen van de energie). De apparaten, die aan de orde komen, worden niet op de leefwereldmanier beschouwd als 'verbruikers' van (elektrische) energie maar als 'omzetters' van energie. Dat veronderstelt kennis van (onder andere) arbeid, licht en warmte als energiesoorten.

De verwerkingsopgaven over 'energieverlies' en 'rendement' hebben betrekking op de globale situaties uit het eerste deel van het hoofdstuk. Ze gaan bijvoorbeeld niet over 'het rendement van apparaten', maar over 'het rendement in het huishouden'. Dat zal naar verwachting tot gevolg hebben dat leerlingen 'rendement' betekenis geven vanuit figuur 2-3, terwijl het de bedoeling van de schrijvers is geweest om de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' te gebruiken.

In het derde gedeelte van hoofdstuk E1 wordt een indruk gegeven van het verschil tussen het leefwereldenergiebegrip en het natuurkundige energiebegrip. Het is de bedoeling bepaalde storende denkbelden over 'energie' (ontleend aan Watts, zie §2.5) weg te nemen. De aandacht wordt vooral gericht op het vakaspect 'energiebehoud'. Dat leidt er toe dat de term 'energieverlies' hier anders gebruikt wordt dan eerder: namelijk als niet behouden zijn in plaats van niet meer bruikbaar zijn, zoals eerder. Dat komt bijvoorbeeld tot uiting in de subparagraaftitel: "energieverlies bestaat niet".

We concluderen dat de schrijvers hebben aangenomen dat de leerlingen (in kwalitatieve zin) reeds bekend zijn met het natuurkundige energiebegrip danwel het energiebegrip uit dit hoofdstuk 'overnemen' in de betekenissen die door hen bedoeld zijn. In de volgende hoofdstukken wordt dat energiebegrip verder ingevuld, met name in kwantitatieve zin in de context van 'energiebesparing'.

begripsopbouw in hoofdstuk E2: 'Rendement'

De bedoeling van hoofdstuk E2 van het thema is dat de leerlingen

- in 'taaksituaties' leren omgaan met de formules voor de verschillende energiesoorten;
- de rendementen van apparaten leren berekenen en door experimenten ervaren dat die beperkt zijn;
- maatregelen ter beperking van 'energieverlies' leren aangeven.

De eerste paragraaf van hoofdstuk E2 grijpt terug op het energiestroomdiagram van de gloeilamp (figuur 2-4) en de begrippen 'verlies' en 'rendement van een apparaat'. De conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' wordt gebruikt.

Formules voor de belangrijkste energiesoorten worden aannemelijk gemaakt aan de hand van praktijkcontexten. Met deze formules wordt geoefend in opgaven en 'experimenten over energieomzetters' waarin het rendement van herkenbare apparaten, onder andere een geiser en een speelgoed-stoommachine, experimenteel bepaald moet worden.

De schrijvers hebben naast enkele 'energieverbruikers' (auto, cassetterecorder) vooral situaties genomen waarin elektrische energie 'opgewekt' wordt. Apparaten worden niet als 'energieopwekkers' maar als 'energieomzeters' beschouwd met als 'toegevoerde energiesoort'

- bij de windmolen kinetische energie;
- bij de waterkrachtcentrale zwaarte-energie;
- bij de batterij chemische energie;
- bij de zonnecel stralingsenergie.

Materiestromen waarin energie aanwezig is (wind; vallend water, aardgas) worden ook in 'energiestroomdiagrammen' opgenomen. Dat gaat echter ten koste van een duidelijk onderscheid tussen energie en materie. Ook komt uit het lesmateriaal geen duidelijk onderscheid naar voren tussen chemische energie in een stof en de energiesoort die bij (chemische) omzetting geleverd wordt. Dat wordt versterkt door het feit dat er geen formules voor de chemische energie gegeven (kunnen) worden. De (verandering van) hoeveelheid chemische energie moet afgeleid worden uit de geleverde warmte (bij verbranden) of de geleverde elektrische energie (bij de batterij).

Naast 'opwek- en verbruikapparaten' komen er situaties aan de orde waarin aan 'gewone dingen' energie wordt toegevoerd. Bijvoorbeeld bij het opwarmen van water. Maar worden ook enkele 'opslagsystemen' behandeld, situaties waarin energie aan een 'gewone stof' wordt toegevoerd om energie 'op te slaan', bijvoorbeeld als 'veerenergie' in een opgepompte band of als zwaarte-energie in water op een hoogte.

We concluderen dat in hoofdstuk E2 vanuit de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' geoefend wordt met het toepassen van de formules voor de energiesoorten, met de vier vakaspecten en met de begrippen 'energieverlies' en 'rendement' in allerlei 'taaksituaties'. Daarbij gaat het om opwek-, verbruik- en opslagapparaten, die alle als 'omzeters' beschouwd worden.

begripsopbouw in hoofdstuk E3: 'Degradatie van energie'

De bedoeling van hoofdstuk E3 is dat de leerlingen

- leren dat energiegebruik gepaard gaat met het afnemen van de kwaliteit van energie, maar dat de totale hoeveelheid energie behouden is;
- het gebruik van 'laagwaardige energiesoorten' voor laagwaardige taken als mogelijkheid voor energiebesparing kunnen noemen;
- aan de hand van de Tweede Hoofdwet van de Thermodynamica kunnen beredeneren dat het rendement van warmtemachines principieel beperkt is.

In dit hoofdstuk wordt het vakaspect 'degradatie', dat in hoofdstuk E2 naar voren is gekomen als het beperkt zijn van rendementen, uitgebouwd tot de Tweede Hoofdwet van de Thermodynamica. Gezegd wordt dat de hoeveelheid energie bij energieverbruik weliswaar behouden is, maar dat de kwaliteit van energie afneemt. Daarbij komt naar voren dat de 'verloren' energie weliswaar onbruikbaar geworden is voor de 'gewenste' taak, maar opnieuw gebruikt kan worden voor een andere taak, met name 'verwarmen'. Het beeld van 'energiebehoud met verlies van kwaliteit' is bedoeld om een alternatief te bieden voor het denkbeeld dat energie 'verbruikt' wordt. In plaats van 'gewenste energiesoort' als (natuurkundig vaag) criterium voor rende-

ment, wordt overgestapt op (uitwendige) 'arbeid' als scherp criterium voor rendement. Daarmee verandert de betekenis van het begrip rendement, hetgeen tot uitdrukking komt in het begrip 'maximaal theoretisch rendement van de (ideale) warmtemachine'. Dit begrip wordt toegepast op de 'taaksituaties' waarom het in dit hoofdstuk gaat, zoals benzinemotoren en stoomturbines: hoe kunnen ze werken (arbeid door de uitzetting van gassen) en waarom is hun rendement zo beperkt.

terugblik op het thema

We hebben geconstateerd dat er in het thema 'Energie' enerzijds wordt geprobeerd aan te sluiten bij de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets' en anderzijds wordt aangenomen dat leerlingen het idee dat energie behouden blijft uit het onderwijs overnemen en de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' gaan gebruiken. Er is geen begripsopbouw in de zin dat de overgang van de ene naar de andere conceptualisatie in stappen gemaakt wordt of aan de leerlingen uitgelegd wordt. Als het vanuit het gezichtspunt van het schoolvak nodig is, wordt er impliciet naar een andere conceptualisatie overgestapt.

De vakaspecten van energie worden niet stuk voor stuk geïntroduceerd, maar zijn, met elkaar verstrengeld, vanaf het begin in de behandeling aanwezig.

De praktijksituaties betreffen in hoofdzaak 'taaksituaties', met nadruk op situaties waarin apparaten een gewenste energiesoort opwekken. Daarnaast zijn er situaties waarin het gaat om voorwerpen die in temperatuur stijgen en om 'opslag' van maatschappelijk bruikbare energie. 'Energieverbruikers' die geen 'gewenste energiesoort' in de zin van het thema opwekken (zoals een auto die met constante snelheid rijdt) komen niet aan de orde, evenmin als verwarmingssituaties waarin de temperatuur constant gehouden wordt.

We hebben geen maatregelen herkend die genomen zijn met het oog op de in §2.3 genoemde didactische problemen. Een uitzondering daarop vormt de 'verzoening' van 'energieverbruik' met 'energiebehoud' in de vorm van 'verlies van kwaliteit'.

2.6.2 het blok 'Arbeid en Energie'

globale opzet van het blok

De doelstelling van het blok 'Arbeid en Energie' is in de Lerarenhandleiding (PLON, 1985b) als volgt verwoord: vergroten van de wendbaarheid van de begrippen arbeid en energie door de begrippen in nieuwe contexten toe te passen.

Deze doelstelling vereist het onderwijzen van één fysisch energiebegrip dat op allerlei situaties van toepassing is. De lesmateriaalontwikkelaars introduceren daartoe een 'energievergelijking' in de zin, zoals we in §2.3.4 besproken hebben. Ze gebruiken daarmee de conceptualisatie 'energie als behouden entiteit'.

In het blok worden praktijksituaties aan de orde gesteld waarin van beweging sprake is. Het betreft situaties van menselijke inspanning (fietsen, zich afzetten bij het omhoog springen), 'taaksituaties' waarin apparaten zelf bewegen of aangedreven worden (auto, kabelbaan) en 'valsituaties', waarin voorwerpen bewegen onder invloed

van de zwaartekracht en de wrijvingskracht, bijvoorbeeld nadat ze zijn weggeworpen of op een helling zijn losgelaten. Het blok is globaal als volgt opgezet:

- in het eerste hoofdstuk van het blok worden het begrip 'systeem' en 'de energie-vergelijking van een systeem' geïntroduceerd. Het begrip 'arbeid' dat eerder in het PLON-curriculum aan de orde kwam (in het thema 'Verkeer', PLON, 1983) wordt herhaald;
- in het tweede hoofdstuk worden diverse kwantitatieve technieken geoefend die nodig zijn om de energievergelijking toe te passen in complexe situaties (niet-constante krachten, hoek tussen kracht en weg);
- in het derde hoofdstuk worden de relaties tussen arbeid, kinetische energie, zwaarte-energie en veer-energie aan de hand van de energievergelijking uitgediept en wordt geoefend met het oplossen van problemen in complexe situaties.

De inhoudsopgave van het blok is als bijlage 2 opgenomen. In de Lerarenhandleiding wordt geschat dat de behandeling van het blok 16 à 20 lessen zal kosten.

begripsopbouw in hoofdstuk A1⁷⁾: 'Oriëntatie'

Het doel van de 'Oriëntatie' is, aansluitend bij het thema, de leerlingen kennis te laten maken met de manier waarop de begrippen energie en arbeid in het blok gebruikt worden. Het begrip 'systeem' wordt geïntroduceerd en de energievergelijking van een systeem wordt opgesteld:

De wet van behoud van energie neemt voor een systeem de vorm aan:
energie uitgewisseld met de omgeving = verandering van systeemenergieën.

Of in formulevorm:

$$W + Q = \Delta E_k + \Delta E_z + \Delta E_{\text{chem}} + \Delta E_{\text{therm}} + \dots$$

Dit wordt de energievergelijking van een systeem genoemd.

Met 'energiesoorten' worden zowel vormen van energieoverdracht als vormen van toegekende energie bedoeld. Het begrip 'arbeid' in de energievergelijking heeft slechts betrekking op *arbeid door uitwendige krachten op een systeem*. De grootte van de 'arbeid' geeft aan hoeveel energie van de omgeving wordt overgedragen aan het systeem onder invloed van uitwendige krachten. Als de arbeidsterm positief is neemt de energie van het systeem toe.

In hoofdstuk A1 oefenen leerlingen met het kiezen van een systeem, het opstellen van de energievergelijking en de relatie tussen energie en arbeid in allerlei praktijksituaties zoals situaties van menselijke inspanning (fietsen), taaksituaties (waterkrachtcentrale) en 'valsituaties', waaronder we in dit verband niet alleen de beweging omlaag, maar ook de (niet aangedreven) beweging omhoog zullen vatten (weggeworpen bal).

7. We zullen de hoofdstukken en paragrafen van het blok 'Arbeid en Energie' (PLON, 1985a) aanduiden met hun nummer waarvoor een A geplaatst is.

begripsopbouw in hoofdstuk A2: 'Arbeid berekenen'

De bedoeling van hoofdstuk A2 is de leerlingen een aantal technieken te leren om arbeid in complexe situaties uit te rekenen. Daardoor ligt de nadruk op de relatie tussen kracht (onder andere als vector) en arbeid en niet op het energiebegrip. Daarom gaan we hier niet verder op dit hoofdstuk in.

begripsopbouw in hoofdstuk A3: 'Arbeid gebruiken'

De bedoeling van hoofdstuk A3 is de relaties tussen energie en andere begrippen uit de natuurkunde (kracht, snelheid) te verdiepen en te oefenen met het reduceren van complexe praktijksituaties tot situaties waarin de energievergelijking van een 'systeem' opgesteld kan worden. Daartoe passeren een aantal complexe praktijksituaties de revue. Er wordt onder andere ingegaan op de vraag in welke gevallen je de arbeid door de zwaartekracht in de energievergelijking moet opnemen en in welke gevallen het gekozen systeem zwaarte-energie heeft. Vanwege de noodzaak energie als een 'entiteit' te localiseren, stuiten de ontwikkelaars op het probleem dat zwaarte-energie niet in (bijvoorbeeld) een steen op hoogte 'zit', maar aan het systeem steen-aarde moet worden toegekend. Er wordt ingegaan op het verschil tussen de energievergelijking en de Wet van Arbeid en Kinetische Energie als 'mechanische' vergelijking die voor niet roterende starre lichamen geldt en waarin 'kinetische energie' als enige energiesoort optreedt. Er wordt aandacht besteed aan krachten waarvan het aangrijpingspunt niet verplaatst wordt, waardoor er een inwendige energieverandering kan plaatsvinden ('afzetkrachten' zoals die van de weg op een fiets of die van de grond op een hoogspringer).

terugblik op het blok

Net als in het thema wordt de nieuwe conceptualisatie aan het begin van het blok meteen gebruikt en toegepast. Daarbij wordt aangenomen dat de leerlingen het energiebegrip overnemen in de betekenis zoals in het lesmateriaal bedoeld is. Er wordt vanaf het begin verondersteld dat energie nu voor leerlingen geen 'bruikbaar iets' meer is, zoals in het thema.

De vakstructuurgerichte begripsopbouw van het blok blijkt uit het gebruik van de conceptualisatie 'energie als een behouden entiteit', waarmee men één manier wil gebruiken om allerlei situaties te beschrijven waarin voorwerpen bewegen. De schrijvers hebben aangenomen dat leerlingen deze conceptualisatie vanaf het begin in praktijksituaties kunnen gebruiken. 'Schoolcontexten' die vereenvoudigd zijn met het oog op de complexiteit van de natuurkundige theorie worden nauwelijks gebruikt. Dit ondanks het feit dat die situaties vanwege de verbondenheid met de leefwereld wel eens zeer complex zouden kunnen zijn.

We concluderen dat het blok op het thema voortbouwt, zowel wat betreft het gebruik van praktijksituaties (de realiteitsgerichtheid) als wat betreft de conceptualisatie.

2.7 Aandachtspunten in het eerste ronde onderzoek

Het eerste ronde onderzoek richt zich op de vraag of het onderwijs aan de hand van de thema/blok-combinatie 'Energie/Arbeid en Energie' leidt tot een praktijkgerichte en vakstructuurgerichte begripsontwikkeling bij leerlingen, zoals zou dienen te blijken uit een wendbaar gebruik van het energiebegrip. Na analyse van de begripsopbouw in het lesmateriaal hebben we zowel voor het protocolonderzoek als voor het vragenlijstonderzoek (zie §1.5) aandachtspunten opgesteld.

2.7.1 voor het protocolonderzoek

In het protocolonderzoek richten wij onze aandacht op de begripsontwikkeling bij leerlingen. Het belangrijkste kenmerk van de begripsopbouw in de thema/blok-combinatie is de opeenvolging van conceptualisaties van energie. Een eerste aandachtspunt bij de analyse van onderwijsleergesprekken in hoofdstuk 3 vormt dan ook de vraag in hoeverre leerlingen deze conceptualisaties na elkaar ontwikkelen en, voor zoverdat niet het geval is, uit welke denkbeelden het eventuele gebruik van een afwijkende conceptualisatie blijkt en tot welke problemen dat in het onderwijs leidt.

Energie is vanaf het begin van het thema een zeer complex begrip, onder andere omdat de vakaspecten steeds verstrengeld met elkaar aan de orde komen. De vakaspecten vormen een tweede aandachtspunt bij de analyse van onderwijsleergesprekken, met name de vraag in hoeverre ze ook door leerlingen steeds in relatie tot elkaar gebruikt worden. Een derde aandachtspunt vormt de relatie van de gebruikte contexten met de leefwereld, zoals bijvoorbeeld in het aspect 'bruikbaarheid' tot uiting komt. In hoeverre wordt het ontwikkelen van het energiebegrip ondersteund dan wel belemmerd door de manier waarop een bepaalde praktijksituatie vanuit de leefwereld met energie in verband wordt gebracht?

2.7.2 voor het vragenlijstonderzoek

In het vragenlijstonderzoek richten we onze aandacht op de kwalitatieve wendbaarheid waarmee leerlingen het energiebegrip kunnen gebruiken en op blokkerende denkbeelden. We richten ons daarbij op het soort situaties dat vooral in het thema aan de orde komt, *taaksituaties*, en *valsituaties*, die vooral in het blok gebruikt worden.

Gezien vanuit de leefwereld wordt energie in taaksituaties 'geleverd' en 'verbruikt' bij verwarmen, verlichten, bewegen en bewerken. In de literatuur wordt algemeen verondersteld dat het denkbeeld dat energie 'verbruikt' wordt de ontwikkeling van het natuurkundig energiebegrip sterk belemmert. Daarom richten we het vragenlijstonderzoek met name op die taaksituaties, waarin het wendbaar gebruik van het energiebegrip door een 'verbruik-denkbeeld' belemmerd zou kunnen worden.

Wat betreft valsituaties veronderstellen we dat het denkbeeld dat vallen niets met energie te maken heeft een wendbaar gebruik van het energiebegrip zou kunnen beperken. Daarnaast zou het denkbeeld kunnen bestaan dat er vanwege de activiteit 'vallen' van energie sprake is. Daarom richten we ons in het vragenlijstonderzoek op de valsituaties waarin die twee denkbeelden het wendbaar gebruik van het energiebegrip zouden kunnen beperken.

3 Het eerste ronde protocolonderzoek

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk doen we verslag van de opzet en de resultaten van het eerste ronde protocolonderzoek. Dat is het onderzoek naar de begripsontwikkeling bij leerlingen die onderwijs kregen aan de hand van de thema/blok-combinatie 'Energie/Arbeid en Energie' (PLON 1985/1986). In §1.2 hebben we als onderzoeksvraag voor het protocolonderzoek geformuleerd:

- 1 *Welke ontwikkeling van het energiebegrip vindt bij leerlingen plaats tijdens het betreffende onderwijs en in hoeverre kan deze beschreven worden als een opeenvolging van een praktijkgerichte en een vakstructuurgerichte begripsontwikkeling?*

In de thema-blok-combinatie over energie hebben we een opeenvolging van conceptualisaties geconstateerd (zie §2.6). Als leerlingen een ander grondidee van energie gebruiken dan het onderwijs, zullen zij het energiebegrip in het algemeen niet zonder meer overnemen in de 'gewenste' betekenis. Dat wordt lang niet altijd duidelijk aan de hand van onderwijsleergesprekken, onder meer omdat leerlingen termen uit het onderwijs overnemen en gebruiken op een wijze waaruit geen betekenisgeving blijkt. Er doen zich soms ook situaties voor waarin wel tot uiting komt dat leerlingen en de leraar verschillende betekenissen gebruiken. In zo'n situatie wordt een *begripsprobleem* zichtbaar. Dat kan leiden tot een *productieve onderwijs situatie*: een situatie waarin de leerling (elementen van) een voor hem/haar 'nieuwe' conceptualisatie van energie gaat gebruiken. Het veranderen van conceptualisatie zien we als een 'gezichtspuntswisseling' (Van Driel (1990, blz.16). Er kan echter ook sprake zijn van een *blokkerende onderwijs situatie*: een situatie waarin gespreksdeelnemers een begripsprobleem ervaren, maar er niet in slagen verder te komen.

Omdat wij ons richten op de begripsontwikkeling van leerlingen zullen we niet op alle problemen ingaan die uit de protocollen zichtbaar worden. We beperken ons tot begripsproblemen van de beschreven soort. Bovendien beperken we ons tot het begrip energie zelf.

Dit hoofdstuk is als volgt opgebouwd. In §3.2 geven we aan hoe het protocolonderzoek is opgezet en uitgevoerd. In §3.3 beschrijven we van welke denkbeelden en conceptualisaties de leerlingen uit de proefgroepen bij aanvang van het thema gebruik maken. In §3.4 - 3.7 beschrijven we in hoeverre de gebruikte conceptualisaties tijdens het onderwijs veranderen. Aan het eind van elke paragraaf geven we een terugblik op het betreffende deel van het lesmateriaal. In §3.8 bediscussiëren we de keuze van de proefgroepen en de proefleerlingen. In §3.9 kijken we ten slotte terug op de be-

gripsontwikkeling tijdens de gehele thema/blok-periode en formuleren we de conclusies van het eerste ronde protocolonderzoek.

3.2 Opzet en uitvoering van het protocolonderzoek

In deze paragraaf beschrijven we de opzet van het protocolonderzoek en de gang van zaken tijdens het verzamelen van gegevens in klassen waarin onderwijs werd gegeven aan de hand van het experimentele lesmateriaal. We geven aan hoe we de audio-banden hebben uitgewerkt en hoe de analyse van de protocollen heeft plaatsgevonden.

3.2.1 de keuze van scholen, leraren en leerlingen

Toen het onderzoek begon werd de thema/blok-combinatie 'Energie/Arbeid en Energie' gebruikt op 8 VWO-scholen. De meeste leraren van deze scholen zijn nauw bij het PLON-project betrokken geweest en hebben ervaring met onderwijs aan de hand van thema/blok-combinaties. Daarom hebben we geen voorkeur gehad voor één van deze scholen of leraren. We selecteerden twee scholen op grond van hun bereikbaarheid voor het onderzoeksteam. De betrokken leraren en schoolleidingen zegden hun volle medewerking toe.

Om kwalitatief goed bruikbaar onderzoeksmateriaal te verkrijgen kozen we proefgroepen van samenwerkende leerlingen die¹⁾:

- goed samenwerken, zonder dominerende leerlingen;
- hun gedachten goed kunnen formuleren;
- 'gemiddeld' presteren in de natuurkundeles.

Dit alles ter beoordeling van hun leraar. Bovendien streefden we ernaar zowel jongens als meisjes in het onderzoek te betrekken.

Op *school 1* werd het thema 'Energie' als eerste thema van 5VWO gebruikt, gevolgd door het blok. In het schooljaar 1986/1987 werd bij *leraar L₁* in *klas 5-1* één proefgroep van drie jongens (*groep 5-1*) gevolgd. Eén van de leerlingen was afkomstig uit 5HAVO. Dat had een zekere, minder gewenste invloed op de discussies in die proefgroep. Daarom hebben we bij het samenstellen van de andere proefgroepen erop gelet geen leerlingen te selecteren die het onderwerp energie reeds eerder op bovenbouw-niveau bestudeerd hebben.

Op *school 2* werd het thema 'Energie' aan het eind van schooljaar 1986/1987 als laatste thema van 4VWO behandeld en het blok 'Arbeid en Energie' als tweede lessenserie van 5VWO in het begin van het schooljaar 1987/1988. We stelden twee proefgroepen (*groep 4-2 en 4-3*) van vier leerlingen uit twee klassen samen. Omdat ons onderzoek is gericht op leerlingen die zowel het thema- als het blokonderwijs volgden, kozen we leerlingen die naar verwachting van 4VWO naar 5VWO over zouden gaan en natuurkunde in hun vakkenpakket zouden kiezen.

1. Overeenkomstige criteria zijn gehanteerd door De Jong (1990, blz.96) en Van Driel (1990, blz.23).

Inderdaad gingen alle proefleerlingen over en kozen in 5VWO natuurkunde in hun vakkenpakket. De samenstelling van de groepen moesten we toen niettemin wijzigen omdat niet alle leerlingen uit één proefgroep in het daarop volgende schooljaar weer bij elkaar in de klas kwamen. Ook kregen de leerlingen een andere natuurkundeleerleraar, *leraar L₃* in plaats van *leraar L₂*.

In tabel 3.1 staan enkele gegevens over de proefgroepen met de gefingeerde namen waarmee wij de proefleerlingen zullen aanduiden. De verhouding tussen het aantal jongens en meisjes in de proefgroepen weerspiegelt de situatie in de proefklassen.

Tabel 3-1: Enkele gegevens over de proefgroepen

	naam	j/m	4e-klas groep	5e-klas groep
school 1				leraar L ₁
	Sake	j		5-1
	Wil	j		5-1
	Rob	j		5-1
school 2			leraar L ₂	leraar L ₃
	Hein	j	4-2	5-2
	Piet	j	4-2	5-2 ²⁾
	Onno	j	4-2	—
	Ruud	j	4-2	5-3
	Ria	m	—	5-2
	Anja	m	4-3	5-3
	Bea	m	4-3	5-3
	Elie	j	4-3	5-3
	Job	j	4-3	5-2

Met dit protocolonderzoek willen we niet nagaan welke begripsontwikkeling de leerlingen 'gemiddeld' doormaken, maar willen we voorbeelden krijgen van de begripsontwikkeling die leerlingen *kunnen* doormaken. Voor dit doel achten we de informatie uit drie groepen met in totaal 12 leerlingen voldoende. Gezien de tijdsinvestering die nodig is om audiobanden te verzamelen, uit te werken en te analyseren was het volgen van drie groepen bovendien, met de voor het onderzoek beschikbare menskracht, het maximaal haalbare.

2. Leerling Piet koos aanvankelijk in 5VWO natuurkunde in zijn vakkenpakket, maar besloot na de herfstvakantie dit vak in te ruilen voor economie. Dat betekent dat Piet slechts voor de helft van de blokperiode deel uitmaakte van proefgroep 5-2.

3.2.2 het maken en uitwerken van geluidsopnamen

Aan de leerlingen van de geselecteerde proefgroepen werd gevraagd of zij wilden meewerken aan het onderzoek. Alle gevraagde leerlingen stemden toe. Ze hadden er geen bezwaar tegen dat er een bandrecorder op hun groepstafel werd geïnstalleerd en dat een observator aan hun tafel kwam zitten. De taak van de observator van de proefgroep omvatte:

- 'technische' taken zoals het maken van geluidsopnamen en het verzamelen en kopiëren van aantekeningen van de leerlingen;
- het verzamelen van aanvullende gegevens die van belang waren voor het uitwerken van de banden (zoals herkennen van stemmen, noteren wanneer en hoe de groep naar het boek verwijst, noteren wat de leraar op het bord schrijft);
- het stimuleren van de discussie tussen de leerlingen op relevante punten door vragen als: "waarom vullen jullie dat getal in?" of: "wat bedoel je met begrip X?".

Door deze laatste doelstelling was er in feite sprake van 'participerende observatie'. De proefleerlingen gingen dan ook vragen stellen aan de observator. Dat had als voordeel dat de discussies aan diepgang wonnen, maar als nadeel dat de leraar minder aandacht besteedde aan de begeleiding van de proefgroepen omdat deze al steun kregen van de observator.

In het grootste deel van de betreffende lessen (ca. 80%) kon een observator (per klas steeds dezelfde) aanwezig zijn. De leerlingen zorgden zelf voor het maken van de geluidsopnamen in de rest van de lessen. Op de aanwezigheid van de bandrecorder reageerden de leerlingen in eerste instantie wat onwennig, maar al snel trokken zij zich daarvan niets meer aan. De leerlingen gaven aan dat zij door de aanwezigheid van de observator wat meer op de leertaak gericht waren dan in 'gewone' natuurkundelessen. Onze indruk was dat de aanwezigheid van de observator ook voor de leraren aanleiding was zich extra in te spannen om het 'goed' te doen. Ook het bespreken van gesignaleerde onderwijsproblemen beïnvloedde hun onderwijs in zekere mate. Door deze, overigens beperkte, invloeden konden begripsproblemen en hun mogelijke oplossingen beter naar voren komen dan zonder aanwezigheid van de observator.

De audiobanden zijn volledig afgeluisterd en de discussies van de groepen 5-1 en 4-3/5-3 zijn uitgeschreven voor zover ze betrekking hadden op de inhoud van de les. Rekenwerk, discussies over significante cijfers en dergelijke werden in het algemeen niet geprotocolleerd. Uitleg van de leraar werkten we slechts uit wanneer deze in discussie met leerlingen tot stand kwam. Monologen van de leraar vatten we samen.

Om tijdsredenen zijn de banden van groep 4-2/5-2 inhoudelijk selectief uitgewerkt. De banden werden door de observator globaal afgeluisterd en de inhoud ervan werd in grote lijnen met een medeonderzoeker besproken. Op grond daarvan werden delen geselecteerd en uitgewerkt. In het algemeen ging het daarbij om discussies waarin leerlingen belangrijke begrippen als 'energie', 'energiesoorten', 'energieverlies' en 'rendement' gebruikten. Met name als we een begripsprobleem vermoedden, werden de gesprekken uitgewerkt.

3.2.3 de analyse

De analyse van de protocollen is uitgevoerd door de projectleider in discussie met anderen, te weten:

- de naaste projectmedewerkers: met hen werden alle protocollen besproken en interpretaties doorgenomen en bijgesteld;
- de op enige afstand betrokken onderzoekers: met hen werden interpretaties van geselecteerde protocollen besproken, met name die welke in dit proefschrift zijn opgenomen;
- de ontwikkelaars van het Project Bovenbouw Natuurkunde (PBN) en met leraren van de proefklassen. Door het revisiewerk en de nascholingscursus die we over het gereviseerde lesmateriaal gaven (zie §4.1.3) konden we nagaan in hoeverre zij de door ons gevonden denkwijzen van leerlingen uit eigen ervaring herkenden, plausibel vonden en in enkele aan hen voorgelegde protocollen terug konden vinden.

De analyse van de protocollen is een langdurig, iteratief verlopend proces geweest. In eerste instantie hoorden we niet veel andere dingen dan we uit onze eigen ondervinding kenden. Bij de eerste oppervlakkige analyse merkten we wel dat leerlingen veel vaker met begripsproblemen kampten dan ons in de klas was opgevallen. Met de bedoeling begripsproblemen op te sporen en inzicht te krijgen in de rol van in de literatuur gerapporteerde 'denkbeelden' gingen we op formuleringen letten die op een bepaald denkbeeld zouden kunnen wijzen, zoals 'energie uit brandstof' in plaats van 'energie in brandstof'. Net als andere onderzoekers (zie §2.5), liepen we tegen problemen op toen we de uitspraken van leerlingen over energie probeerden in te delen naar de 'frameworks' van Watts. Vaak kon één uitspraak bij twee of drie 'frameworks' ingedeeld worden.

We gingen ons afvragen waarom de leraren (net als wij in eerste instantie) de woorden van de leerlingen heel anders opvatten dan dat ze bij nader inzien bleken te bedoelen. We gingen in de discussies letten op het verschil in betekenis die de begrippen bleken te hebben voor leraar en leerlingen en bekeken of er sprake kon zijn van een 'kloof van onverstaanbaarheid' (Ten Voorde, 1977) die toegeschreven kan worden aan een 'verschil in argumentatieniveau' (Van Hiele, 1973).

Er waren aanzienlijke verschillen tussen leerlingen binnen een groep wat betreft de aanvangssituatie en dus ook wat betreft de begripsontwikkeling die ze doormaakten. Dat compliceerde het analysewerk aanzienlijk omdat we daardoor niet de begripsontwikkeling van de proefgroep als geheel, maar die van individuele leerlingen moesten gaan volgen. Daarbij kregen we oog voor 'patronen' in redeneringen van leerlingen die we herkenden als 'denkbeelden'. Als we bij een leerling zo'n denkbeeld ontdekten, liepen we zijn of haar uitingen in verschillende lessen na met de vraag of we meer aanwijzingen voor het gebruik van het denkbeeld konden vinden. Door die wijze van beschouwen werd een aantal uitspraken in een nieuw licht gezet. Zo kwamen we nieuwe misverstanden tussen leraar en leerlingen op het spoor. Bijvoorbeeld: als een leraar vroeg naar de energiesoort van een vallende steen, zei een aantal leerlingen: "zwaarte-energie". Op andere plaatsen, waar de leerlingen geen 'kreet', maar een volledige zin gebruikten, bleek dan dat ze vonden dat de steen bij vallen *zwaarte-energie krijgt*. De leraren (en wij in eerste instantie ook) dachten op

grond van de kreet 'zwaarte-energie' ten onrechte dat deze leerlingen energie aan de steen toekenden vanwege zijn hoogte. Door dit soort ontdekkingen werd ons duidelijk dat we niet zozeer op 'kreten', als wel op complete zinnen moesten letten.

Aldoende kregen we steeds meer zicht op het denkbeeldgebruik. Bovendien konden we soms in een protocol aanwijzen dat leerlingen op een 'beter' denkbeeld overstapten. Dat duidde erop dat er een zekere volgorde in denkbeelden zou kunnen bestaan³⁾. Argumenten voor deze volgorde vonden we ook in de resultaten van het vragenlijstonderzoek (zie hoofdstuk 6). We gingen ons afvragen in hoeverre er sprake zou kunnen zijn van enkele grondideeën achter de grote hoeveelheid contextgebonden denkbeelden die we vonden. Uiteindelijk leidde dat tot het formuleren van de drie aandachtspunten die we in §2.7 hebben genoemd: conceptualisaties, vakaspecten van energie en de 'leefwereldindeling' van gebruikte contexten.

3.2.4 de keuze van protocollen in dit hoofdstuk

In de volgende paragrafen van dit hoofdstuk geven we slechts de belangrijkste resultaten van het proces van protocolanalyse. We beschrijven de conceptualisaties die we bij leerlingen gevonden hebben, de denkbeelden waaruit die blijken en de begripsproblemen die daarmee samenhangen. Met name gaan we in op situaties waarin we een verandering van conceptualisatie menen waar te nemen. We volgen in onze beschrijving in het bijzonder de proefleerlingen die hun gedachten het beste konden verwoorden. Elementen van de ontwikkeling bij deze leerlingen vonden we in het algemeen ook bij andere leerlingen.

We lichten de geschetste begripsontwikkeling toe met geselecteerde leerlinguitspraken en met protocollen. Deze zijn bedoeld om "de plausibiliteit van de interpretaties" (Wester, 1987) te verhogen. We hebben protocollen opgenomen waarin de conceptualisatie, en daarmee het soort begripsproblemen dat we willen tonen, zo duidelijk mogelijk naar voren komt. Minder relevante delen van protocollen hebben we weggelaten of samengevat. We geven bij elk protocol kort aan hoe wij het interpreteren. Een protocol is meestal voor meer dan één uitleg vatbaar, zeker als omringende delen van het gesprek zijn weggelaten. We geven de interpretatie die, gezien de voorgeschiedenis van de leerlingen en het geheel van de afgeluisterde gesprekken van de betreffende groep, het meest plausibel lijkt.

3.3 Conceptualisaties bij aanvang van het thema

In deze paragraaf beschrijven we de conceptualisaties van de leerlingen van de proefgroepen bij de aanvang van het thema. Voor het vaststellen van deze conceptualisaties gebruiken we de uitgeschreven discussies van deze groepen over de 'Vragenlijst over Energie en Arbeid'. Deze vragenlijst is bij aanvang van het thema-

3. In ons Interimrapport, deel B (Van der Valk e.a., 1989), hebben we deze volgorde beschreven als een volgorde in 'leerbeelden'.

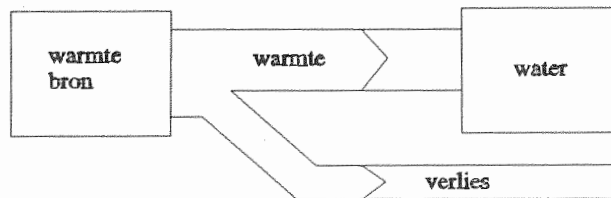
onderwijs door de proefgroepen in onderlinge discussie ingevuld. Tegelijkertijd werd deze vragenlijst bij de andere leerlingen van de proefklassen schriftelijk afgenomen ten behoeve van het vragenlijstonderzoek (zie hoofdstuk 6). De lijst bestond uit vragen naar het energiebegrip zelf en items waarin het energiebegrip in 'taaksituaties' en in 'valsituaties' gebruikt moest worden. De vragenlijst wordt in §6.3 in meer detail beschreven.

3.3.1 leerlingen over energie in taaksituaties

In §2.4 hebben we de conceptualisatie '*energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten*' beschreven. We vinden deze conceptualisatie bij enkele proefleerlingen bij aanvang van het themaonderwijs, met name bij Anja uit groep 4-3. Volgens Anja kunnen apparaten "energie krijgen" en die meteen gebruiken om "warmte en licht te geven". 'Energie krijgen' en 'energie verbruiken' gaan altijd hand in hand: energie krijgen is tegelijkertijd energie 'verbruiken' voor de taak waarvoor het apparaat gemaakt is. Dat betekent dat energie 'geven' en 'krijgen' *niet* zoiets is als 'overhandigen'. Dit 'geven en krijgen' geeft veeleer een oorzaak-gevolgketen aan, vergelijkbaar met iemand een duw of een hand geven.

Warmte en licht zijn voor haar geen energie, maar het gevolg van energiegebruik in taaksituaties. Een verwarmingsapparaat krijgt bijvoorbeeld energie om te verwarmen. Maar 'gewone' dingen, zoals stoffen die verwarmd worden, kunnen geen energie 'krijgen'. Anja zegt bijvoorbeeld over water dat verwarmd wordt: "dat krijgt toch geen energie".

In §2.4 hebben we nog een andere conceptualisatie genoemd die in de leefwereld gebruikt wordt: '*energie als een bruikbaar iets*'. Een groepsgenoot van Anja, Elie, geeft blijk van het gebruik van dit grondidee. Voor hem is warmte een vorm van energie: "brandstof geeft warmte, verbrandingsenergie, bij het aansteken".



Figuur 3-1: Betekenisgeving van 'verlies' vanuit de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets': op de verkeerde plek terecht komen.

Warmte/energie 'geven' is voor hem 'overhandigen': er is een ontvanger aanwijsbaar. Die 'verbruikt' de warmte/energie bijvoorbeeld om warm te worden. Voor een deel kan de warmte op de verkeerde plaats terecht komen. Dat deel is dan 'verlies'. Vanwege het karakter van energie als een kwantitatief 'iets' kunnen we de denkwijze van Elie in 'energiestroomdiagrammen' weergeven (figuur 3-1), naar het voorbeeld van de energiestroomdiagrammen die in het thema zijn opgenomen (zie blz.39).

Een derde leerling uit groep 4-3, Job, brengt het 'op temperatuur houden' van een pan water met afkoelen in verband: "de hoeveelheid [water] is groter, dus heeft het sneller de neiging tot afkoelen, daardoor moet er meer [energie] verbruikt worden om het net zo warm te houden". Ook de andere leerlingen vinden in dat geval dat er meer energie nodig is, maar zij maken geen onderscheid zoals Job tussen 'opwarmen' en 'warm houden'. Uit zijn uitspraken maken we op dat Job de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets' gebruikt. Want hij vindt dat energie 'verbruikt' wordt.

In het volgende protocol discussieert de groep van Anja, Job en Elie over kenmerken van energie. Er komen diverse verschillen tussen de opvattingen van Anja, Elie en Job naar voren.

Protocol EO-1⁴⁾ (discussie in groep 4-3 over de beginvragenlijst)

Situatie: de leerlingen geven aan wat voor hen kenmerken van het energiebegrip zijn en noemen er voorbeelden bij.

- | | | |
|----|------|--|
| 1 | Job | Ik heb een leuk voorbeeld, kernenergie ... ⁵⁾ kenmerk, milieu |
| 2 | Anja | Geeft warmte af |
| 3 | Elie | Geeft warmte? nee kan omgezet worden in warmte |
| 4 | Anja | Als jij de stofzuiger hebt, die verbruikt toch energie, die wordt toch ook warm |
| 5 | Bea | Apparaten worden allemaal warm (voelt aan de recorder) |
| 6 | Anja | Ja, ook, daar is het niet voor bedoeld, maar het geeft wel warmte af |
| 7 | Job | Ik geef ook warmte af (blaast hete adem uit) |
| 8 | Elie | Ja maar dat komt niet alleen, dat komt niet door de energie, dat komt door het apparaat (...) ⁶⁾ een verwarming, die is gebouwd om warmte af te geven (andere voorbeelden worden gegeven, Anja: mixer, Bea: auto) ⁷⁾ |
| 9 | Elie | Zet energie om in licht of warmte |
| 10 | Anja | Niet waar, het kan machines op gang brengen |
| 11 | Elie | Ja ook het kan worden omgezet in licht, een lamp, erg simpel |
| 12 | Anja | Dadelijk klopt er niks van |
| 13 | Elie | Energie kan ook mensen op gang brengen, ha ha |

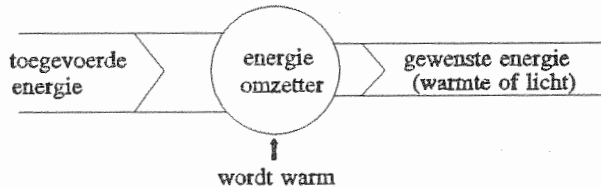
Voor Anja zijn belangrijke kenmerken van energie: als apparaten werken, verbruiken ze energie (4) en geven ze warmte af (2, 6); 'energie kan machines op gang brengen' (10). Zij noemt elektrische apparaten: stofzuiger, mixer. De term 'omzetten' gebruikt ze geheel niet en ze lijkt niet te begrijpen wat Elie ernee bedoelt (12). Warmte lijkt voor

-
4. We hebben alle protocollen die we in dit boek gebruiken, een naam gegeven die verwijst naar het deel van het lesmateriaal dat erin aan de orde komt. E2-1 betekent: het gaat over het thema 'Energie' (E), tweede hoofdstuk (2), eerste protocol (1). We beginnen hier met EO-1 omdat dit protocol gaat over een vragenlijst die voorafgaande aan de behandeling van hoofdstuk E1 is afgenomen.
 5. ... betekent dat de spreker een vrij lange pauze houdt.
 6. (...) betekent dat een stukje minder relevante discussie is weggelaten.
 7. Tussen ronde haken geven we een samenvatting van een weggelaten deel van het protocol.

haar geen energie te zijn, maar een (bij apparaten onbedoeld, 6) gevolg van energie. Elie stelt daar tegenover dat energie in een apparaat wordt omgezet in warmte en licht (verwarming, lamp) (3, 9, 11). Maar er is volgens hem alleen sprake van het omzetten in warmte (3) of van het afgeven van warmte bij apparaten die daarvoor bedoeld zijn (8). Het ongewenst warm worden van apparaten is geen omzetting, maar 'komt door het apparaat'.

Uit dit protocol blijkt dat warmte en licht voor Anja geen energiesoorten zijn en dat ze 'omzetten' geen betekenis kan geven. Warmte is voor haar dan wel geen energiesoort, het is wel een 'iets' dat 'afgegeven' wordt aan de omgeving.

Voor Elie is warmte alleen maar een energiesoort als het om gewenste warmte gaat, die afgegeven wordt door een apparaat dat daarvoor gemaakt is (8). Warmte die onbedoeld ontstaat is geen energie want die warmte kan niet gebruikt worden⁸⁾. Het zou kunnen zijn dat Job het niet met Elie eens is: in 7 brengt hij 'warm zijn' (niet van een apparaat, maar van zijn eigen lichaam) met 'warmte afgeven' in verband. De ideeën van Elie over energieomzettingen hebben we in figuur 3-2 in een energiestroomdiagram weergegeven.



Figuur 3-2: Energiedroomdiagram van 'omzetten' zoals Elie erover praat. Het is niet vanzelfsprekend dat er evenveel aan de 'gewenste' energiesoort uitkomt als erin gaat.

3.3.2 leerlingen over energie in valsituaties

Naar aanleiding van de literatuur (zie §2.5) hebben we onderscheid gemaakt tussen processen in 'taaksituaties' en 'valsituaties'. Eerstgenoemde processen worden vanuit de leefwereld gezien doelgericht veroorzaakt en laatstgenoemde verlopen 'vanzelf', zonder menselijk ingrijpen. Dit onderscheid wordt door Anja uit groep 4-3 spontaan gemaakt. Volgens haar heb je de "kracht van machines om iets te produceren door energie" en "de kracht van de natuur, zwaartekracht kan niets produceren, die is er". Deze uitspraak geeft aan dat er in het geval van 'machines' wél, maar in het geval van vallen, 'zwaartekracht', géén sprake is van energie. Ook in andere groepen wordt een soortgelijk verschil gemaakt. Een leerling zegt: "een vallende bal die heeft toch geen energie, die ... ja die valt".

8. Op grond van het tweede ronde protocolonderzoek hebben we er oog voor gekregen dat leerlingen met de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets' misschien niet aan het 'afgeven' van warmte denken in het geval dat een apparaat ongewenst warm wordt. Ook Elie heeft het niet over afgeven van ongewenste warmte (3, 8).

Andere leerlingen (bijvoorbeeld Sake uit groep 5-1) brengen vallen via de snelheid met energie in verband: een vallend voorwerp heeft snelheid en dus (bewegings-)energie. Het voorwerp krijgt er ook energie bij omdat de snelheid groter wordt. Deze leerlingen weten nog niet dat het vallende voorwerp ook zwaarte-energie heeft. Ze letten alleen op de 'activiteit' bewegen. We zullen hun denkbeeld noemen: '*energie als de activiteit bewegen*'.

Job vindt ook dat vallen wel iets met energie te maken kan hebben, want "met stromend [= vallend] water kun je toch ook energie opwekken". Hij legt de relatie tussen vallen en energie door de valsituatie als een taaksituatie te beschouwen, te weten het opwekken van energie met stromend water in een waterkrachtcentrale.

In het volgende protocol vinden we nog een manier om de relatie tussen 'vallen en energie' te leggen.

protocol EO-2 (leerling Judy uit klas 5-1 in gesprek met de observator [Obs] bij het invullen van de beginvragenlijst)

Situatie: Judy is bezig met de vraag of een vallende bal energie heeft.

- 1 Judy Nou, hij [de vallende bal] heeft geen energie, ik snap niet wat ze ermee bedoelen door de val krijgt hij energie maar die energie die gebruikt hij weer denk ik
- 2 Obs Waarvoor?
- 3 Judy Ja, omdat ie naar beneden valt, dat is juist die bewegingsenergie, dus hij gebruikt het eigenlijk meer
- 4 Obs Waar komt die bewegingsenergie dan vandaan?
- 5 Judy Van de zwaartekracht
- 6 Obs Leg eens uit
- 7 Judy Als je hem loslaat dan werkt de zwaartekracht, die zorgt voor de bewegingsenergie

Judy weet niet wat er bedoeld kan worden met 'een vallende bal heeft energie' (1). Ze vindt dat de bal energie krijgt en meteen gebruikt voor het vallen (1, 3). De term 'bewegingsenergie' gebruikt ze niet in de betekenis van 'de energie die de bal heeft vanwege zijn snelheid', maar als 'de energie die de bal krijgt en gebruikt voor zijn snelheid' (3, 7). De observator suggereert met zijn vraag in 4 dat energie een 'iets' is dat ergens vandaan komt. Judy gaat niet op die suggestie in (5, 7).

Judy gebruikt hier een denkbeeld dat we ook, maar minder expliciet, bij andere proefleerlingen tegenkomen. Dat denkbeeld zegt dat een vallend voorwerp energie 'krijgt' om te bewegen, maar geen energie heeft, omdat de verkregen energie meteen gebruikt wordt. Dat betekent dat de bal er geen energie bij krijgt, ondanks dat zijn snelheid toeneemt. Dit is te vergelijken met een duw krijgen: die duw heb je daarna niet, want die is meteen gebruikt om te bewegen. We zien hier een overeenkomst met 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten': de energie wordt op hetzelfde ogenblik verkregen én verbruikt. Een verschil daarmee is echter dat energie hier ook betrokken wordt op een 'gewoon iets', zoals een bal. We zullen dit het denkbeeld '*energie als werkingsvoorwaarde voor vallen*' noemen.

Dit denkbeeld lijkt op het eerste gezicht veel op het denkbeeld 'energie als de activiteit bewegen' dat we hierboven beschreven. Een belangrijk verschil ermee is dat de 'gekregen' energie 'verbruikt' wordt en dat een voorwerp dus vanwege zijn snelheid geen energie heeft. Een vallend voorwerp 'krijgt' volgens dit denkbeeld energie, ook als het met constante snelheid valt. Volgens een leerling met het denkbeeld 'energie als de activiteit bewegen' 'krijgt' een voorwerp daarentegen er alleen maar energie bij als de snelheid toeneemt.

3.3.3 conclusies en verdere bespreking van de begripsontwikkeling

Wat *taaksituaties* betreft vinden we bij enkele proefleerlingen de conceptualisatie 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten'. Deze leerlingen lijken geen betekenis te kunnen geven aan 'omzetten' en aan licht en warmte als energiesoorten. Ze brengen 'gewone' dingen, zoals water dat verwarmd wordt, niet met energie in verband.

Bij enkele andere proefleerlingen vinden we de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets'. Volgens hen kan energie omgezet worden in een andere vorm, zoals warmte en licht. 'Energieverlies' wordt vooral gezien als het 'op de verkeerde plek terecht komen'. Een enkele leerling betreft 'energieverlies' ook op het 'warmte afgeven' (van apparaten, van mensen).

De twee conceptualisaties van energie voor 'taaksituaties', die we nu bij leerlingen zijn tegengekomen, lijken op elkaar voort te bouwen. Leerlingen zouden uit 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten' de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets' kunnen ontwikkelen en vervolgens kunnen overgaan naar het derde, in het lesmateriaal nagestreefde, grondidee: 'energie als een behouden en bruikbaar iets'. Dat is voor ons reden om de bespreking van de begripsontwikkeling in de volgende paragrafen te ordenen naar de conceptualisatie die de leerlingen gebruiken. Omdat de leerlingen na het eerste themahoofdstuk de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' moeten kunnen gebruiken, zullen we de begripsontwikkeling bij leerlingen met dit grondidee steeds als eerste bespreken. We kunnen verwachten dat deze leerlingen de minste begripsproblemen zullen ontmoeten. Daarna analyseren we de uitspraken van leerlingen met 'lagere' conceptualisaties, bij wie we naar verwachting meer begripsproblemen tegen zullen komen.

Omdat we de denkbeelden over valsituaties niet in de conceptualisaties hebben kunnen onderbrengen, zullen we afzonderlijk bespreken hoe de leerlingen over valsituaties praten.

3.4 Begripsontwikkeling: het eerste themahoofdstuk

Het eerste hoofdstuk van het thema biedt de leerlingen een oriëntatie op het energiebegrip in de samenleving en in de natuurkunde (zie §2.6.1). In deze paragraaf gaan we met name in op discussies van leerlingen over 'energieverlies' en 'energiebehoud'.

3.4.1 taaksituaties: 'energie als een behouden en bruikbaar iets'

De leerlingen van groep 5-1 kunnen 'verloren' energie aanwijzen als 'warmte' die in de omgeving terecht komt. Leerling Wil heeft de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' in zijn vooronderwijs (SHAVO) reeds ontwikkeld. Sake en Rob weten dat energie behouden is. In het volgende protocol wijst Wil hen op de consequenties ervan: energie kan ergens in 'opgeslagen zijn'.

Protocol E1-1: (Discussie in groep 5-1, 'Energie', les 2)

Situatie: de leerlingen discussiëren over de vraag of een batterij energie 'heeft' danwel of energie uit een batterij pas 'vrijkomt' ('ontstaat') als je hem gebruikt.

- | | | |
|----|------|--|
| 1 | Rob | [De batterij heeft geen energie] ⁹ Dus er zit geen energie in |
| 2 | Sake | Nee [instemmend met Rob] |
| 3 | Wil | Jawel |
| 4 | Rob | Wat dan? |
| 5 | Sake | Het komt pas vrij als je het gebruikt, dat klopt wel |
| 6 | Wil | Neehee het zit in de batterij |
| 7 | Sake | Nou dan komt het toch ook vrij als je het gebruikt of niet soms?
(enige tijd later) |
| 8 | Wil | Als je een oplaadbare batterij hebt |
| 9 | Sake | Ja daar zit energie in |
| 10 | Wil | Als ie leeg is laad je hem op, dus dan doe je er energie in |
| 11 | Rob | Dus dan heeft hij energie |
| 12 | Sake | Zo kun je het ook bekijken |

Rob en Sake vinden dat er geen energie in de batterij zit (1, 2), maar dat er wel energie uit vrij komt (5). Daaruit leiden we af dat 'vrijkomen' hier 'ontstaan van energie' betekent. Wil lijkt energie als een 'iets' voor te stellen ('zitten in', 6; 'opladen', 10). Die voorstelling lijkt Sake (7) er toe te brengen 'vrijkomen' in een andere betekenis te gaan gebruiken, als 'erin zitten (9) en eruit komen (7)'.

Sake en Rob gaan van het denkbeeld 'een batterij geeft energie, maar heeft geen energie' over naar het idee dat er in de batterij energie zit. Er lijkt sprake te zijn van een productieve onderwijssituatie. De redenering die Wil houdt rond de oplaadbare batterij (8, 10) vinden we kenmerkend voor de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets': je stopt ergens energie in, die kan er (geheel?) weer uit komen, dus in 'opgeladen' toestand heeft het voorwerp energie ¹⁰. In klas 5-1 wordt deze redenering ook voor andere situaties gehouden, zoals voor het 'opslaan' van 'zonne-energie' in planten.

-
9. Met vierkante haken [] geven we in een protocol een toelichting op uitspraken aan, die tevens een interpretatie inhouden.
 10. De resultaten van het tweede ronde onderzoek wijzen op de mogelijkheid dat leerlingen denken dat slechts een deel van de toegevoerde energie 'opgeslagen' wordt en dat de rest 'verbruikt' wordt bij het opslaan. Deze mogelijkheid wordt niet uitgesloten door hetgeen de leerlingen in protocol E1-1 zeggen.

3.4.2 taaksituaties: 'energie als een bruikbaar iets'

We beschreven reeds dat sommige leerlingen de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets' gebruiken. Het 'energiestroomdiagram van Nederland' uit de 'Oriëntatie' (zie blz.39), waarin energie van een 'bron' naar de 'verbruikers' stroomt, sluit nauw aan bij dit grondidee. In §3.3 vonden we dat leerling Elie 'energieverlies' voor een verwarmingssituatie vanuit dit grondidee betekenis geeft als de geproduceerde warmte/energie die op de verkeerde plek terecht komt. Zo'n zelfde betekenis komt ook naar voren in de voorbeelden die leerlingen noemen bij de vraag naar 'energieverlies in het huishouden':

- "het fornuis, de warmte die naast de pan opgaat";
- "een föhn die blaast er een heleboel naast".

Deze voorbeelden kunnen een invulling vormen van 'energieverlies' zoals dat verbeeld wordt in het genoemde 'energiestroomdiagram van Nederland': als een 'energiestroom' die niet bij de 'gebruiker', maar op een andere plek terecht komt. Overigens lijken de leerlingen geen onderscheid te maken tussen 'warmte' en 'warme lucht' (de lucht uit de föhn, de hete verbrandingsgassen bij het fornuis). Ook in 'het energiestroomdiagram van Nederland' vonden we geen duidelijk onderscheid tussen energie en de energiedrager.

In §2.6 hebben we opgemerkt dat het begrip 'energieverlies' in het eerste themahoofdstuk in twee verschillende betekenissen wordt gebruikt: 'minder bruikbaar worden' en 'verbruikt worden en verdwijnen'. In de volgende discussie lijkt leerling Piet uit groep 4-2 deze twee betekenissen door elkaar heen te gebruiken.

Protocol E1-2 (groep 4-2 in discussie, 'Energie', les 1)

Situatie: Piet is het eens met de stelling uit het boek 'bij elk energiegebruik verdwijnt er energie'.

- | | | |
|---|------|--|
| 1 | Piet | Je verbruikt het, dan moet het ook verdwijnen, bij energieverbruik ... ik kan niet iets bedenken waar dat niet zo is
(Even later komt de stelling 'energie gaat nooit verloren' in discussie. Hein is het met die stelling eens, Piet niet) |
| 2 | Piet | Anders zou je toch een rendement van 100% hebben, lijkt mij |
| 3 | Hein | Maar als je een kachel opwarmt, ja, en die verwarmingsleiding wordt warm dan krijg je ook energie |
| 4 | Piet | Dan gaat er al energie verloren |
| 5 | Hein | Maar die verwarming gaat toch niet verloren, die warmte kun je ook weer gebruiken |
| 6 | Piet | Ja maar dat is verloren energie, want die wil jij niet op die plaats hebben (instemming van anderen) |
| 7 | Piet | Je moet kijken naar de plaats waar jij die energie wilt hebben, je wil die energie, warmte wil je in de kamer ¹¹⁾ hebben, en niet in de pijp, boven |

11. Als een leerling of leraar iets met nadruk uitspreekt, hebben we de betreffende woorden *onderstreept* weergegeven.

ergens op het dak, daar krijg je wel energie, dat is (onduidelijk: verlies)¹²⁾

8 Hein OK, je hebt me overtuigd

Voor Piet is het vanzelfsprekend dat energie verbruikt wordt/verdwijnt (1). Hij vindt dat er al warmte verloren gaat/verdwijnt bij het opwarmen van een verwarmingsleiding (4). Hein wijst erop dat de warmte die in het opwarmen is gaan zitten, niet 'opgebruikt' is maar opnieuw kan worden gebruikt (5). Piet vindt dat je de warmte uiteindelijk niet wilt gebruiken voor het opwarmen van 'die plaats' [=het water] maar van de kamer (7). Hij richt de aandacht vervolgens op andere plaatsen waar warmte ongewenst terecht komt, met name op de schoorsteenpijp en op het dak. Daarbij gaat hij de voorstelling van energie als een bruikbaar 'iets' gebruiken en geeft hij de indruk dat warmte voor hem energie is (7).

In dit protocol lijken twee betekenissen van 'verlies' gebruikt te worden: 'energie komt op een niet gewenste plek terecht' (Piet in 6) en 'energie verdwijnt', de betekenis die in de stelling bedoeld wordt (Hein in 5). Het belangrijke argument van Hein dat je alle bij het opwarmen 'verbruikte' warmte (bij afkoelen) weer kunt gebruiken komt daardoor niet ter discussie. Ook in het lesmateriaal worden deze twee betekenissen van 'verlies' naast elkaar gebruikt.

Piet gebruikt 'energieverlies' ook bij elektrische apparaten in de betekenis van 'op de verkeerde plek terecht komen'. Die betekenis is daar niet acceptabel. Hij zegt bijvoorbeeld "elektriciteit, daar heb je geen verlies van". Met andere woorden: omdat er geen 'elektriciteit' op een andere plek dan in het elektrische apparaat terecht komt, is er geen 'energieverlies'. Dat leidt ook tot een ongewenst rendementbegrip: "bij elektriciteit is het rendement altijd 100%".

3.4.3 taaksituaties: 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten'

In de 'Oriëntatie' moeten de leerlingen het rendement (onder andere in het huishouden) uitrekenen met de formule¹³⁾:

$$\text{rendement} = \frac{U_{\text{gewenst}}}{U_{\text{in}}} \cdot 100\%$$

waarin de gewenste energie U_{gewenst} gelijk is aan de toegevoerde energie U_{in} verminderd met het 'energieverlies'.

De ontwikkelaars hebben aangenomen dat leerlingen vanuit de leefwereld wel weten dat er altijd een deel van de energie niet nuttig gebruikt wordt en dus verloren gaat. Ten onrechte! Voor leerlingen die energie zien als 'werkingsvoorwaarde voor apparaten' wordt alle energie die 'gegeven' of 'gekregen' wordt, meteen voor de betreffende taak gebruikt. Dus is er geen energieverlies. Omdat energie door hen niet

-
12. De gesproken tekst was niet goed te verstaan. Achter de dubbele punt staat de tekst die we meenden te horen.
 13. We gebruiken, in navolging van het nieuwe Examenprogramma Natuurkunde HAVO/VWO (o&w 1989a), de U als symbool voor energie.

als een 'iets' wordt voorgesteld, kunnen zij 'energieverlies' zelfs geen betekenis geven als het deel van de energie dat op de verkeerde plek terecht komt. In de klas komen hun problemen naar voren in de vragen zoals "wat is energieverlies?". Hun leraren leggen echter nauwelijks uit wat 'energieverlies' is, maar wel hoe de 'verloren' hoeveelheid energie berekend kan worden.

Anja uit groep 4-3 probeert op een zeker moment de volgende betekenis van het begrip 'energieverlies': "de mixer, die wordt toch warm". Zij zou met 'energieverlies' kunnen bedoelen de energie die 'op gaat' aan het warm worden. Maar Elie vindt haar voorbeeld niet goed. We zagen immers eerder al dat het 'warm worden' van apparaten volgens hem niet 'door de energie komt', maar door het apparaat zelf (zie protocol E0-1). Waarschijnlijk vindt hij (net als Piet) dat er bij elektrische apparaten geen 'verlies' is. Want hij geeft 'energieverlies' betekenis als 'op de verkeerde plaats terecht komen' (zie figuur 3-1 op blz.53). Ook de leraar kiest zijn voorbeelden hoofdzakelijk in de richting van 'op de verkeerde plek terecht komen'. Dat lijkt Anja tot de conclusie te brengen dat haar voorbeeld fout is. Het probleem wat 'energieverlies' is wordt voor haar vervolgens 'opgelost' door de regel uit het boek die zegt: "energieverlies bestaat niet [in de natuurkunde]". Die regel gebruikt ze zodra de andere leerlingen het over 'energieverlies' hebben. Rond 'energieverlies' heeft zich voor Anja dus een blokkerende onderwijssituatie voorgedaan.

Door het ontbreken van een 'verlies'-begrip kan Anja ook geen betekenis geven aan het begrip 'rendement'. De uitleg die de leraar geeft op haar vraag 'wat rendement nu precies is', bevat onbedoeld de suggestie dat rendement de nuttig gebruikte energie is (in plaats van de *verhouding* tussen nuttig gebruikte en totaal toegevoerde energie). Dat geeft haar de mogelijkheid 'rendement' betekenis te geven zonder het begrip 'energieverlies' te gebruiken of na te denken over de vraag of er ook 'niet nuttig gebruikte energie' is. We zullen in §3.5 laten zien dat Anja en anderen die betekenis van rendement zijn gaan gebruiken.

3.4.4 valsituaties

In §3.3 hebben we gezegd dat er leerlingen zijn die vinden dat vallen niets met energie te maken heeft. De ontwikkelaars van het thema 'Energie' twijfelden er niet aan dat 4VWO-leerlingen bewegen en vallen aan het begin van het onderwijs reeds in verband kunnen brengen met energie. Uit het volgende protocol blijkt dat ook de leraar L₁ daarvan overtuigd is, maar ten onrechte.

Protocol E1-3 (klassediscussie in klas 5-1, 'Energie', les 2)

Situatie: de leraar heeft zojuist (zie verder, protocol E1-4) uitgelegd dat water in een stortbak van een toilet energie heeft door zijn hoogte en dat die zichtbaar wordt door het vallen van het water. Hij gaat door met de bespreking van de voor discussie bedoelde stelling "een vallende steen heeft energie".

- | | | |
|---|----------------|--|
| 1 | L ₁ | (met die stelling) Daar zal iedereen het wel geheel mee eens zijn |
| 2 | Jan | Ik wist het niet ... het beweegt, waarom zou het dan energie moeten hebben? |
| 3 | L ₁ | Wat voor een idee heb je bij energie? (...) wat zijn voor jou duidelijke vormen van energie? |

- | | | |
|----|----------------|---|
| 4 | Jan | Ja, energie verbrandt en er komt energie bij vrij |
| 5 | L ₁ | Warmte bijvoorbeeld |
| 6 | Jan | Ja |
| 7 | L ₁ | En als iets valt? |
| 8 | Jan | Dan werkt er gewoon de zwaartekracht op |
| 9 | Jan | (zachtjes tegen zijn buurman, een grapje makend) Van die steen kun je niet zeggen daar zit benzine in
(na enige tijd komt de leraar terug op de uitspraken van Jan) |
| 10 | L ₁ | Eerst even de opmerking van Jan afmaken, ik denk dat als je je bij bewegingsenergie iets wilt voorstellen, dat je dan kunt denken aan situaties waarbij bewegingsenergie wordt omgezet in warmte, je zegt warmte is voor mij een duidelijke vorm van energie (volgt een uitleg over deze omzetting bij remmen van een auto en bij neerkomen van een vallende steen) |

Jan ziet geen verband tussen energie en het vallen/bewegen van een steen (2). Volgens hem vindt vallen plaats door de zwaartekracht (8). Energie heeft voor Jan te maken met brandstoffen en verbranden (4). Energie 'hebben' is brandstof bevatten (9).

De leraar verwacht niet, onder andere vanwege zijn voorafgaande uitleg, dat iemand het oneens is met de stelling (1). Ten onrechte, zo merkt hij (3). Bij zijn poging om Jan uit te leggen dat een vallende steen energie 'heeft' laat de leraar Jan eerst zijn energiebegrip verduidelijken (3, 7). Uit de eigenschap 'verbranden' die Jan noemt, concludeert hij dat warmte voor Jan een duidelijke vorm van energie is (5). In zijn uitleg van de relatie tussen bewegen en energie gaat hij uit van 'warmte' en van het omzetten van andere energiesoorten in warmte (10).

Vanuit 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten' kan 'vrijkomen van energie' gebruikt worden in de betekenis van 'voor gebruik beschikbaar komen en meteen verbruikt worden'. Zo iets zou Jan kunnen bedoelen in uitspraak 4: brandstof (= 'energie') verbrandt en daardoor komt energie beschikbaar om verbruikt te worden, bijvoorbeeld voor 'warmte' (= om te verwarmen). De leraar vat de uitspraak van Jan in 4 waarschijnlijk heel anders op: als 'er wordt warmte/energie geproduceerd'. Maar het is de vraag of Jan warmte wel als een energiesoort ziet. Het is daarom de vraag of Jan de uitleg van de leraar over remmen begrijpt.

Vlak voor bovenstaande discussie (protocol E1-3) is er sprake is van een misverstand tussen Jan en de leraar rond 'energie krijgen'. Dat er inderdaad een misverstand optreedt kunnen we slechts inzien aan de hand van protocol E1-3. Daaruit weten we dat vallen voor Jan niets met energie te maken heeft.

Protocol E1-4 (klassediscussie voorafgaand aan protocol E1-3)

Situatie: Leo heeft beargumenteerd dat de stelling 'water in de stortbak heeft energie' juist is. Leraar L₁ vraagt of er leerlingen zijn die de stelling onjuist vonden. Als niemand reageert neemt Jan het woord.

- | | | |
|---|-----|---|
| 1 | Jan | Ik wist het niet, maar ik kan wel begrijpen waarom het [=deze stelling] niet waar is. Dat water in die stortbak heeft op het moment dat het erin zit geen energie, het is gewoon een stilstaande toestand, het krijgt energie door het klepje dat weggaat |
|---|-----|---|

- 2 L₁ Op het moment dat het in de bak zit kun je geen energie constateren, het beweegt bijvoorbeeld helemaal niet. Op het moment dat het gaat vallen dan zie je het bewegen, dan krijgt hij dus energie. Welke redenering is nou juist? Kim
- 3 Kim Nou, ik dacht, ik was het met Leo eens, maar wat Jan zegt, dat klinkt ook wel leuk
- 4 Leo Er is toch energie ingestopt om het water naar boven te krijgen
- 5 L₁ (gaat in op de uitspraak van Leo, op 'energie krijgen' als 'méér energie krijgen' bij vallen, zichtbaar aan beweging en op het 'energie hebben' op een hoogte)

Uit E1-3 weten we dat Jan de *val* beweging niet met energie in verband brengt. De relatie die hij in 1 legt tussen energie en beweging heeft daarom waarschijnlijk geen betrekking op beweging in het algemeen, maar alleen op door apparaten 'aangedreven bewegingen'. 'Het klepje dat weggaat' (het doortrekken) is zo'n aangedreven beweging. Er is energie nodig om de 'ondersteuning' van het water weg te nemen zodat het kan gaan vallen. Maar het water valt 'door de zwaartekracht' (zie uitspraak 8 van E1-3), zonder energie te 'krijgen'.

De leraar betreft 'energie krijgen' in 2 op het vallen en vat het op als 'meer beweging krijgen'. Maar voor Jan kan de leraar het nog over het doortrekken hebben. Hij protesteert dan ook niet tegen wat de leraar in 2 zegt. Ook leerling Leo vat de uitspraak van Jan op zoals de leraar (4) en gaat (vergelijkbaar met de redenering van Wil over een oplaadbare batterij in protocol E1-1) argumenteren dat het water die energie al in zijn bezit had. De leraar legt dat nog eens uitgebreid uit (5) en neemt dan aan dat de leerlingen een relatie kunnen leggen tussen vallen en energie 'hebben' (zie ook E1-3, uitspraak 1).

Om de uitleg van de leraar te kunnen snappen, moeten leerlingen aan de 'activiteit' vallen herkennen dat er van energie ('hebben') sprake is: hoe groter de snelheid hoe meer energie. Voor Jan is er slechts sprake van 'er zit energie in' als er brandstof in zit (zie Jan in protocol E1-3). Voor Jan heeft zich dus een blokkerende onderwijssituatie voorgedaan.

De redenering van Jan in protocol E1-4, uitspraak 1, wijst erop dat leerlingen met het denkbeeld 'vallen heeft niets met energie te maken' valsituaties op een onverwachte manier met energie in verband kunnen brengen. Energie heeft dan geen betrekking op het vallen zelf, maar op het veroorzaken van de val: het 'loslaten'. We zijn daarvan in alle proefklassen diverse voorbeelden tegengekomen zoals "het loslaten [van een steen] kost energie" en "het condenseren van een regendruppel (die gaat vallen) kost energie" (hetgeen impliceert dat de leerling niet weet dat er warmte/energie wordt afgegeven bij condenseren).

Er zijn ook leerlingen die energie zien als 'werkingsvoorwaarde voor vallen', zoals Judy in protocol E0-2. Leraar L₁ merkt deze redenering bij een leerling op: "je zegt er komt energie vrij ... een steen heeft energie is iets anders voor je gevoel dan er komt energie vrij". De leraar ziet zich vervolgens gesteld voor het probleem hoe hij duidelijk moet maken dat de steen vanwege zijn snelheid ook energie 'heeft'. Hij probeert dat als volgt. Hij denkt dat de leerling vindt "dat die energie niet in de steen zit maar in de beweging van de steen, dus het is de beweging van de steen die

energie heeft". En dat gebruikt hij voor de overstap naar het 'energie hebben' van de steen: "Dus het zit in de beweging van de steen, zolang als de steen beweegt heeft die bewegingsenergie, bij het neerkomen op de grond is die bewegingsenergie omgezet in warmte".

3.4.5 terugblik op het eerste themahoofdstuk

Als oriëntatie op het energiebegrip is het hoofdstuk geslaagd voor de leerlingen die 'energieverlies' kunnen zien als het afgeven van energie aan de omgeving: zij kunnen 'energieverlies' en 'behoud van energie' met elkaar in overeenstemming brengen. Maar sommigen raken in de war door de twee betekenissen waarin 'energieverlies' in dit hoofdstuk gebruikt wordt: 'energieverlies' als het 'verdwijnen' van energie, wat fysisch onmogelijk is, en 'energieverlies' als het niet kunnen gebruiken van een deel van de energie voor de gewenste taak. Dit hoofdstuk is minder geslaagd voor leerlingen die 'energieverlies' alleen maar betekenis geven als 'op de verkeerde plek terecht komen' van energie. Dergelijke leerlingen krijgen begripsproblemen als het gaat om energieverlies bij elektrische apparaten, waar geen energie 'naast' kan gaan.

Tot slot zijn er leerlingen die energie niet als een 'iets' voorstellen en warmte en licht niet als energiesoorten zien. Zij kunnen daardoor 'energieverlies' geen betekenis geven als de energie die op de verkeerde plek terecht komt of als de energie die in een niet gewenste vorm aan de omgeving wordt afgegeven. Er is een derde betekenisgeving mogelijk: 'verlies' als de energie die (zonder energieoverdracht aan de omgeving) door apparaten 'verbruikt' wordt voor een niet gewenste taak ('warm worden'). Maar het onderwijs laat weinig ruimte voor deze betekenis. Deze leerlingen ontwikkelen daardoor het begrip 'verlies' niet en ontmoeten daardoor ook begripsproblemen rond het begrip 'rendement'.

Ten aanzien van valsituaties biedt dit hoofdstuk voor veel leerlingen geen productieve onderwijssituaties omdat er in de begripsopbouw geen rekening mee is gehouden dat sommige leerlingen vallen niet met energie in verband brengen en dat leerlingen die energie als 'werkingsvoorwaarde voor vallen' zien, niet weten wat er met 'energie hebben ten gevolge van snelheid' bedoeld wordt.

We concluderen dat de meeste leerlingen na het eerste themahoofdstuk de beoogde conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' nog niet ontwikkeld hebben. Bovendien ontbreekt bij veel leerlingen kennis van begrippen die voor de volgende hoofdstukken nodig zijn: warmte en licht als energiesoorten, omzetten, energieverlies en rendement. Op grond daarvan verwachten we veel begripsproblemen bij de volgende themahoofdstukken. Niettemin hebben de leerlingen een aantal belangrijke dingen geleerd. Bijvoorbeeld het toepassen van de formule voor rendement en het interpreteren van 'het energiestroomdiagram van Nederland'. Maar dat heeft niet geleid tot een kwalitatieve begripsontwikkeling.

3.5 Begripsontwikkeling: het tweede themahoofdstuk

In §2.6.1 hebben we beschreven dat in het tweede themahoofdstuk ('Rendement') de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' wordt gebruikt om de formules voor energiesoorten te introduceren en te oefenen met het begrip rendement in taaksituaties. De aandacht wordt gericht op de formules voor energiesoorten en op het rendement van allerlei apparaten, die als 'omzetters' van energie gezien moeten worden.

3.5.1 taaksituaties: 'energie als een behouden en bruikbaar iets'

De leerlingen van groep 5-1 die bij het eerste themahoofdstuk over energie leken te praten als 'een behouden en bruikbaar iets', ontmoeten tijdens het onderwijs aan de hand van dit tweede themahoofdstuk weinig begripsproblemen. Onduidelijkheden in het themaboek kunnen zij zelf oplossen. Bijvoorbeeld rond het begrip 'uitgangsvermogen'. Daarmee wordt in het themaboek alleen het 'nuttige' uitgangsvermogen bedoeld. Maar Rob vindt "het uitgangsvermogen is hetzelfde als het ingangsvermogen" en kan de tegenwerping van de anderen ("dan zou ie een rendement van 100% hebben") pareren met "ik bedoel, je moet de [afgegeven] warmte er toch ook bij rekenen".

Dat wil niet zeggen dat in deze groep alles van een leien dakje gaat, want ze ontmoeten allerlei problemen die buiten het aandachtsveld van dit onderzoek vallen. Bijvoorbeeld: de complexiteit van de experimenten en de oefenopgaven kost hen hoofdbreken en ze halen eenheden door elkaar, zoals joule, watt en kWh.

3.5.2 taaksituaties: 'energie als een bruikbaar iets'

De leerlingen met de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets' moeten het vakaspect 'energiebehoud' nog ontwikkelen. In hoofdstuk E2 wordt dat aspect bekend verondersteld en krijgt het nauwelijks aandacht. Dat geeft aanleiding tot allerlei begripsproblemen en misverstanden tussen leraren en leerlingen.

omzetten en 'energieverlies'

In §3.4 hebben we beschreven dat Elie het begrip 'energieverlies' betekenis heeft gegeven als het op de verkeerde plek terecht komen van warmte/energie. Maar het 'warm worden' van (bijvoorbeeld elektrische) apparaten beschouwde hij niet als de productie van energie. Hij lijkt, net zoals we bij Piet zagen, te vinden dat er bij elektrische apparaten geen 'energieverlies' is omdat er geen elektrische energie 'naast' het apparaat terecht komt. Bij het berekenen van 'het rendement van een gloeilamp' heeft hij het dan ook geheel niet over 'verlies', zoals uit het volgende protocol blijkt.

Protocol E2-1 (discussie in groep 4-3, 'Energie', les 1, 2 en 3)

Situatie: De leerlingen discussiëren over de vraag hoe groot het in- en uitgangsvermogen is van een lamp (220V; 100W). Bij deze opgave wordt verwezen naar het energiestroomdiagram van de lamp. Daaruit blijkt dat het rendement van de lamp 8% is.

Anja en Job raadplegen deze figuur. Anja weet niet of 100W het ingangsvermogen of het uitgangsvermogen is, maar besluit tot 'ingangsvermogen'.

- 1 Elie 220V gebruikt ie toch en hij levert 100W
- 2 Bea Ik snap het
(Anja en Job zijn het oneens met Elie)
- 3 Elie Maar dat ding sluit je toch aan, dat doe je in het stopcontact
- 4 Anja Je moet het toch in dezelfde eenheid doen
- 5 Job Het is toch niet gewoon maal 8, ik weet het niet hoor
- 6 Bea Als je een lamp hebt dan komt er toch geen volt uit, anders kun je spanning krijgen
- 7 Elie Nee, die lamp die zet dat om, dat stond hier straks
(ze worden het niet eens, de volgende les legt de leraar de opgave uit.
Job en Bea lijken de uitleg te begrijpen)
- 8 Anja Maar ik snap niet waarom dat nou het *ingangsvermogen* is
- 9 L₂ Die 100W die op de lamp staat betekent: zoveel elektrisch vermogen pakt hij uit het lichtnet, dus dat is het ingangsvermogen van de lamp
- 10 Anja Moet je dat gewoon aannemen?
- 11 L₂ Het is gewoon een definitie, zo wordt het op de lamp geschreven
(Omdat hij afwezig was, schrijft Elie in les 3 de uitkomsten over en vraagt Job om een uitleg)
- 12 Elie Hee, hoe komen ze hier aan 8 watt?
- 13 Job Jij had zeker 220, dat is *echt* fout
- 14 Elie Er gaat 100W in?
- 15 Job Dit is gewoon de spanning die crop staat, maar er gaat 100W in, snap je dat? en dan door warmte en zo verliest hij zoveel dat er nog maar 8% in licht wordt omgezet, dus er komt 8% uit, de rest wordt allemaal warmte, snap je?
- 16 Elie Ja

Elie (1) ziet 220V als datgene wat de lamp (aan elektriciteit) gebruikt en 100W als datgene wat hij aan licht (dat is voor hem een vorm van energie, vergelijk protocol E0-1, uitspraak 9, 11) levert. Zijn argument ontleent hij aan de praktijk (3) en daarmee overtuigt hij Bea (2, 6). Hij verbaast zich niet over het verschil tussen beide waarden. Het formele tegenargument van Anja (4) verwerpt hij omdat de lamp volt in wat kan 'omzetten' (7). Hij kan daarbij denken aan het omrekenen (in een uitleg aan deze groep zei de leraar 'omzetten!') van kilowattuur (voor leerlingen een 'elektrische' eenheid) in joule (met watt een energie-eenheid).

Job heeft het in 5 over '8', welk getal hij lijkt te ontleen aan het energiestroomdiagram van de lamp: die produceert 8% 'licht'. De anderen gaan niet op zijn oplossing in (wellicht omdat hij die op een onzekere manier brengt).

Anja weet niet wat het verschil is tussen het ingangs- en het uitgangsvermogen (8). De uitleg van de leraar (9, 11) lost voor haar dat probleem niet op (10).

Bij zijn uitleg aan Elie in 15 gebruikt Job de termen 'verlies' en 'warmte' en lijkt hij naar 'energiebehoud' te verwijzen ('de rest wordt allemaal warmte').

Elie is niet verbaasd over het verschil tussen 220V 'ingående energie' en 100W 'uitgaande energie'. Misschien komt dat omdat je bij het 'omzetten' (= omrekenen, 7) van het één in het ander (zoals kWh in joule) een verschillend getal en verschillende eenheid krijgt. Dat zou sporen met het denkbeeld dat er in elektrische apparaten geen energie 'verloren' gaat: al het ingangsvermogen (elektrisch: in volt) wordt gebruikt

voor licht (in watt). Omdat de aandacht in de opgave alleen op het (impliciet 'gewenste') 'uitgangsvermogen' en niet op het totale uitgangsvermogen gericht wordt, komt zijn denkbeeld, dat er alleen licht en geen warmte(-energie) geproduceerd wordt, niet ter discussie. Daarom is er sprake van een blokkerende onderwijssituatie voor hem.

Job lijkt het energiestroomdiagram goed te kunnen interpreteren. Maar door zijn onzekerheid brengt hij zijn correcte oplossing niet op een duidelijke manier naar voren. Pas door de uitleg van de leraar wordt hij in zijn opvattingen bevestigd. Hij lijkt een stap te maken naar 'energie als een *behouden* en bruikbaar iets'.

Ook voor Bea lijkt er een productieve onderwijssituatie op te treden. Zij ziet (voor het eerst, voor zover we kunnen nagaan) in dat de lamp niet alleen energie verbruikt, maar ook energie produceert: een deel van de energie blijft 'behouden'.

Het belangrijkste 'verlies' bij de apparaten die in leerlingexperimenten aan de orde komen betreft de productie van ongewenste warmte. Toch gebruiken veel leerlingen alleen de betekenis 'op de verkeerde plek terecht komen': lucht die naast de windmolen terecht komt, licht dat naast de zonnecollector terecht komt, warmte die 'verloren gaat' door de stoom die uit een stoommachine ontsnapt.

energiesoorten en omzetten

Voor proefleerlingen met de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets' zijn apparaten die brandstof of elektriciteit omzetten in (gewenste) warmte of licht duidelijke 'omzetapparaten'. Bij sommige andere apparaten, als een windmolen of een zonnecel, weten leerlingen niet welke de 'ingående energiesoort' is. Volgens hen wekken die apparaten alleen energie op ('opwekapparaten'). Apparaten als een waterpomp of een auto 'verbruiken' volgens hen alleen energie en produceren geen 'uitgaande energiesoort' ('verbruikapparaten'). Die apparaten beschouwen ze dus niet als 'omzetters'.

Piet is een voorbeeld van zo'n leerling. In het volgende protocol ontdekt de leraar dat Piet een probleem heeft.

Protocol E2-2 (discussie in groep 4-2, 'Energie', les 6)

Situatie: De leerlingen werken het experiment 'de windmolen' uit. Piet heeft de elektrische energie als uitgaande energie kunnen berekenen. Hij vraagt aan de leraar hoe je de ingaande energie kunt uitrekenen. Die legt uitgebreid de formule voor de bewegingsenergie van de lucht uit.

- | | | |
|---|----------------|---|
| 1 | L ₂ | Klaar, dat [de bewegingsenergie van de lucht] is de energie die er in gaat, makkelijk hè, dat is U_{in} |
| 2 | Piet | Dat is hetzelfde, dat is precies hetzelfde als de $U_{beweging}$? |
| 3 | L ₂ | Aj, natuurlijk, de U_{in} is in elke proef een ander soort energie (geeft voorbeelden) ja? |
| 4 | L ₂ | Dus U_{in} is iedere keer de bron zeg maar van de energie die erin gaat |
| 5 | Piet | Ja dus al deze formules is allemaal U_{in} |
| 6 | L ₂ | Ja, maar het kan ook allemaal U_{uit} zijn |
| 7 | | (Piet valt stil, in de volgende les blijkt Piet nog met hetzelfde probleem te zitten) |

Piet heeft bij de uitleg van de leraar de bewegingsenergie van de lucht niet als 'ingaaende energie' herkend (2). De leraar heeft gedacht dat het probleem van Piet in de ingewikkelde formule voor bewegingsenergie van de lucht zat (1). In 3 ontdekt hij dat Piet niet begrijpt dat de bewegingsenergie van de lucht de 'ingaaende energie' is. De leraar lijkt te menen dat de 'ingaaende energie' voor Piet een energiesoort is zoals 'elektrische energie' (3). Hij geeft als criterium om uit te maken om welke energiesoort het gaat: ' U_{in} is de bron van de energie die erin gaat'. Hij slaat Piet dit criterium onmiddellijk weer uit handen door te zeggen dat 'de formules' ook de uitgaande energie kunnen betreffen (6). De stilte die valt (7) duidt erop dat Piet het niet begrepen heeft.

De leefwereldindeling van apparaten in 'opwekkapparaten' en 'verbruikkapparaten' wordt tijdens het onderwijs voor leerlingen als Piet aangevuld met, in plaats van vervangen door, een nieuwe categorie apparaten: 'omzetzters'. 'Opwekkapparaten' wekken volgens deze leerlingen energie op zonder dat er een 'toegevoerde' energiesoort is. De doelgericht 'opgewekte' energiesoort wordt vaak naar de 'bron' vernoemd:

- 'zwaarte-energie' als de (elektrische) energie die door water in een waterkrachtcentrale wordt *opgewekt* met behulp van de *zwaartekracht*;
- 'chemische energie' als de warmte die *vrijkomt* bij verbranden (een *chemische omzetting*);
- bewegingsenergie als de energie die door een 'motor', een bron van beweging, *geleverd* wordt: "een fietser levert bewegingsenergie";
- zonne-energie en windenergie als de energie die door zonnecellen respectievelijk windmolens wordt *opgewekt*.

Evenzo kunnen energiesoorten vernoemd worden naar de taak waarvoor zij gebruikt worden:

- zwaarte-energie als de energie die voor het omhooghijsen *gebruikt* wordt;
- 'bewegingsenergie' als de energie die *nodig is om te bewegen*, te mixen, te draaien (vergelijk ook de term 'bewegingsenergie' als de energie nodig om te vallen zoals Judy die in protocol E0-2 gebruikt).

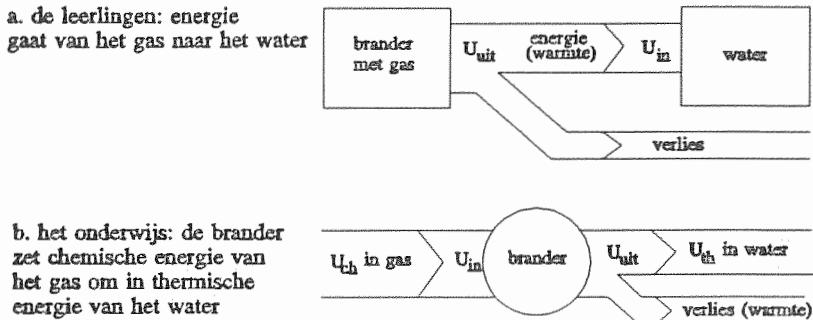
Dit soort betekenisgevingen leidt niet alleen tot fouten in kwalitatieve, maar ook in kwantitatieve redeneringen. We vinden bijvoorbeeld dat veel leerlingen denken dat ze met de formule $\frac{1}{2}mv^2$, toegepast op een auto, uitrekenen hoeveel energie nodig is om een auto op snelheid te houden.

Met de benoeming van een energiesoort naar de taak waarvoor energie wordt gebruikt wordt is het mogelijk betekenis te geven aan 'omzetten'. Bijvoorbeeld: 'een ventilator zet elektrische energie om in bewegingsenergie' kan door leerlingen opgevat worden als 'de ventilator gebruikt elektrische energie om te bewegen'. Eén leerling gaat zover dat hij in één zin twee betekenissen van 'bewegingsenergie' gebruikt: "een fietser zet zijn bewegingsenergie om in ... ja in bewegingsenergie van de fiets".

rendement

Veel leerlingen hebben moeite met het onthouden van de formule voor rendement: gaat het nu om U_{uit}/U_{in} of om U_{in}/U_{uit} ? Dit probleem doet zich met name voor bij opgaven en experimenten over het verwarmen van water. We hebben in §3.4 gezien

dat sommige leerlingen het in zo'n situatie hebben over de brandstof als bron van warmte/energie en het water als 'verbruiker' van dat deel van de warmte dat niet op de verkeerde plek terecht komt. Vanuit die zienswijze is er een probleem met betrekking tot 'ingaaende' en 'uitgaande' energie en met de formule voor rendement. De oorzaak daarvan kunnen we opsporen door het denkbeeld van de leerlingen en de redenering uit het onderwijs voor deze situatie naast elkaar te zetten (zie figuur 3-3).



Figuur 3-3: Energiestroomdiagram voor het verwarmen van water op een gasbrander:

- de leerling-redenering: de brander als energiebron. De ingaande energie, uitgaande energie en het verlies zijn van dezelfde energiesoort. De uitgaande energie is groter dan de ingaande.
- de redenering van het onderwijs: de brander als energieomzetapparaat. In dit diagram is de uitgaande energie kleiner dan de ingaande energie.

De hoeveelheid energie die met het gas te maken heeft, komt in de redenering van de leerlingen *uit het gas*, maar volgens het onderwijs gaat die *de brander in*. De energie die met het water te maken heeft gaat in de leerling-redenering *het water in*, maar komt volgens het onderwijs *de brander uit*. De leerlingredenering leidt tot de omgekeerde verhouding: U_{in}/U_{uit} .

Leraar L_2 behandelt in een nabespreking alle experimenten aan de hand van een op het bord getekend energiestroomdiagram (het energiestroomdiagram van figuur 3-3b voor het algemene geval). Dan gaan veel leerlingen pas begrijpen dat er bij apparaten *altijd* van een ingaande en uitgaande energie sprake is. Dat helpt Piet (en andere leerlingen) om uiteindelijk 'opwekapparaten' en 'verbruikapparaten' als 'omzetapparaten' te gaan zien.

3.5.3 taaksituaties: 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten'

energiesoorten, omzetten en 'verlies'

De conceptualisatie 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten', waarin energie 'gekregen' en meteen 'verbruikt' wordt biedt Anja geen mogelijkheid om het begrip 'energiesoorten' en 'omzetten' betekenis te geven. Een voorbeeld daarvan vinden we in het volgende protocol.

Protocol E2-3 (discussie in groep 4-3, 'Energie', les 1; deze discussiespeelt zich af ongeveer 10 minuten vóór de discussie van protocol E2-1)

Situatie: de groep heeft de leraar geroepen om uit te leggen wat met kWh bedoeld wordt. De leraar gaat ook in op het begrip watt.

- 1 L₂ Als ik zeg 'een lamp van 100W', wat bedoel ik daarmee?
- 2 Anja Die lamp (gelach)
- 3 Job Een lamp die 100W, eh
- 4 Anja Kan gebruiken
- 5 Job Per uur
- 6 L₂ Die 100W gebruikt per uur?
- 7 Elie Die 100W *energie* levert per uur
- 8 Anja Nee
- 9 L₂ Nee een lamp, zo'n lamp die levert toch geen energie
- 10 Elie Ja, shit, *gebruikt* dan
(leraar geeft verdere uitleg over watt, joule en kWh)

We analyseren dit protocol niet op de verwarring tussen energie, vermogen, kWh en kW per uur, maar alleen op de vraag wat de lamp met energie doet. In 2 ziet Anja '100W' als een eigenschap van de lamp, wellicht als een maat voor de lichtsterkte van de lamp. Door Job (3) wordt zij op het idee gebracht dat 100W aangeeft hoeveel de lamp gebruikt.

Terwijl de leraar wil ingaan op watt en kWh, richt Anja de aandacht op de vraag wat er in de lamp met de energie gebeurt, door met nadruk te zeggen dat de lamp energie 'gebruikt' (4). Ze heeft in het eerste themahoofdstuk geleerd dat energie niet 'verbruikt' wordt. Elie verandert 'gebruiken' in 7 in 'leveren', waarbij hij waarschijnlijk 100W als een maat ziet voor de geproduceerde hoeveelheid (licht)energie (zie ook protocol E0-1 en E2-1). Anja is het niet eens met het 'leveren' van Elie (8) en zij krijgt op dat punt (ten onrechte) van de leraar gelijk (9).

Bij navraag bleek de leraar in 9 te bedoelen dat de lamp geen energie levert in de zin van de energie die door een elektrische centrale geleverd wordt. We constateren dat hier sprake is van een blokkerende onderwijssituatie. Anja had hier misschien kunnen leren dat licht een vorm van energie is, maar nu wordt ze bevestigd in haar denkwijze waarin geen plaats is voor energieproductie door een lamp. Het is dus ook geen wonder dat ze in protocol E2-1 met grote begripsproblemen zit en bij een lamp geen 'ingaaend vermogen' of 'uitgaand vermogen' ziet.

Omdat Anja niet weet dat 'omzetapparaten' niet alleen energie(soorten) 'verbruiken', maar ook produceren, kan zij de energiesoorten die in opgaven en bij experimenten gevraagd worden niet aanwijzen of berekenen. We geven als voorbeeld het volgende protocol.

Protocol E2-4 (discussie in groep 4-3, 'Energie', les 4)

Situatie: De leerlingen hebben als leerlingproef een kwart liter water in een bekerglas op een campinggasbrander 40°C in temperatuur verhoogd en gemeten hoeveel gram gas daarbij verbruikt is. In de rekenopdrachten wordt gevraagd naar 'de verandering van de thermische energie van het water'. Anja en Bea vragen de leraar wat 'thermische energie' is.

- 1 L₂ Wat voor omzetting heeft hier nou plaats gevonden?

- 2 Anja Wat is thermische energie nou?
- 3 L₂ Ja maar wat bedoel je met thermische energie, met wat voor energieomzetting ben je bezig?
- 4 Elie Naar warmte-energie in ieder geval
- 5 Anja Hm (ontevreden)
- 6 L₂ Hoeveel energie wordt er door het gas geleverd, en waar gaat die energie naar toe?
- 7 Anja Naar het glas
- 8 L₂ Warmte, het glas, het water, dus het water wordt warmer, dat noemen ze?
- 9 Anja Thermische energie
- 10 L₂ Thermische energie van het water, en hoe reken je die energie uit?
- 11 Anja Dat vragen we
- 12 Bea Dat was toch deze, c keer m keer ΔT , dat is de enige die over warmte gaat, ha ha
- 13 De leraar gaat in op 'soortelijke warmte', met als voorbeeld een kg water verwarmen, met de vraag hoeveel liter gas daarvoor nodig is. Bea en Anja brengen echter kg in verband met het gas en liter met de hoeveelheid water die ze gebruikt hebben. Als de leraar weggaat, zijn de leerlingen ontevreden over de uitleg.
- 14 Anja Waarvan moet je die soortelijke warmte opzoeken, van dat gas of van dat ... van dat water?
- 15 Bea Van het water (gelach)
- 16 Anja Wat is er? Hoe weet je dat dat van water is?
(ze moeten aan een volgend experiment beginnen)
- 17 Twee lessen later komt dit probleem terug. Aan het feit dat de thermische energie van het water gevraagd wordt leidt Anja af dat de soortelijke warmte van water ingevuld moet worden. Zij meent dat de hoeveelheid 'gebruikte chemische energie', die ook gevraagd wordt, even groot is als de berekende hoeveelheid thermische energie.

De leraar (1, 3, 6) wil Anja en Bea geen pasklaar antwoord geven, maar hen zelf op het antwoord laten komen door vragen te stellen. Zijn vraag naar 'energieomzettingen' spreekt Anja niet aan (2). Wellicht omdat warmte voor haar geen energie is, reageert ze in 5 ontevreden op het antwoord van Elie in 4. Maar misschien is ze ook wel ontevreden omdat de leraar de formule voor thermische energie maar niet geeft (11). In 6 gaat de leraar het beeld gebruiken van energie die van de bron (het gas) naar de ontvanger (het water) gaat, met de bedoeling de leerlingen het water te laten aanwijzen als de plaats waar de energie terecht komt. Als die vraag niet het gewenste antwoord oplevert (7, 9) geeft de leraar het antwoord zelf (10). Hij realiseert zich niet dat leerlingen energie niet aan water toekennen en al helemaal niet dat Anja warmte zelfs niet als energie ziet.

Uit het feit dat de leraar ingaat op het begrip 'soortelijke warmte' leiden we af dat hij terecht een begripsprobleem rond dit begrip vermoedt. De verwarring rond kg en liter leidt niet tot een verheldering van dit probleem. Na deze discussie weet Anja niet of soortelijke warmte met gas of met water te maken heeft (14, 16).

Vanuit de conceptualisatie 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten' is er geen sprake van warmte/energie als een 'iets' dat van het gas naar het water gaat,

maar gaat energie 'krijgen' gepaard met onmiddellijk 'verbruiken' om te verwarmen. Niettemin gaat Anja in 7 in op de vraag van de leraar waar die energie (als een 'bruikbaar iets') naar toe gaat. Daarin bespeuren we een aanzet tot een begripsstap. Helaas heeft de leraar onvoldoende inzicht in het energiebegrip van Anja om te zien dat hij dieper op haar antwoord in 7 door zou moeten gaan.

Rond soortelijke warmte (13) doet zich opnieuw de situatie voor dat de leerlingen het gas als bron en het water als ontvanger van warmte/energie moeten gaan aanwijzen. De verwarring rond kg en liter lijkt hier het ontstaan van een productieve onderwijssituatie te verhinderen.

Het gelijkstellen van de hoeveelheid chemische energie aan de hoeveelheid thermische energie door Anja in 17 duidt erop dat dit slechts twee namen zijn voor hetzelfde: de energie die voor verwarming gebruikt wordt zodra die door het gas 'gegeven' is.

Ook in groep 4-2 vinden we begripsproblemen rond opwarmen van water, die betrekking hebben op het door elkaar halen van gas en water, van soortelijke warmte en verbrandingswarmte. Die problemen worden opgelost omdat de leerlingen onderscheid gaan maken tussen het gas als energiebron, het water als ontvanger van warmte/energie en warmte/energie, die van de bron naar de ontvanger stroomt.

rendement

In §3.4.3 beschreven we dat leraar L₁ Anja onbedoeld de suggestie deed dat het rendement de nuttig gebruikte *hoeveelheid* energie is (in plaats van het nuttig gebruikte *deel* van de totaal toegevoerde hoeveelheid). Omdat het begrip 'verlies' voor zo'n rendementbegrip niet nodig is, kan het waarschijnlijk makkelijk gebruikt worden door leerlingen zoals Anja, die niet weten wat 'energieverlies' is. Met behulp van verslagen van 29 leerlingen bij leerlingexperimenten hebben we kunnen nagaan of er veel leerlingen zijn die deze betekenisgeving gebruiken. Bij de experimenten over het rendement van 'omzetapparaten' moesten de leerlingen de volgende vragen beantwoorden:

"Langs welke wegen gaat er energie verloren?"

"Hoe zou het rendement verbeterd kunnen worden?"

Ongeveer de helft van de leerlingen blijkt deze vragen helemaal niet te beantwoorden. Zes leerlingen, waaronder Anja, beantwoorden de vraag over 'verlies' niet of nauwelijks. Hun antwoorden op de vraag over rendement hebben een opvallende overeenkomst: het rendement van een apparaat wordt vergroot door meer energie toe te voeren (zie tabel 3-2).

De antwoorden die we in tabel 3-2 hebben opgenomen wijzen allen op de ongewenste betekenis van rendement als 'de nuttig gebruikte hoeveelheid energie'. Het is opvallend dat deze betekenis tijdens de discussies in de klas verborgen is gebleven, niet alleen voor de leraar, maar ook voor ons bij de protocolanalyse. Bij nauwkeurige bestudering van de protocollen blijkt het gebruik van deze betekenis van rendement slechts enkele keren. Bijvoorbeeld als Anja $U_{el} = V \cdot I \cdot t$ aanwijst als formule voor het rendement bij de windmolenproef (met een windmolen werd elektri-

citeit opgewekt). Dit wordt zonder discussie door haar groepsgenoten terzijde geschoven. Het kan dus zijn dat het onbegrip is schuilgegaan achter het noemen en/of invullen van op zich relevante formules.

Tabel 3-2: Enige suggesties voor verbetering van het rendement van apparaten, ontleend aan de verslagen over de experimenten van leerlingen uit klas 4-2 en 4-3

over het experiment 'de stoommachine'

Anja "Het rendement kun je verhogen door een grotere stoomketel te nemen of door de draaiende as mee te helpen draaien in het begin zodat deze minder weerstand heeft"

Kim "De oorzaken van de verliezen zijn dat alles veel te klein is. Wanneer het allemaal groter was zou het lampje ook gaan branden, dat deed ie nu niet. Het rendement zou verbeterd kunnen worden door meer spiritus waardoor dynamo langer en sneller loopt."

over het experiment 'de waterpomp'

Anja "Het rendement kun je alleen verhogen door er meer elektrische energie aan toe te voegen"

over het experiment 'de windmolens'

Leo "Het rendement kun je verhogen door langere wieken te nemen en de windmaker harder te laten blazen."

over het experiment 'de zonnecel'

Anja "Het rendement kun je verhogen door de lamp er langer op te laten schijnen of een groter oppervlak te nemen die de straling opvangt of een sterkere lamp [= 'kunstzon'] te nemen"

als conclusie over alle experimenten

Bas "Het rendement is altijd lager dan de toegevoerde energie"

3.5.4 terugblik op het tweede themahoofdstuk

In dit hoofdstuk is er vanuit gegaan dat de leerlingen reeds in de 'Oriëntatie' de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' van het onderwijs hebben 'overgenomen'. In dit hoofdstuk moeten zij leren dat grondidee kwantitatief te gebruiken. Bij proefleerlingen die dat reeds kunnen gebruiken vinden we inderdaad nauwelijks begripsproblemen. De meeste proefleerlingen die de conceptualisatie nog niet ontwikkeld hebben ontmoeten daarentegen veel begripsproblemen en slechts weinig productieve onderwijssituaties. We kunnen daarvoor de volgende redenen aangeven. In dit hoofdstuk

- wordt nauwelijks beargumenteerd waarom iets een energiesoort is;
- wordt geen aandacht besteed aan het 'toekennen' van energiesoorten als kinetische energie en zwaarte-energie aan een voorwerp; daardoor kunnen deze soorten opgevat worden als energie die wordt opgewekt door of verbruikt voor bewegen respectievelijk vallen of omhoog brengen;
- wordt niet uitgelegd wat er onder 'energieomzetting' verstaan wordt;
- wordt de aandacht in opgaven alleen gericht op de 'gewenste energiesoort' die wordt geproduceerd en niet tevens op 'verlies', waarbij de behoudsregel zou moeten worden toegepast;

- wordt geen onderscheid gemaakt tussen 'energieverlies' bij omzetting (het warm worden van apparaten) en 'energieverlies' door energie die op de verkeerde plek terecht komt;
- worden nauwelijks energiestroomdiagrammen getekend, waardoor het onduidelijk blijft wat 'ingaaende' en wat 'uitgaande' energie is; dit leidt weer tot problemen rond het begrip 'rendement'.

Door deze tekortkomingen is er geen aanzet tot een discussie wat 'energieverlies' en 'energiebehoud' nu precies inhouden en blijft het voor veel leerlingen onduidelijk dat er een relatie is tussen het 'warm worden' van een apparaat en 'energieverlies'. Hoewel een begripsontwikkeling voor veel leerlingen uitblijft, leren ze wel omgaan met allerlei formules over energie.

3.6 Begripsontwikkeling: het derde themahoofdstuk

In het derde themahoofdstuk ('Degradatie van energie') worden de begrippen 'kwaliteit' en 'degradatie' van energie geïntroduceerd aan de hand van de bruikbaarheid van energie en energiesoorten in taaksituaties. 'Energieverlies' wordt geherinterpreteerd als behoud van energie en verbruik/verlies van kwaliteit. De Tweede Hoofdwet van de warmteleer wordt gebruikt om aan te geven dat het rendement van de ideale warmtemachine beperkt is.

3.6.1 taaksituaties: 'energie als een behouden en bruikbaar iets'

Voor de proefleerlingen die de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' al gebruiken, komt het begrip 'kwaliteit van energie' goed van pas. Dit begrip helpt hen een 'oplossing' te vinden voor de tegenspraak tussen energiebehoud en 'energieverbruik'. Intuïtief voelen deze leerlingen aan dat de ene energiesoort een hogere kwaliteit heeft dan de andere. Maar het criterium dat het lesmateriaal geeft ("energie van hoge kwaliteit is geschikt om met een hoog rendement voor veel verschillende doeleinden gebruikt te worden") blijkt niet eenduidig te zijn. In groep 5-1 neemt Wil 'het aantal doeleinden' als criterium voor kwaliteit. Sake probeert daarentegen de hoogte van het rendement als criterium en merkt tegen Wil op: "misschien kun je er weinig mee doen, maar wat je er mee doet [gebeurt] met een hoog rendement". Hij noemt als voorbeeld dat je water van 100°C met hoog rendement kunt gebruiken om een huis te verwarmen, maar dat je er verder weinig mee kunt doen. Hier wreekt zich het feit dat het praktijkgerichte begrip 'kwaliteit van energie' natuurkundig moeilijk scherp en eenduidig vastgelegd kan worden, waardoor het mogelijk wordt om de energiesoorten te ordenen naar kwaliteit. Dat is nodig voor de toepassing van de Tweede Hoofdwet van de Thermodynamica op 'ideale' warmtemachines als 'degradatie van het ene deel en opwaardering van het andere deel van de toegevoerde energie', leidend tot een 'netto degradatie'. Rond dit onderwerp treden er in groep 5-1 begripsproblemen op. De leerlingen vinden een warmtemachine (terecht) 'ideaal' als het een machine zonder wrijving is. Maar dat betekent voor hen ook (ten onrechte) dat een ideale warmtemachine een rendement

van 100% moet hebben. Ze hebben te weinig inzicht in de werking van de warmtemachine en het uitzetten van gassen om in te zien dat die machine niet kan werken zonder temperatuurverschil met de omgeving en dus niet zonder afvoer van warmte naar buiten.

Het is voor deze leerlingen soms moeilijk tegenover medeleerlingen te verdedigen dat energie behouden is. Bijvoorbeeld als het gaat over 'op temperatuur houden'. Hein raakt daarbij in problemen met het verschil tussen warmte en temperatuur.

Protocol E3-1 (discussie in groep 4-2 bij het invullen van de vragenlijst aan het einde van het themaonderwijs)

De leerlingen discussiëren over de situatie dat water op 40°C wordt gehouden terwijl de omgeving 10°C is. De vraag is of het juist is dat er (per seconde) door het water minder warmte aan de omgeving wordt afgestaan dan er wordt toegevoerd.

- | | | |
|----|------|--|
| 1 | Hein | Nee, gelijk |
| 2 | Ruud | Nee |
| 3 | Piet | Nee, natuurlijk niet, want dan koelt hij af |
| 4 | Hein | Ja, maar dat is toch zo |
| 5 | Ruud | Ja, dus dan wordt het 'is juist' |
| 6 | Hein | Ja dat koelt toch af, want de omgeving is kouder dan het water, dus de warmte van het water gaat de omgeving in, waardoor het water kouder wordt |
| 7 | Ruud | Dat water wordt op 40°C gehouden |
| 8 | Hein | Maar die energie die daarvoor nodig is (leest de opgaven nog eens op) ik denk, is fout |
| 9 | Piet | Ja maar als dat meer warmte aan de omgeving afstaat, dan betekent het dat het aan het afkoelen is |
| 10 | Ruud | Nee, het is wel juist, want dat water moet op 40°C gehouden worden, dus die warmte die afgestaan wordt, die ... |
| 11 | Piet | Die moet iets minder zijn |
| 12 | Hein | Nee die wordt weer vervangen door de ... |
| 13 | | (Hein heeft moeite om zijn argument te formuleren: hij neemt als voorbeeld dat het water 3°C afkoelt en stelt dat de omgeving dan 3°C opwarmt. De anderen 'vangen' hem op het feit dat de omgeving dan natuurlijk veel minder opwarmt. Dat moet hij toegeven en hij staakt de strijd.) |

Hein vindt dat de toe- en afvoer van warmte aan elkaar gelijk zijn (1). Piet en Ruud verwerpen die gedachte (3). Zij vinden dat het water 'iets minder' warmte moet afstaan (9, 11) omdat het anders afkoelt. Hein is het eens met Piet dat er van afkoeling sprake is (4). Maar hij bedoelt met afkoeling iets anders dan Piet (3), namelijk het afstaan van warmte (6) waardoor de temperatuur zou dalen als de afvoer niet door toevoer gecompenseerd werd (12). Piet (3) bedoelt alléén dat de temperatuur daalt. Piet en Ruud zijn er zo van overtuigd dat er warmte nodig is voor het 'op temperatuur houden' dat zij het slechts hebben over 'meer' (9) en 'minder warmte afstaan' (11) dan er toegevoerd

wordt¹⁴⁾. De mogelijkheid dat de toe- en afvoer gelijk zijn aan elkaar, het argument van Hein, lijken zij zelfs niet te overwegen.

In zijn uitleg komt Hein in problemen omdat er een verschil in betekenis van de term 'afkoelen' is tussen hem en zijn groepsgenoten. Volgens Piet is er al sprake van 'afkoeling' als er evenveel warmte wordt toegevoerd als er wordt afgevoerd (3). Dat zou kunnen betekenen dat een ideaal geïsoleerd huis volgens Piet kan afkoelen zonder dat er van warmteafgifte sprake is.

Hein gaat in 13 op dat argument in, maar (in een poging bij Piet aan te sluiten?) verwacht hij in zijn voorbeeld het afgeven van warmte (afkoelen in zijn eigen betekenis), dat gecompenseerd wordt door het toevoeren van warmte, met het dalen van temperatuur (3°C, afkoelen in de betekenis van Piet).

3.6.2 taaksituaties: 'energie als een bruikbaar iets'

Na het tweede themahoofdstuk is het begrip 'energieverlies' bij de proefleerlingen die energie zien als een 'bruikbaar iets' nog hoofdzakelijk beperkt tot 'op de verkeerde plek terecht komen'. Het begrip 'degradatie' leidt ertoe dat de leerlingen 'energieverlies' ook gaan betrekken op wrijving en het 'warm worden' van apparaten: 'energieverlies' als het uitvoeren van ongewenste, maar onvermijdelijke taken. Dat zien we bijvoorbeeld Piet doen als hij het begrip 'degradatie' begrijpt als het verschijnsel dat: "energie wordt omgezet in een energiesoort die niet meer gebruikt kan worden". Een klasgenoot concludeert: "dan is het geen energie meer". De leraar benadrukt dat de energie *minder* bruikbaar wordt. Piet gaat daar tegen in en verwijst naar een passage uit het hoofdstuk waarin staat "uiteindelijk wordt alle energie omgezet in een energiesoort die *niet meer gebruikt kan worden*" (onze cursivering). Omdat 'verloren warmte' niet meer bruikbaar is voor apparaten, vinden Piet en anderen die warmte geen 'energie'. Piet zegt bijvoorbeeld dat je de ene soort warmte niet met de andere kunt vergelijken. "Zonne-warmte" kun je omzetten in elektrische energie, "maar de warmte van water niet". Die 'warmte' kun je ook niet voor een stoommachine gebruiken, in tegenstelling tot 'warmte-energie' uit steenkool. In feite maakt Piet hier onderscheid tussen bruikbare warmtestromen en de onbruikbare 'warmte (=temperatuur?) van water'.

Het is voor Piet vanzelfsprekend dat er altijd wel wat energie 'verloren' gaat (en verdwijnt) waardoor een machine 'warm wordt'. Daarom is het verschil tussen de toegevoerde en de geproduceerde energie voor hem niet zonder meer gelijk aan de hoeveelheid ontwikkelde warmte. Daarvoor moet men immers inzien dat energie behouden is. Bij een opgave waarin de leerlingen het effect van de afgegeven warmte bij een elektrische centrale moeten uitrekenen (de temperatuurverhoging van het

14. In de opgave wordt bekend verondersteld dat er bij het afkoelen van het water warmte naar de omgeving wordt afgegeven. Maar het is mogelijk dat bijvoorbeeld Piet en Ruud vinden dat het water afkoelt zonder warmteafgifte. Dit punt komt naar aanleiding van protocollen uit de tweede ronde uitgebreid terug (zie hoofdstuk 5).

koelwater) raakt Piet dan ook geheel in de war. Hij vraagt zich af hoe je kunt weten dat de centrale behalve elektrische energie ook nog warmte produceert en waarom dan geen andere energiesoorten: "het kan wel lichtenergie worden of weet ik wat voor energie, zwaarte-energie, tja". Hij neemt uiteindelijk maar van de leraar aan dat er 60% warmte-energie aan de omgeving wordt afgegeven, maar hij lijkt dat betekenis te geven als warmte die op de verkeerde plek terecht komt en dus niet in de centrale wordt gebruikt.

De situatie van een centrale is de enige plaats in het thema waarin leerlingen expliciet gevraagd worden naar het effect van 'energieverlies' op de omgeving. Voor leerlingen die niet weten dat er 'warmte-energie' aan de omgeving afgegeven wordt is die situatie niet erg geschikt om een nieuw verliesbegrip te ontwikkelen. Natuurkundig gezien spelen immers verschillende soorten energieverlies in de centrale een rol:

1. 'schoorsteenverliezen': warmte die 'op de verkeerde plaats terecht komt' zoals de warme lucht van een haarföhn;
2. 'omzetverliezen': 'omzetting in een ongewenste soort' zoals bij het warm worden van een boormachine het geval is;
3. warmteafvoer vanwege het in standhouden van een temperatuurverschil in de centrale.

De eerste twee kunnen in het 'ideale' geval vermeden worden. De derde echter niet vanwege de beperkte kwaliteit van de toegevoerde warmte. Leerlingen zoals Piet gebruiken in plaats van de betekenissen 2 en 3 een vierde betekenis van 'energieverlies': de energie die 'op gaat' aan het 'overwinnen' van weerstanden die bij de werking van de centrale optreden en aan warm worden/blijven van de centrale. Ze hebben het daarbij niet over het afgeven van - in principe bruikbare - warmte aan de omgeving.

Zoals we in §3.4 gezegd hebben impliceert de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets' dat een 'gewoon' voorwerp geen energie kan 'hebben'. Een uitzondering daarop vormt misschien het idee dat er 'warmte zit in' een voorwerp met hoge temperatuur¹⁵). Maar daarbij is het niet vanzelfsprekend dat de warmte die het gekost heeft om iets op te warmen of te laten smelten, ook weer beschikbaar komt bij afkoelen of stollen. Piet zegt dat zo: "Als je energie in iets anders omzet is er altijd sprake van degradatie, dus je kunt nooit alle warmte weer terug krijgen". Leerlingen zoals Piet vinden het vanzelfsprekend dat er energie 'verbruikt' wordt als er een taak uitgevoerd wordt. Evenzo is 'energieverlies' de energie die 'verbruikt' wordt vanwege wrijving, elektrische weerstand of vanwege het 'op temperatuur houden' van een voorwerp. Van het laatste vinden we een voorbeeld als de leerlingen het hebben over een elektrische kachel. Het rendement van zo'n kachel kan volgens deze leerlingen niet 100% zijn want "er is ook nog energie nodig om hem [de kachel]

15. Waarschijnlijker is echter, op grond van resultaten van de tweede ronde, dat leerling warmte en temperatuur met elkaar verwarren als ze zeggen dat er in warm water 'warmte zit'.

warm te houden". Een leerling voegt daar nog aan toe dat er ook energie verloren gaat door de weerstand van de elektrische kachel.

Er zijn ook situaties waarin de energie volgens deze leerlingen gedeeltelijk 'op gaat' aan de nuttige taak, bijvoorbeeld het ronddraaien van een boormachine, en voor de rest aan 'verlies'. Het denkbeeld dat energie 'verbruikt' wordt ('verbruikdenkbeeld') is aangepast tot een 'verbruik- en verliesdenkbeeld'.

3.6.3 taaksituaties: 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten'

Voor leerlingen die redeneren vanuit de conceptualisatie 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten' is het moeilijk de begrippen 'kwaliteit' en 'degradatie' betekenis te geven. Deze begrippen veronderstellen immers dat je na gebruik nog steeds van energie kunt spreken, terwijl zij van mening zijn dat energie altijd 'verbruikt' wordt en verdwijnt. Misschien is het volgende een voorbeeld van een betekenisgeving aan degradatie vanuit hun conceptualisatie. Een leerling interpreteert degradatie als "de kracht van de energie neemt af". Dit doet denken aan de betekenisgeving 'apparaten kunnen een kracht produceren door middel van energie' (zie Anja in §3.3). Deze leerling probeert mogelijk de betekenis: 'energie kan na degradatie minder kracht geven aan een machine'. Helaas neemt de leraar deze betekenisgeving niet serieus ("ja en de massa van de energie neemt af, ha ha, de snelheid van de energie neemt af, we hebben dus krachtige energiebronnen en snelle energiebronnen"). Deze betekenisgeving had misschien kunnen leiden tot een productieve onderwijssituatie omdat de leerling had kunnen gaan praten over energie *na gebruik*.

Ondanks het feit dat leerlingen met deze conceptualisatie geen mogelijkheid vinden om 'energie', zoals er in het thema over gepraat wordt, kwalitatief te begrijpen, leren ze formules en andere formele regels gebruiken. Die regels kunnen ze echter geen betekenis geven in praktijksituaties. Zolang er formeel geredeneerd kan worden zijn zij redelijk succesvol, maar bij de interpretatie van resultaten gaat het mis. Anja kan bijvoorbeeld bij een elektriciteitscentrale van 600MW(e) en een rendement van 40% het toegevoerde vermogen van 1500MW uitrekenen. Ze ziet echter niet in dat de 1500MW het thermisch vermogen is: "1500 dat is die elektrische energie, maar je moet er chemische energie instoppen om 1500 vermogen elektrische energie uit te krijgen". Ze denkt dus dat slechts 40% van de 1500MW elektrische energie nuttig gebruikt wordt. Ze begrijpt niet waarom Elie en Job de 1500MW ('elektrische energie' volgens haar) in de formule (voor chemische energie) $Q = \text{verbrandingswarmte} \cdot m$ invullen. Voor hen is dat zo vanzelfsprekend dat ze alleen ingaan op het uitrekenen, niet op het waarom van het invullen.

Leerlingen als Anja zouden bij het maken van opgaven kunnen gaan afzien van relaties die uit hun conceptualisatie volgen ten gunste van fysische regels die zij uit het hoofd geleerd hebben. In eenvoudige situaties leidt dat tot correcte oplossingen. In meer complexe praktijkcontexten zou dat echter makkelijk tot fouten kunnen leiden.

3.6.4 valsituaties

In het derde themahoofdstuk komen ook enkele valsituaties aan de orde. Die worden onder andere gebruikt om het begrip 'degradatie' toe te lichten.

Het denkbeeld dat vallen niets met energie te maken heeft, vinden we ook nu nog bij enkele leerlingen, bijvoorbeeld bij Ruud. Hij vindt dat de energie van een voorwerp dat met constante snelheid valt niet afneemt. "Als ik uit een vliegtuig spring neemt mijn energie ook niet af, heb ik nog net zoveel energie als dat ik in het vliegtuig heb." Bij hem vinden we nergens een betekenisgeving van het begrip 'zwaarte-energie', al kan hij de formules in eenvoudige opgaven wel gebruiken.

Vanuit het denkbeeld dat energie de werkingsvoorwaarde voor vallen is kan 'zwaarte-energie' betekenis gegeven worden als 'de energie die een voorwerp krijgt tijdens het vallen'. Ook 'omzetting van zwaarte-energie in bewegingsenergie' kan dan vanuit dat denkbeeld geïnterpreteerd worden: de (zwaarte-)energie die een vallend voorwerp krijgt van de zwaartekracht wordt gebruikt voor *beweging*. Dat vinden we bijvoorbeeld bij Piet als hij zegt "zwaarte-energie is altijd bewegingsenergie, anders kun je geen zwaarte-energie hebben". Omdat zwaarte-energie voor hem altijd gelijk is aan bewegingsenergie kan hij opschrijven $m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} m \cdot v^2$. Zo kan hij de snelheid, waarmee een losgelaten voorwerp de grond bereikt, correct uitrekenen. Vanuit de bovengenoemde gedachtengang van Piet kunnen we ook begrijpen waarom sommige leerlingen zwaarte-energie en bewegingsenergie met elkaar verwarren. Zo'n verwarring vinden we bij Rob uit groep 5-1: "zwaarte-energie of kinetische energie, wat maakt het uit".

Het denkbeeld dat (zwaarte-)energie een werkingsvoorwaarde voor vallen is brengt met zich mee dat leerlingen geen scherp onderscheid kunnen maken tussen 'zwaarte-energie' en 'zwaartekracht'. Piet zegt bijvoorbeeld "de zwaarte-energie, die blijft hetzelfde want die blijft 9,8 maal de massa".

Er zijn leerlingen zoals Job uit groep 4-3 en Hein uit groep 4-2 die zwaarte-energie op een correcte manier leren gebruiken. Zij hebben echter moeite om hun verworven inzicht onder woorden te brengen en te verdedigen omdat zij in de war gebracht worden door de denkbeelden die hun groepsgenoten gebruiken. Zo vindt Hein dat de zwaarte-energie op het hoogste punt het grootst is en zegt tegen Piet: "daar werkt de zwaarte-energie en beneden [werkt de zwaarte-energie] toch niet". In de formulering 'de zwaarte-energie werkt' zien we dat hij, net als Piet, de begrippen zwaarte-energie en zwaartekracht niet scherp van elkaar onderscheidt.

3.6.5 terugblik op het derde themahoofdstuk

We hebben gevonden dat dit themahoofdstuk begripsproblemen oplevert voor alle leerlingen, ook al zijn die problemen nogal verschillend. Voor leerlingen met de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' is het begrip 'kwaliteit van energie' verhelderend vanwege het 'verzoenen' van energieverbruik met energiebehoud. De relatie tussen de Tweede Hoofdwet en het beperkt zijn van het rendement van warmtemachines is voor hen (te) moeilijk. We hebben gemerkt dat de begrippen 'energieverlies' en 'degradatie' voor deze leerlingen ongeveer hetzelfde inhouden. Een 'ideale warmtemachine' is voor hen een warmtemachine zonder ver-

lies/degradatie door wrijving of afkoeling en heeft daarom een rendement van 100%. We hebben overigens in gesprekken gemerkt dat ook leraren zich niet realiseren dat er in een *ideale* warmtemachine geen sprake is van degradatie van energie (geen verandering van entropie), terwijl het rendement toch kleiner is dan 100%.

Leerlingen met de conceptualisatie 'energie als een (niet-behouden) bruikbaar iets' komen in feite niet toe aan de leerstof over 'warmtemachines'. Het begrip 'kwaliteit' kan leiden tot productieve onderwijssituaties omdat het hen helpt betekenis te geven aan 'verlies door wrijving en warmte' naast 'verlies door op de verkeerde plaats terecht komen'. Sommige leerlingen kunnen daarmee de overstap naar 'energie als een behouden en bruikbaar iets' maken omdat ze 'verlies' gaan zien als de productie van 'warmte(-energie) met kleinere bruikbaarheid', waarmee ze 'behoud' betekenis geven. Maar veel leerlingen zien het ongewenst warm worden niet als productie, maar alleen als 'verbruik' van energie. Voor deze leerlingen staan er in dit hoofdstuk nauwelijks vragen waarin zij in eenvoudige situaties moeten oefenen met 'energiebehoud' en 'degradatie'. De gekozen praktijksituaties, zoals die van een thermische centrale, zijn te ingewikkeld.

Bij leerlingen met de conceptualisatie 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten' geven de begrippen 'kwaliteit' en 'degradatie' nauwelijks aanleiding tot productieve onderwijssituaties. Ze nemen hun toevlucht tot het 'mechanisch' toepassen van regels.

We concluderen dat het onderwijs er slechts bij enkele leerlingen (die met de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets') in geslaagd is 'energieverbruik' en 'energiebehoud' met elkaar te verzoenen met behulp van het begrip degradatie. Het onderwijs is er in het geheel niet in geslaagd leerlingen te laten begrijpen dat het rendement van warmtemachines principieel beperkt is.

3.7 Begripsontwikkeling: het blok

Wij zullen in deze paragraaf niet nagaan of de proefleerlingen de fysisch/mathematische technieken leren gebruiken die in het blok aan de orde komen. We beperken ons tot de vraag in hoeverre zij de conceptualisatie van het blok, 'energie als een behouden entiteit', gaan gebruiken.

3.7.1 vooruitgang door afzien van 'bruikbaarheid' als kenmerk van energie

We hebben in de vorige paragrafen gezien dat de proefleerlingen Sake, Wil en Rob uit groep 5-1, Job uit groep 4-3 en Hein uit groep 4-2 aan het einde van het thema de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' gebruikten. Deze leerlingen ondervinden weinig begripsproblemen aan het begin van het blok. We merken op dat ze energie aan voorwerpen toekennen. Hein heeft het bijvoorbeeld over "bewegingsenergie die in de lift ligt opgeslagen". En een stilstaande kist "heeft zwaarte-energie en dat houdt ie". Voor die leerlingen is het onderscheid tussen 'systeemenergieën' en 'energiestromen', dat in het eerste hoofdstuk van het blok gemaakt wordt, verhelderend. Ondanks het feit dat genoemde proefleerlingen in principe

een energievergelijking correct kunnen opstellen en uitwerken, komen ze tijdens het blok veel problemen tegen. Deze problemen vloeien voort uit:

- de complexiteit van de benodigde rekentechnieken;
- de complexiteit van de praktijksituaties zelf. De leerlingen moeten zelf vereenvoudigingen aanbrengen en een systeem kiezen;
- het worstelen met het afzien van het kenmerk 'bruikbaarheid' van energie, met name in discussies met groepsgenoten die dit kenmerk juist benadrukken.

Deze leerlingen leren energie als een 'entiteit' aan voorwerpen toe te kennen vanwege hun toestand. Hein zegt bijvoorbeeld over een lift die omhoog beweegt: "de energie ligt opgeslagen in de vorm van *zwaarte-energie*". En Job vraagt zich af wat voor een soort energie een automobilist in de auto bezit en geeft daarop zelf het antwoord "bewegingsenergie". Hij houdt dat vol tegenover Piet die het daar niet mee eens is omdat de automobilist stil zit.

In de loop van het blokonderwijs leren deze leerlingen dat ze de vraagstukken uit het blok niet vanuit de 'praktijk' moeten aanpakken, maar vanuit een 'vakstructuurgerichte' zienswijze. Een voorbeeld daarvan is de opgave waarin gevraagd wordt uit te rekenen hoeveel 'chemische energie het wegwerpen van de bal kost' aan een werper. In het volgende protocol volgen Hein en Job de gewenste aanpak. Zij kiezen de bal als 'systeem', terwijl Ria de werper als 'systeem' kiest.

Protocol A-1 (discussie in groep 5-2, 'Arbeid en Energie', les 14)

Situatie: De leerlingen stellen een energievergelijking op.

- | | | |
|----|------|---|
| 1 | Ria | Systeemenergie is dan kinetisch en chemisch hè? |
| 2 | Hein | Nee ... die bal heeft toch geen chemische energie |
| 3 | Ria | Nou volgens mij hebben we een verkeerd systeem gekozen |
| 4 | Job | Nee, je moet de bal nemen |
| 5 | Ria | Maar in de opgave staat 'de chemische energie die het <i>hem</i> kost' |
| 6 | Job | Maar waarom is dan de massa van de bal gegeven ... en het versnellingsdiagram? |
| 7 | Hein | De chemische energie kun je gelijk stellen aan de arbeid denk ik, ... die die levert om die bal weg te gooien |
| 8 | Job | Chemische energie is W [arbeid] plus Q [warmte] volgens mij |
| 9 | Hein | Ja |
| 10 | Ria | Chemische energie is één van de systeemenergieën |
| 11 | Hein | Neehee die bal heeft toch geen chemische energie
(de leerlingen berekenen de arbeid door de krachten op de bal en bepalen de verandering van kinetische energie) |

Hein weet dat je chemische energie aan iets moet toekennen (2, 11). Job en hij kiezen de bal als systeem en geven aan hoe je later, als de arbeid (van de werper op de bal) is berekend, de (verandering van) chemische energie (7, 8) van de werper kunt uitrekenen. Ria komt niet los van de gestelde vraag die de aandacht richt op de werper die de gevraagde 'chemische energie' (1, 5, 10) of 'kinetische energie' (1) moet leveren.

Terwijl Hein en Job over energie in abstracte, beschrijvende zin praten, lijkt Ria met 'bewegingsenergie' en 'chemische energie' te bedoelen de energie die de werper voor het wegwerpen gebruikt.

De begripsontwikkeling loopt in groep 5-1 minder uiteen dan in de andere groepen. Daardoor komen Sake, Wil en Rob tot diepgravende discussies.

Protocol A-2: (discussie in groep 5-1, 'Arbeid en Energie', les 1)

Situatie: De leerlingen beantwoorden een vraag naar de energiesoort(en) van een wekker op een nachtkastje.

- 1 Sake Zwaarte-energie want het nachtkastje staat op enige hoogte ... en als hij op de eerste verdieping staat heeft hij helemaal ...
- 2 Wil En als hij afgaat heeft hij geen zwaarte-energie meer ... dan ligt hij namelijk op de grond (gelach)
- 3 Sake Dan heeft hij nog zwaarte-energie, want als hij dan nog steeds niet (onverstaanbaar)
- 4 Wil Maar wacht even, wanneer heeft iets geen zwaarte-energie, als je in de kelder zit dan zou je kunnen zeggen dat ie negatieve zwaarte-energie heeft. Van wat voor punt moet je uitgaan?
- 5 Rob Van het middelpunt van de aarde eigenlijk
- 6 Sake Dat ligt er aan, van de zon is er ook zwaarte-energie

Sake praat over 'zwaarte-energie hebben' (3) en brengt dat in verband met hoogte (1). Het grapje van Wil (2) brengt in discussie welke hoogte je moet nemen (3, 4) en dus van welk nulniveau je moet uitgaan. Sake gaat zelfs zo ver dat hij rekening houdt met zwaarte-energie ten opzichte van de zon (6).

Deze leerlingen ontwikkelen spontaan het inzicht dat een vrije keuze van het nulniveau van zwaarte-energie mogelijk is. Opvallend in deze discussie is de beschrijving van de praktijksituatie in voor de praktijk niet benodigde, natuurkundige bewoordingen, een kenmerk van een 'vakstructuregerichte' begripsontwikkeling.

We concluderen dat de proefleerlingen die tijdens het thema de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' hebben ontwikkeld, tijdens het blok gaan afzien van het kenmerk 'bruikbaarheid' dat energie vanuit 'de praktijk' heeft. Daarmee ontwikkelen zij de conceptualisatie 'energie als een behouden entiteit'.

3.7.2 blokkade vanwege gebruik van het kenmerk 'bruikbaarheid'

We hebben gevonden dat vrij veel proefleerlingen zoals Piet uit groep 4-2 en Elie uit groep 5-3 aan het eind van het thema nog steeds de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets' gebruiken in taaksituaties. Het blok blijkt deze leerlingen nauwelijks de gelegenheid te bieden het vakaspect 'energiebehoud' alsnog te ontwikkelen, waardoor ze zouden kunnen gaan afzien van het kenmerk 'bruikbaarheid' van energie. We zullen een aantal voorbeelden geven van blokkerende onderwijssituaties die het gevolg zijn. De eerste voorbeelden van blokkerende onderwijssituaties gaan over 'energie hebben' in het geval dat er van beweging sprake is.

Piet vindt dat een fietser arbeid kan leveren "door de bewegingsenergie die hij heeft". En als de fietser trapt dan wordt die "bewegingsenergie omgezet in arbeid".

En elders zegt hij: "een mens die heeft altijd bewegingsenergie zolang ie niet dood is". We leiden daaruit af dat hij met bewegingsenergie het vermogen van mensen om te bewegen bedoelt. In tegenstelling tot mensen bezitten apparaten volgens Piet zo'n vermogen niet omdat ze niet 'vanzelf' kunnen werken: "bewegingsenergie die bezit ie [= een lift] zelf niet! Een lift die uit zichzelf beweegt ha ha." Met andere woorden: aan apparaten moet energie als 'werkingsvoorwaarde' van buitenaf geleverd worden, terwijl mensen zelf energie (als eigenschap) hebben. Dit denkbeeld lijkt het toekennen van energie aan voorwerpen vanwege bijvoorbeeld snelheid bij Piet (en anderen) te blokkeren. Daardoor kan Piet het in het lesmateriaal gemaakte onderscheid tussen 'systeemenergie' en 'energiestroom' niet overnemen en heeft hij veel moeite met het opstellen van een energievergelijking.

Een probleem dat zich veelvuldig voordoet betreft het invullen van de kinetische energieterm in situaties waarin sprake is van constante snelheid. Leerlingen als Piet lijken niet te zien dat er een Δ in die term voorkomt. Zij vullen die term in als $\frac{1}{2}m \cdot v^2$. Bij herhaling verbazen deze leerlingen zich over de uitkomst op het bord, wanneer ΔU_k gelijk gesteld wordt aan nul. "Als er geen kinetische energie is, beweegt de auto toch niet". We kunnen dat begrijpen als we veronderstellen dat leerlingen kinetische energie zien als de 'werkingsvoorwaarde' voor bewegen: de hoeveelheid energie die nodig is om te (blijven) bewegen. De dagelijkse ervaring zegt dat die hoeveelheid energie niet nul is.

Een tweede reeks voorbeelden van blokkerende onderwijssituaties betreft zwaarte-energie als 'werkingsvoorwaarde' voor vallen. Reeds eerder (zie §3.6) hebben we opgemerkt dat het onderscheid tussen (zwaarte-)energie en zwaartekracht moeilijk te maken is wanneer zwaarte-energie als 'werkingsvoorwaarde' voor vallen wordt gezien. Piet vindt bijvoorbeeld dat een voorwerp 'zwaarte-energie krijgt' als het valt (ook bij constante snelheid!). Maar ergens anders zegt hij: "zwaarte-energie heeft de lift altijd, die werkt er altijd op" en berekent deze als $m \cdot g$, waaruit blijkt dat hij hiermee de zwaartekracht bedoelt. In het blok levert deze verwarring grote problemen op omdat het blok vanwege de nadruk op arbeid voor een belangrijk deel ook over krachten gaat. Het volgende protocol laat zien dat de leraar niet op deze begripsproblemen verdacht is en een fysisch correcte uitleg geeft die door de leerlingen echter anders kan worden begrepen dan hij bedoelt.

Protocol A-3 (discussie in groep 5-2, 'Arbeid en Energie' les 2)

Situatie: Piet vraagt de leraar om uitleg bij de vraag 'welke vormen van opgeslagen energie een lift heeft' als de lift omhoog gaat.

- 1 L₃ De lift krijgt meer snelheid, dus meer kinetische energie
- 2 Piet Dus heeft hij, de vorm die opgeslagen ligt in het begin is dus bewegingsenergie
- 3 L₃ Als tie bewegingsenergie heeft dan beweegt hij ook, en als tie in het begin stil staat, dan heeft ie nog geen energie, maar als ie versnelt dan krijgt ie steeds meer bewegingsenergie. Hoe komt ie daar nou aan?
- 4 Piet Ik denk door elektrische energie, die wordt omgezet in bewegingsenergie
- 5 L₃ Inderdaad, die elektrische energie wordt gebruikt om bewegingsenergie te krijgen, maar dat niet alleen, welke energie krijgt ie nog meer?

- | | | |
|---|----------------|---|
| 6 | Piet | Wrijvingsenergie, warmte |
| 7 | Job | Zwaarte-energie |
| 8 | Piet | Maar die heeft ie toch ook als ie op de grond staat |
| 9 | L ₃ | Minder
(stilte, de leerlingen stellen andere vragen) |

Het eerste misverstand tussen L₃ en Piet betreft het begrip 'kinetische energie/bewegingsenergie'. Terwijl de leraar dat begrip in zijn natuurkundige betekenis gebruikt (1), vat Piet dat begrip op als een 'bruikbaar iets' *om te bewegen* dat in de lift ligt opgeslagen (2). Piet zou bijvoorbeeld kunnen denken aan een accu (elektrische energie, 4). Die energie is het grootst in het begin, op de begane grond. Hoe hoger de lift komt, hoe meer 'bewegingsenergie' is verbruikt. De leraar wijst er in 3 op dat de lift in het begin nog bewegingsenergie moet krijgen en bedoelt daar waarschijnlijk te vragen waar de bewegingsenergie vandaan komt. Maar Piet vat dat op als: de lift gebruikt (in de lift opgeslagen? zie 2) elektrische energie om te bewegen ('zet hij om in bewegingsenergie', 4) en om de wrijving te overwinnen ('wrijvingsenergie', 6).

Het tweede misverstand betreft het begrip 'zwaarte-energie'. In 5 doelt de leraar op de toename van zwaarte-energie. Piet pakt die suggestie niet op omdat hij denkt dat de lift steeds zwaarte-energie' heeft omdat de zwaartekracht erop werkt (8). De leraar vat het antwoord van Piet echter fysisch op: de lift heeft op verschillende hoogten weliswaar zwaarte-energie, maar de hoeveelheden verschillen (9).

Voor Piet is sprake van een blokkerende onderwijssituatie. Dit soort misverstanden doet zich veelvuldig voor tijdens het blok omdat de leraren (naar wij nu weten ten onrechte) veronderstellen dat de leerlingen begrippen als 'kinetische energie' en 'zwaarte-energie' gebruiken zoals ze in het lesmateriaal bedoeld zijn.

We vinden ook bij de andere proefleerlingen aanwijzingen dat zij weliswaar 'rekentechnieken' geleerd hebben, maar dat hun begripsontwikkeling tijdens het blok niet veel gevorderd is, zelfs niet met betrekking tot de begrippen kinetische energie en zwaarte-energie, toch de kernbegrippen van het blok. Het volgende protocol geeft daarvan een duidelijk voorbeeld.

Protocol A-4 (discussie bij de beantwoording van de vragenlijst na het blok)

Situatie: een groep leerlingen discussieert over de vraag of het juist is dat de kinetische energie van een omhoog geschoten kogel wordt omgezet in zwaarte-energie.

- | | | |
|----|------|--|
| 1 | Kees | Wat is precies zwaarte-energie, heb ik nooit geweten |
| 2 | Rian | Ja d'r werken toch twee energieën op, eentje de zwaarte-energie en eentje bewegingsenergie |
| 3 | Toos | Ja, zwaarte ... want zwaartekracht is er altijd |
| 4 | Rian | Zwaarte-energie dat is F_z keer Δs keer $\cos \alpha$ |
| 5 | Toos | Nee dat is arbeid |
| 6 | Rian | Ja dat was toch energie, arbeid is toch joule en energie is toch ook joule |
| 7 | Toos | Ik dacht, als ie omhoog gaat is bewegingsenergie, en als ie omlaag gaat zwaarte-energie |
| 8 | Rian | Maar dan wordt de bewegingsenergie niet omgezet in zwaarte-energie tijdens het omhoog gaan, maar in het hoogste punt |
| 9 | Kees | Volgens mij als dat ding valt is dat ook gewoon bewegingsenergie |
| 10 | Rian | Maar dan negatief ja |

- | | | |
|----|------|--|
| 11 | Hub | Volgens mij bestaat er geen zwaarte-energie |
| 12 | Rian | Dat zal best wel bestaan, maar ik weet niet precies wat dat is, zwaarte-energie, iets anders dan zwaartekracht volgens mij |
| 13 | Toos | Zwaartekracht is er altijd volgens mij, zwaarte-energie niet. |

Voor Kees wijst snelheid op energie en is er dus zowel bij het omhoog gaan als bij het vallen sprake van bewegingsenergie (9). Daarin zien we het denkbeeld 'energie als de activiteit bewegen'. Omdat er zowel bij omhoog gaan als bij vallen van bewegen sprake is ziet hij geen verschil tussen 'zwaarte-energie' en bewegingsenergie bij het vallen en weet hij niet wat hij onder zwaarte-energie moet verstaan (1).

Voor Rian en Toos is het verschil met krachten, behalve in formulevorm (4), onduidelijk (12, 13, zie ook 2: energie 'werkt', en 10: heeft een richting). 'Bewegingsenergie' is werkingsvoorwaarde bij het omhoog gaan en 'zwaarte-energie' is werkingsvoorwaarde bij het vallen (7). Dan is er alleen in het hoogste punt sprake van een 'omzetting' (8), niet tijdens het omhoog gaan.

Rian en Toos zouden kunnen denken dat het voorwerp 'bewegingsenergie' krijgt en verbruikt als het omhoog gegooid worden en 'zwaarte-energie' krijgt en verbruikt bij het vallen (denkbeeld: 'energie als werkingsvoorwaarde voor vallen'). Vanuit dat denkbeeld is het verschil tussen kracht en energie onduidelijk.

De werkingsvoorwaarde-redenering vinden we ook bij beweging van bijvoorbeeld een fietser in een dal: op de daalhelling 'krijgt' de fietser 'zwaarte-energie', het meest daar waar de helling het steilste is. In die redenering is er in het laagste punt geen sprake van energie (of kracht): daar wordt niets van de zwaartekracht 'gekregen'. Leerlingen als Kees vinden dat 'de energie' (als 'activiteit') in het laagste punt van het dal het grootst is omdat daar de snelheid het grootst is.

Een derde reeks voorbeelden gaan over remmen en botsen. Bij een remmende auto denkt Piet bij 'bewegingsenergie' aan het intrappen van het rempedaal en, zo vervolgt hij dan, "de bewegingsenergie geeft ie af aan de remblokjes en dan krijgt hij dus min-bewegingsenergie". Met 'min-bewegingsenergie' lijkt Piet de 'werkingsvoorwaarde' te bedoelen die de beweging doet afnemen. De afname van de snelheid zelf brengt hij niet met een energieomzetting in verband. Bij 'botsen' is er geen sprake van menselijke inspanning: dat gebeurt 'vanzelf'. Hoe leerlingen zo'n situatie met energie (als werkingsvoorwaarde) in verband brengen, blijkt uit het volgende protocol.

Protocol A-5 (discussie in groep 5-2, 'Arbeid en Energie' les 2)

Situatie: Ria begrijpt niet waarom een automobilist vóór de botsing al bewegingsenergie heeft en stelt daarover een vraag aan haar leraar die net uitgelegd heeft dat een bewegende lift bewegingsenergie heeft (zie protocol A-3).

- | | | |
|---|----------------|--|
| 1 | Ria | Ja, en hoezo is het dan bij die automobilist, waarom heeft ie bij die botsing dan wel al bewegingsenergie? |
| 2 | Job | Omdat ie aan het rijden is |
| 3 | L ₃ | Omdat ie moet rijden, anders botst het zo moeilijk |
| 4 | Ria | Maar die automobilist die zit toch stil |
| 5 | L ₃ | Je weet helemaal niet wat een botsing is? Die automobilist die heeft bewegingsenergie |

Volgens Ria beweegt de automobilist (vóór de botsing) zich niet en heeft dus geen bewegingsenergie (nodig) (4). De leraar begrijpt haar probleem niet (3). Hij vindt dat de relatie tussen snelheid en energie zo vanzelfsprekend is dat het maar dom is dat Ria snelheid hebben niet in verband brengt met 'bewegingsenergie hebben' (5).

Er zijn leerlingen die vinden dat de automobilist door zijn 'zwaarte' naar voren vliegt en bij de botsing 'zwaarte-energie' krijgt. Dat blijkt uit protocol A-6.

Protocol A-6: (discussie in groep 5-1, 'Arbeid en Energie', les 2)

Situatie: De leerlingen beschrijven de energieomzettingen die optreden bij een 'automobilist bij een botsing'.

- 1 Bea Zwaarte-energie
- 2 Lia Nee natuurlijk niet, kinetische, hij beweegt, hij wordt toch afgeremd
- 3 Ruud Zwaarte-energie, hij vliegt naar voren toe
(Bea, Elie en Ruud worden het eens over zwaarte-energie, Lia blijft volhouden: kinetische energie)
- 4 Bea Hij beweegt toch niet
- 5 Lia Hij heeft in beide gevallen zwaarte-energie dus die ...
- 6 Elie Ja nee beweging, hij zit gewoon in die wagen
- 7 Ruud Ja, dus hij beweegt toch niet
(Lia weet geen tegenargument te geven; discussie stopt)

Het is waarschijnlijk dat de 'zwaarte' van de automobilist voor Ruud en Bea de oorzaak/werkingsvoorwaarde is van het naar voren schieten van de automobilist (1, 3). Van 'kinetische energie' is volgens Ruud en Bea geen sprake omdat de automobilist zichzelf niet beweegt (4, 6, vergelijk Ria in protocol A-5). Lia ziet het bewegen zelf (2) daarentegen als blijk van 'bewegingsenergie'. In 5 lijkt zij te willen wijzen op het feit dat de hoogte van de automobilist niet verandert en dat de zwaarte-energie het 'naar voren schieten' dus niet kan veroorzaken.

We concluderen uit deze voorbeelden dat leerlingen als Elie en Ruud die na het thema 'energie als een bruikbaar iets' zagen, aan het eind van het blok weliswaar allerlei rekentechnieken geleerd hebben, maar in begripsontwikkeling niet veel verder gekomen zijn. De conceptualisatie 'energie als een behouden entiteit' sluit zo weinig bij hun denken aan dat zij nauwelijks productieve onderwijssituaties ontmoeten.

3.7.3 terugblik op het blok 'Arbeid en Energie'

Het blok 'Arbeid en Energie' heeft een vakstructuurgerichte begripsopbouw die blijkt uit het gebruik van de conceptualisatie 'energie als een behouden entiteit' en het behandelen van allerlei realistische probleemsituaties. We constateren dat alle proefleerlingen last hebben van de complexiteit van het blok onderwijs, met name wat betreft

- de te leren technieken: het berekenen van arbeid wanneer de kracht een hoek $\neq 0$ maakt met de weg, wanneer er van een kromme weg sprake is en wanneer de kracht niet constant is. Omdat het veel moeite kost om correct om te gaan met krachten (bijvoorbeeld bij ontbinden) zijn leerlingen minder gericht op het energiebegrip;

- praktijksituaties: er komen velerlei situaties aan de orde. De leerlingen moeten de aandacht niet bij voorbaat richten op dat onderdeel van de situatie dat vanuit de leefwereld met energie te maken heeft (zoals de werper van de bal), maar op dat onderdeel waarvan fysisch gezien voldoende bekend is om het gestelde probleem op te lossen (bijvoorbeeld de weggeworpen bal). Daardoor weten leerlingen soms niet welk systeem ze kunnen kiezen, wat het belang daarvan is of welke energiesoorten relevant zijn. Bovendien zijn realistische situaties meestal ook fysisch complex. In het blok moeten de leerlingen vaak zelf vereenvoudigingen aanbrengen, zoals het verwaarlozen van wrijving of rotaties;
- de begrippen: behalve het energiebegrip zelf zijn van belang de begrippen kracht, vermogen en arbeid. Het onderscheiden van deze begrippen vereist dat leerlingen nauwgezet redeneren en zich niet laten afleiden door leefwereldbetekenissen. Daarnaast zijn die begrippen zelf ook complex, zoals blijkt uit het bestaan van de vier vakaspecten van energie en uit het vectoriële karakter van kracht.

Desondanks blijken de leerlingen die bij aanvang van het thema de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' gebruiken een begripsontwikkeling door te maken naar 'energie als een behouden entiteit'.

Voor leerlingen die de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets' gebruiken biedt het blok nauwelijks productieve onderwijssituaties. Deze leerlingen proberen weliswaar de formele kant, de energievergelijking, toe te passen, maar lopen voortdurend vast omdat energie voor hen op de eerste plaats 'bruikbaar' en in voorwerpen als een batterij als een 'iets' of als eigenschap van mensen en bepaalde dingen aanwezig kan zijn. Maar energie is niet aanwezig vanwege snelheid of hoogte. Door het karakter 'werkingsvoorwaarde' van energie verwarren de leerlingen kracht en energie. Die verwarring doet zich vaker voor dan tijdens het themaonderwijs omdat het begrip 'kracht' in het thema nauwelijks een rol speelt.

3.8 Discussie

We zijn erin geslaagd protocollen te verzamelen, waarin het mogelijk is geweest een begripsontwikkeling bij leerlingen aan te wijzen en het productieve of blokkerende karakter van onderwijssituaties te beoordelen. We hebben kunnen constateren dat de groepsleerlingen in het algemeen goed kunnen samenwerken. Een uitzondering vormde groep 4-3, waarin leerling Job het niet goed met de rest kon vinden. Hij was onzeker en werd door zijn groepsgenoten niet serieus genomen. Het feit dat hij inhoudelijk vooruit liep op zijn groepsgenoten kan bijgedragen hebben tot zijn isolement in de groep. Job ging beter functioneren toen hij deel ging uitmaken van groep 5-2.

Er waren in de groepen geen dominante leerlingen. Dat wil niet zeggen dat sommige leerlingen niet meer aan het woord waren dan anderen. In groep 4-2 was Piet duidelijk het meest aan het woord, terwijl Onno weinig zei. In het algemeen bleken de leerlingen goed te kunnen formuleren, conform de in §3.2 geformuleerde

criteria. Een laatste eis was dat de leerlingen 'gemiddeld' zouden presteren. In tabel 3-3 hebben we de (gemiddelde) proefwerkcijfers voor het thema opgenomen.

Tabel 3-3: Gegevens over de themaproefwerkcijfers van de proefleerlingen en de gemiddelde cijfers voor hun klassen

<i>groep 5-1</i>		<i>groep 4-2</i>		<i>groep 4-3</i>	
Sake	7,5	Piet	6,9	Anja	6,9
Wil	7,2	Hein	6,5	Bea	5,9
Rob	7,4	Onno	5,2	Elie	6,2
		Ruud	7,8	Job	5,5
klas	7,1	klas	5,8	klas	5,8

We zien uit deze tabel dat de groepen beter dan gemiddeld presteerden. Voor de groepen 4-2 en 4-3 is dat niet verwonderlijk. In hun klas zaten immers nog leerlingen die geen natuurkunde in hun vakkenpakket zouden kiezen. In klas 5-1 zaten slechts 'kiezers'. Dat geeft aan dat groep 5-1 een relatief goede maar niet uitzonderlijk goede groep was.

In klas 4-2 en 4-3 is in de onderbouw volgens de leraar minder tijd aan het onderwerp 'energie' besteed dan in het PLON-curriculum was voorzien. Voor de leerlingen van klas 5-1 is in de onderbouw het 'normale' curriculum behandeld. Dat kan voor een deel verklaren waarom de leerlingen van groep 5-1 reeds bij aanvang van het thema een zo ver ontwikkeld energiebegrip hadden. Maar ook in hun klas vonden we een leerling die waarschijnlijk nog de conceptualisatie 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten' gebruikte. We concluderen dat de groepen globaal voldeden aan de eisen die we gesteld hadden (zie in §3.2).

Over de begripsontwikkeling van een aantal proefleerlingen (Onno uit groep 4-2, Ruud uit groep 4-2/5-3; Bea uit groep 4-3/5-3) hebben we geen of nauwelijks uitspraken gedaan. Van deze leerlingen hebben we onvoldoende uitingen kunnen vinden waaruit wij betekenisgevingen en het gebruik van een conceptualisatie konden afleiden. Wat betreft Onno hebben we al aangegeven dat hij nogal zwijgzaam was. Wat Ruud en Bea betreft is er een andere oorzaak. Zij namen steeds actief deel aan het gesprek, maar ze volgden in het algemeen de betekenisgevingen van groepsgenoten. Hun inbreng betrof het aandragen van formules of het maken van berekeningen. Dit doet vermoeden dat zij, net als Anja, 'losse' regels leerden die ze niet konden integreren in hun conceptuele netwerk. Dit vermoeden wordt bevestigd door de antwoorden die zij op de vragenlijst na het blok gaven. Ruud bracht daarin bijvoorbeeld vallen nog steeds niet met energie in verband, net als bij aanvang van het thema. Toch bleek hij uitstekend met zwaarte-energie te kunnen rekenen.

Daar waar we de beschikking hadden over gegevens van andere leerlingen (proefwerken, verslagen van experimenten), vonden we aanwijzingen voor het optreden van begripsproblemen die we ook in de protocollen zagen optreden.

We concluderen dat er redenen zijn om aan te nemen dat de begripsproblemen die we vooral bij enkele proefleerlingen gevonden hebben ook opgetreden zijn, evenals bij andere leerlingen uit de onderzochte klassen.

3.9 Conclusies van het eerste ronde protocolonderzoek

3.9.1 taaksituaties: energie als 'werkingsvoorwaarde'

Voor taaksituaties hebben we drie conceptualisaties gevonden waarin energie het karakter van 'werkingsvoorwaarde' heeft. Het is de bedoeling dat leerlingen in praktijkgericht energieonderwijs dit karakter van werkingsvoorwaarde verzoenen met het 'behouden zijn' van energie. Daartoe moeten de leerlingen de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' ontwikkelen.

'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten'

We hebben geconstateerd dat enkele proefleerlingen de conceptualisatie 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten' gebruikten bij aanvang van het onderwijs. Sommigen gaan al snel over naar de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets'. Die overgang doet zich met name voor waar het gaat om 'verwarmen' (van een huis, van water op vuur), waarbij de leerlingen over warmte gaan spreken als een 'iets' (bijvoorbeeld 'afgegeven warmte') en die gaan aanwijzen als energie. Daarmee is energie niet langer een kenmerk van de taaksituatie als geheel. Er wordt een gedifferentieerde relatie gelegd met voorwerpen binnen die situatie: er is een bron die warmte/energie levert en een verbruiker (een 'gewoon ding': bijvoorbeeld een huis) die warmte/energie verbruikt om warm te worden of te blijven.

We hebben één proefleerling (Anja) kunnen volgen die de conceptualisatie 'energie als een werkingsvoorwaarde voor apparaten' niet alleen bij aanvang maar ook later gebruikte. Anja ontmoette veel blokkerende onderwijssituaties en zij had moeite met veel begrippen (bijvoorbeeld 'energieverlies', omzetten en energiesoorten). Zij had bijzonder veel last van onzorgvuldig geformuleerde regels in het onderwijs. Omdat zij de voorbeeldsituaties meestal kwalitatief niet begreep, nam Anja haar toevlucht tot het 'mechanisch' toepassen van regels en formules.

'energie als een bruikbaar iets'

We hebben gevonden dat leerlingen met de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets' impliciet drie soorten taaksituaties onderscheiden: 'verbruikssituaties', 'omzetsituaties' en 'opweksituaties'.

In *'verbruikssituaties'* is sprake van een energiebron die energie 'levert' en een apparaat of een 'gewoon ding' dat die energie 'verbruikt' voor taken als verwarmen, omhoog brengen, aandrijven. 'Energieverlies' is het deel van de energie dat niet op de juiste plaats terecht komt. In tweede instantie is het ook energie die 'verbruikt' wordt voor niet gewenste, maar onvermijdelijke taken als het 'compenseren' van wrijving en afkoeling.

In 'opweksituaties' is er een apparaat dat 'energie opwekt', bijvoorbeeld uit brandstof, zonlicht of vallend water. Leerlingen benoemen de opgewekte energiesoort vaak naar de bron. Bijvoorbeeld zonne-energie (de elektrische energie die in een zonnecel wordt opgewekt). Deze betekenisgevingen worden onbedoeld gesuggereerd in het thema.

In de loop van het onderwijs gaan de leerlingen sommige 'verbruik-' en 'opweksituaties' beschouwen als 'omzetsituaties'. Leerlingen ontwikkelen het vakaspect 'omzetten' aan de hand van situaties waarin een beschikbare energiesoort 'verbruikt' wordt om een gewenste energiesoort op te wekken. Hoewel het 'verbruik' (bijvoorbeeld van elektrische energie) en datgene wat geleverd wordt (bijvoorbeeld licht) beide 'energie' genoemd worden, kunnen ze voor leerlingen toch zodanig anders zijn, dat ze (ook wat betreft de hoeveelheid) niet met elkaar vergeleken worden.

Het 'warm worden' van een apparaat heeft voor leerlingen in eerste instantie niets met verlies te maken. Pas bij het onderwerp degradatie gaan ze het 'warm worden' als 'energieverlies' zien: er 'gaat energie op' aan wrijving/warmte. Maar dat wil voor hen nog niet zeggen dat er ('bruikbare' warmte-)energie aan de omgeving afgegeven wordt¹⁶. Dat maakt dat energie ook in situaties waarin een 'energieomzetter' aan het werk is voor hen niet behouden is. Het is met name dit probleem dat uiteindelijk voor veel leerlingen het ontwikkelen van de 'conceptualisatie' energie als een behouden en bruikbaar iets' lijkt te blokkeren.

Er zijn enkele leerlingen die 'verlieswarmte' in de loop van het thema als een geproduceerde energiesoort leren zien. Daarmee kunnen zij 'energiebehoud' betekenis geven en stappen ze over naar de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets'. Leerlingen die het begrip 'energiebehoud' tijdens het thema nog niet ontwikkeld hebben, blijven tijdens het blokonderwijs over energie praten als 'werkingsvoorwaarde' die 'verbruikt' wordt bij het verrichten van een taak.

'energie als een behouden en bruikbaar iets'

We hebben een leerling gevonden die 'energie als een behouden en bruikbaar iets' reeds aan het begin van het thema kan gebruiken. De redenering dat je energie ergens in kunt stoppen en er weer uit kunt krijgen en dat iets dus energie kan 'hebben', helpt medeleerlingen dit grondidee te ontwikkelen. Vanuit deze conceptualisatie zijn 'behouden zijn' enerzijds en 'werkingsvoorwaarde' anderzijds essentiële kenmerken van energie. Deze kenmerken lijken met elkaar in tegenspraak omdat energie als 'werkingsvoorwaarde' wordt 'verbruikt' bij een taak. Maar ze worden met elkaar 'verzoend' door het idee dat de 'verbruikte' energie in een andere energiesoort wordt

16. In het eerste ronde onderzoek hebben we er niet aan getwijfeld dat leerlingen vinden dat er in deze situaties warmte aan de omgeving afgegeven wordt. We dachten dat het probleem (alleen) in de 'bruikbaarheid' van die warmte zat: onbruikbare warmte is geen energie. Op grond van resultaten van de tweede ronde terugkijkend op de eerste ronde merkten we op dat veel leerlingen het helemaal niet over 'afgeven van warmte' hebben.

omgezet, die toch weer bruikbaar is voor een andere taak, al is de bruikbaarheid afgenomen.

De leerlingen met deze conceptualisatie ontmoeten vrij weinig begripsproblemen, hoewel ze steeds moeite moeten doen om af te zien van denkbeelden die met 'behoud' in tegenspraak zijn. De belangrijkste begripsproblemen betreffen 'kwaliteit van energiesoorten' en 'de ideale warmtemachine'.

3.9.2 valsituaties: drie denkbeelden

Ten aanzien van valsituaties vinden we drie denkbeelden. Het eerste denkbeeld zegt dat valsituaties (en enkele andere situaties waarin dingen vanuit de leefwereld gezien 'vanzelf', zonder doelgericht menselijk ingrijpen, gebeuren) niets met energie te maken hebben.

Het tweede zegt dat energie in deze situaties ook een 'werkingsvoorwaarde' is voor het verlopen van de gebeurtenis. Energie wordt 'gekregen' en meteen 'verbruikt'. Vanwege het oorzakelijk karakter dat energie als 'werkingsvoorwaarde' heeft, ligt de verwarring van kracht en energie in dat soort situaties voor de hand. Dat geeft met name in het blok aanleiding tot allerlei blokkerende onderwijssituaties.

Het derde denkbeeld zegt dat (alleen) de 'activiteit' vallen zelf energie is, met snelheid als maat voor de hoeveelheid energie. Vanuit dit laatste denkbeeld kunnen leerlingen het verschil tussen bewegingsenergie en zwaarte-energie bij vallen niet goed aangeven. Door die activiteit kan er ook energie 'opgewekt' worden, bijvoorbeeld in een waterkrachtcentrale.

3.9.3 algemeen fysische situaties: 'energie als een behouden entiteit'

Het is de bedoeling dat leerlingen tijdens het blok een vakstructuurgerichte begripsontwikkeling doormaken. Dat wil zeggen dat ze alle situaties vanuit hetzelfde begripkader beschouwen en dus geen onderscheid meer maken tussen taaksituaties, valsituaties en situaties waarin mensen inspanning leveren. Dat betekent dat ze één conceptualisatie gebruiken voor algemeen fysische situaties: 'energie als behouden entiteit'.

Bij de leerlingen die tijdens het thema 'energie als een behouden en bruikbaar iets' ontwikkeld hebben, vinden we geen blokkerende begripsproblemen tijdens het blokonderwijs. Zij leren afzien van energie als 'werkingsvoorwaarde'. We vinden bij hen soms diepgaande discussies waarin een vakstructuurgerichte begripsontwikkeling tot uiting komt.

Enkele leerlingen die deze conceptualisatie gaan gebruiken hebben tijdens het blok soms moeite om af te zien van het oorzakelijke karakter dat energie ook vanuit 'energie als een behouden en bruikbaar iets' heeft. Dat uit zich onder meer in het verwarren van kracht, arbeid en energie. Aan het eind van het blok lijken ze deze problemen overwonnen te hebben.

3.9.4 algemene conclusie van het eerste ronde protocolonderzoek

We hebben een kader gevonden waarmee de begripsopbouw in het lesmateriaal en begripsontwikkeling bij leerlingen met betrekking tot energie beschreven kan worden

als een opeenvolging van conceptualisaties met betrekking tot taaksituaties. Daarnaast hebben we denkbeelden voor valsituaties gevonden. Die twee indelingen komen uiteindelijk samen in één conceptualisatie voor algemeen fysische situaties.

De gewenste praktijkgerichte en vakstructuurgerichte begripsontwikkeling heeft zich slechts bij een gedeelte van de gevolgde proefleerlingen voorgedaan. De begripsontwikkeling bij de andere leerlingen, met name de ontwikkeling van het vakaspect 'energiebehoud', wordt geblokkeerd door het karakter van energie als 'werkingsvoorwaarde'. Deze leerlingen blijven denken dat energie uiteindelijk, eventueel na eerst in een andere vorm omgezet te zijn, bij het uitvoeren van een (gewenste of niet gewenste) taak 'verbruikt' wordt.

Aan de hand van deze resultaten kunnen we aanwijzen op welke punten de begripsopbouw in de thema/blok-combinatie 'Energie/Arbeid en Energie' gebrekkig is. Het thema begint met een conceptualisatie die te moeilijk is voor leerlingen en maakt te grote stappen bij de overgang van de ene naar de andere conceptualisatie. In de begripsopbouw wordt aangenomen dat de leerlingen het energiebegrip onmiddellijk kunnen gebruiken in de nieuwe betekenis die het vanuit die conceptualisatie heeft. Nieuwe aspecten, zoals 'energiebehoud' worden echter niet in eenvoudige situaties geoefend waardoor er te weinig productieve onderwijssituaties ontstaan. De gebruikte (fysisch correct bedoelde, maar soms 'slordige') formuleringen geven vaak aanleiding tot onvermoede misverstanden, waardoor de begripsontwikkeling van de leerlingen geblokkeerd wordt. Aldus hebben we een aantal basale begripsproblemen opgespoord die naar onze indruk voor een belangrijk deel ook bij gebruik van andere onderwijsleermethoden zullen optreden. In het PLON-energieonderwijs komen deze begripsproblemen komen zo scherp naar voren omdat het leggen van de relatie tussen leerstof en realiteit steeds nadrukkelijk wordt nagestreefd. Het een en ander maakt een ingrijpende verandering in de begripsopbouw in thema en blok noodzakelijk. Het gevonden kader kan als uitgangspunt bij deze begripsopbouw dienen.

4 Revisie van het lesmateriaal

4.1 Het revisieproces

4.1.1 de planning van het revisieproces

In de opzet van het onderzoek (Van der Valk & Lijnse, 1986) was een revisie van het lesmateriaal voorzien, uit te voeren door leraren/medewerkers van de SLO binnen het Project Bovenbouw Natuurkunde PBN. Het tijdstip van revisie was zo gekozen dat de deelnemende scholen het vernieuwde thema aan het eind van de vierde klas van het schooljaar 1987/1988 konden gebruiken en het nieuwe blok aan het begin van het daaropvolgende schooljaar.

Ten tijde van de revisie was een belangrijk deel van de resultaten van de protocolanalyse beschikbaar maar de doordenking van de samenhang tussen verschillende resultaten kwam in het iteratieve proces waarlangs de protocolanalyse zich voltrok (zie §3.2), pas tot stand toen het revisieproces al was afgerond. Een aantal termen die op bedoelde samenhang betrekking hebben, zoals 'conceptualisatie', werden dan ook in het revisieproces nog niet expliciet gebruikt. Niettemin zullen we deze begrippen bij de beschrijving van de revisie gebruiken omdat ze daarbij impliciet toch al een rol speelden.

4.1.2 het feitelijk verloop van de revisie

Een randvoorwaarde bij de revisie was dat de lessenseries de energieonderwerpen uit de leerstofgebieden 'Mechanica', 'Vloeistoffen, Gassen, Warmteleer' en 'Electriciteit en Magnetisme' van het vernieuwde examenprogramma natuurkunde VWO (WEN, 1988) zouden omvatten.

Voor het nieuwe thema en blok werden 'blauwdrukken' gemaakt (Van der Valk, Poorthuis & Payens, 1987, 1988) door de leraar/ontwikkelaars en de onderzoeker. Deze bevatten een voorstel voor de globale opzet van de lessenseries, de leerstofinhoud en de begripsopbouw, alsmede een eerste globale uitwerking van hoofdstukken. Op basis van deze blauwdrukken zijn, in voortdurende discussie tussen leraar/ontwikkelaars en onderzoeker, het thema 'Energievoorziening' (Poorthuis, Payens en Van der Valk, 1988a) en het blok 'Arbeid en Energie' (Poorthuis, Payens en Van der Valk, 1988b) geschreven. Dit lesmateriaal beschrijven we kort in §4.4. De inhoudsopgaven van het thema en het blok zijn opgenomen als bijlage 3 en 4.

4.1.3 de scholing van deelnemende leraren

De leraren van de zeven scholen die ervaring hadden met de PLON-thema/blok-combinatie 'Energie/Arbeid en Energie' werden uitgenodigd het tweede ronde lesmate-

riaal in de klas te gebruiken en deel te nemen aan een scholingscursus. Acht leraren van zes scholen gingen daar op in. De scholingscursus werd door de gezamenlijke auteurs van het gereviseerde lesmateriaal gegeven. De cursus omvatte twee bijeenkomsten van drie uur over het thema in maart 1988, twee over het blok in september 1988 en een nabespreking over de thema/blok-combinatie eind 1988.

Doel van de inscholingscursus was de leraren in te lichten over de specifieke kenmerken van het lesmateriaal, met name de geplande begripsopbouw. Er werd aandacht besteed aan de resultaten van het onderzoek in eerste ronde, onder andere aan de hand van enkele protocollen. Daarmee werd een toelichting gegeven op de keuzen die bij de revisie gemaakt zijn. We oefenden met hen een aantal specifieke kenmerken van de begripsopbouw zoals het omgaan met denkbeelden en het gebruik van de in de opbouw gewenste begrippen en het weglaten van begrippen die tot een zekere moment in de begripsopbouw ongewenst zijn (bijvoorbeeld de 'opslag-energiesoorten'). Een aantal experimenten werd getoond en beproefd.

De leraren vonden de ontworpen begripsopbouw interessant en de moeite van het uitproberen waard. Maar ze zagen als probleem dat de begripsopbouw tal van aspecten bevat die voor hen nieuw waren. Zij wilden de begripsopbouw in hun lessen wel uitproberen maar ze vreesden dat ze dat niet consequent zouden kunnen doen. Om daaraan tegemoet te komen is met hen geoefend met de zegswijzen die op een bepaalde plaats in de begripsopbouw van hen verlangd wordt. Zij bleken bereid om hun lessen op elkaar af te stemmen ten behoeve van het onderzoek (vergelijkbare onderzoeksgroepen) en de proefwerken, die door ons werden opgesteld, af te nemen.

4.2 Het raamwerk van de revisie

In deze paragraaf beschrijven we veronderstellingen en keuzen die we bij de revisie van het lesmateriaal gemaakt hebben. Dat mondt uiteindelijk uit in de formulering van twee hypothesen voor het tweede ronde protocolonderzoek.

4.2.1 veronderstellingen en keuzen bij de revisie

De volgende resultaten kwamen beschikbaar vóór of tijdens de revisie van het lesmateriaal:

- wat het deelonderzoek naar de wendbaarheid betreft (Van der Valk e.a. 1988, zie ook hoofdstuk 6) vonden we dat de wendbaarheid bij de leerlingen tijdens het onderwijs aan de hand van het oorspronkelijke PLON-thema weliswaar toenam, maar minder dan verwacht. Tijdens het blokonderwijs nam de wendbaarheid niet toe;
- wat het deelonderzoek naar begripsontwikkeling betreft vonden we bij de leerlingen veel begripsproblemen die we konden terugvoeren op een verschil in conceptualisatie tussen de leerlingen enerzijds en het onderwijs anderzijds. Veel van deze begripsproblemen werden tijdens het onderwijs niet opgelost (Van der Valk e.a. 1989, zie ook hoofdstuk 3).

De resultaten van beide deelonderzoeken ondersteunden elkaar en leidden tot de conclusie dat veel leerlingen het energiebegrip dat in het eerste hoofdstuk van het thema wordt geïntroduceerd, aan het eind van de onderwijsperiode nog niet hadden ontwikkeld. Niettemin hebben we bij leerlingen blijken van begripsontwikkeling waargenomen, die ons aanleiding gegeven hebben tot het maken van een aantal veronderstellingen en keuzen.

Voortbouwend op de oorspronkelijke thema/blok-combinatie streven we in de gereviseerde begripsopbouw eerst een 'praktijkgerichte' begripsontwikkeling na, waartoe we allerlei 'taaksituaties' uit het contextgebied 'energiegebruik en energievoorziening' aan de orde stellen. Daarna volgt een vakgerichte begripsopbouw aan de hand van meer algemeen fysische situaties.

We hebben aanwijzingen gevonden dat de ontwikkeling van het energiebegrip bij leerlingen verloopt als een opeenvolging van steeds 'betere' redeneringen, uitmondend in fysisch correcte redeneringen. In taaksituaties zou de voorstelling van energie als een 'bruikbaar iets' een vruchtbaar tussenstadium kunnen vormen op weg naar het energiebegrip dat in het VWO als eindniveau wordt nagestreefd. We hebben gevonden dat leerlingen die zo'n voorstelling gebruiken samen met 'energiebehoud', ook het energiebegrip in algemeen fysische situaties correct leren gebruiken.

We baseren onze begripsopbouw daarom op de volgende *opeenvolging van conceptualisaties*:

voor taaksituaties:

- 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten';
- 'energie als een bruikbaar iets';
- 'energie als een behouden en bruikbaar iets';

voor algemeen fysische situaties:

- 'energie als een behouden entiteit'.

We veronderstellen dat de leerlingen in de onderbouw het grondidee 'energie als een bruikbaar iets' reeds hebben ontwikkeld, maar we houden rekening met de mogelijkheid dat dat niet voor alle leerlingen het geval is. Gezien het examenprogramma lijkt het ons niet nodig de 'academische' conceptualisatie te gebruiken. Een wendbaar gebruik van 'energie als een behouden entiteit' lijkt ons voldoende en heeft bovendien als voordeel dat de leerlingen naast de natuurkundige regels en relaties ook een houvast hebben aan de voorstelling dat energie in een systeem aanwezig is en van het ene aan het andere systeem overgedragen kan worden.

We veronderstellen dat de *vakaspecten* van energie het beste eerst (min of meer) afzonderlijk aan de orde kunnen komen voordat hun onderlinge relatie benadrukt wordt. 'Energieoverdracht' ligt het dichtst bij het leefwereldenergiebegrip en kan daarom als eerste aan bod komen. 'Energieomzetting' kan geïntroduceerd worden als het verdwijnen van de 'verbruikte' energiesoort en het ontstaan van nieuwe energiesoorten. Het lijkt het beste 'energiebehoud' in stappen op te bouwen, eerst beperkt tot situaties waarin evenveel energie aan een voorwerp/apparaat wordt toegevoerd als er aan de omgeving wordt afgegeven, vervolgens in situaties waarin dat niet het geval is, zodat er energie aan voorwerpen toegekend moet worden en tenslotte in situaties waarin sprake is van inwendige energieomzettingen. 'Energiedegra-

datie' kan evenzo in stappen opgebouwd worden: eerst in situaties waarin sprake is van energietransport: 'energieverlies' vanwege het op de verkeerde plek terecht komen van energie, vervolgens in situaties waarin sprake is van het produceren van een gewenste energiesoort: 'energieverlies' vanwege het ontstaan van 'ongewenste' energiesoorten en tenslotte bij warmtemachines: energieverlies vanwege de beperkte kwaliteit van de energiesoort warmte.

We veronderstellen dat leerlingen veel afweten van 'taaksituaties': alle leerlingen

- weten dat er 'energiebronnen' zijn die energie kunnen 'leveren';
- weten dat de meeste apparaten energie 'verbruiken', maar dat er ook apparaten zijn die energie opwekken;
- vinden 'elektriciteit' het duidelijkste voorbeeld van energie en weten dat elektrische energie van de elektriciteitsbron naar het verbruikapparaat gaat;
- zijn bekend met het bestaan van de mogelijkheid energie 'op te slaan' bijvoorbeeld in een accu.

4.2.2 onderwijsbeelden van energie

Bij het uitwerken van de begripsopbouw in de nieuwe thema/blok-combinatie hebben we gebruik gemaakt van op elkaar volgende 'onderwijsbeelden' die een operationalisatie vormen van de hierboven genoemde opeenvolgende conceptualisaties. We hebben onderwijsbeelden geconstrueerd die zo dicht mogelijk bij voorstellingen liggen die we in het eerste ronde protocolonderzoek bij leerlingen vonden. Zo hebben we geprobeerd te bereiken dat het verschil tussen de in het onderwijs bedoelde begrippen en de door de leerlingen ontwikkelde begrippen klein is en blijft en dat er geen misverstanden optreden tussen het onderwijs en leerlingen.

Het verwerken van de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets' in een onderwijsbeeld brengt problemen met zich mee. Dit grondidee stamt niet uit het vakgebied maar is van leerlingen afkomstig. Het kan niet zonder meer in het onderwijs gebruikt worden omdat belangrijke aspecten, zoals 'energiebehoud' nog ontbreken. Is het bijvoorbeeld natuurkundig wel acceptabel om te spreken over het 'verbruiken' en 'opwekken' van energie?

We hebben de eis gesteld dat het onderwijsbeeld dat bij 'energie als een bruikbaar iets' aansluit, natuurkundig acceptabel is. Daartoe is de zegswijze 'verbruik van energie' vervangen door 'verbruik van een energiesoort' (en evenzo voor 'opwekken'). Dat is misschien ongebruikelijk, maar niet incorrect. Dat er bij dat 'verbruik' van een energiesoort meteen andere energiesoorten ontstaan, hoeft in het onderwijs in eerste instantie niet benadrukt te worden. Het één en ander vormt naar verwachting geen belemmering voor de aansluiting tussen onderwijs en het leerlingdenken omdat leerlingen wel weten dat het bijvoorbeeld bij elektrische apparaten om elektrische energie gaat. Kort gezegd hebben we twee eisen gesteld. Onderwijsbeelden moeten

1. begrijpelijk zijn vanuit de conceptualisatie die leerlingen in het betreffende ontwikkelingsstadium gebruiken, en
2. natuurkundig acceptabel zijn.

4.2.3 de relatie begripsopbouw-begripsontwikkeling

Met de begripsopbouw in het gereviseerde lesmateriaal willen we bewerkstelligen dat leerlingen *stappen in de begripsontwikkeling* maken van een 'lagere' naar een 'hogere' conceptualisatie. We gaan er vanuit dat een leerling pas een aanleiding vindt om een begripsstap te zetten als hij een *begripsprobleem* (zie §3.1) ervaart dat hij wil oplossen. Hij kan zich van een begripsprobleem bewust worden als hij merkt dat het onderwijs (of een medeleerling) begrippen gebruikt die hij niet kent of begrijpt, en zich afvraagt wat ermee bedoeld wordt. Gebruik makend van eerder verworven kennis en van termen uit het onderwijs kan hij proberen het begrip te (re)construeren en in een gesprek met de leraar of met medeleerlingen 'uitproberen' of dat gelukt is.

In het lesmateriaal is een aantal opgaven en experimenten opgenomen die bedoeld zijn om bepaalde begripsproblemen bij de leerlingen te laten ontstaan en elementen te leveren om ze op te lossen. We zullen ze *gewenste begripsproblemen* noemen. In de hierna volgende bespreking van de onderwijsbeelden zullen we aangeven welke de 'gewenste begripsproblemen' bij de verschillende onderwijsbeelden zijn.

Ons onderzoek richt zich op de relatie tussen de begripsopbouw in het lesmateriaal en de begripsontwikkeling bij leerlingen. Dat komt tot uiting in de volgende hypothese die we zullen verifiëren in het tweede ronde protocolonderzoek, dat we in hoofdstuk 5 beschrijven. De twee deelhypothesen luiden (zie ook Van der Valk & Lijnse, 1988):

Hypothese 1

1a Tijdens het onderwijs aan de hand van de gereviseerde thema/blok-combinatie zullen zich in hoofdzaak 'gewenste begripsproblemen' bij leerlingen voordoen.

1b Deze 'gewenste begripsproblemen' zullen in de loop van het onderwijs opgelost worden.

4.3 De constructie van onderwijsbeelden

In deze paragraaf beschrijven we de onderwijsbeelden die in het gereviseerde lesmateriaal, het thema 'Energievoorziening' en het blok 'Arbeid en Energie', gebruikt worden, de situaties waarop ze betrekking hebben en de overwegingen die een rol gespeeld hebben bij de constructie ervan.

4.3.1 veronderstellingen over het aanvankelijke energiebegrip van leerlingen

We zijn ervan uitgegaan dat leerlingen, bij aanvang van het onderwijs aan de hand van het gereviseerde lesmateriaal, de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets' kunnen gebruiken in de context 'gebruik van brandstoffen voor ruimteverwarming en voor koken' en 'elektrische apparaten in en om het huis'. We veronderstellen dat de leerlingen bekend zijn met de formules voor elektrische energie en vermogen en met de eenheden joule, kWh en watt. Ze kunnen deze begrippen naar verwachting toepassen in 'verbruiksituaties' (zoals opwarmen, elektrische apparaten laten werken) en 'opweksituaties' (zoals fietsdynamo, waterkrachtcentrale). Dit beginniveau stemt overeen met wat de leerlingen van het onderbouwthema 'Energie Thuis' (PLON

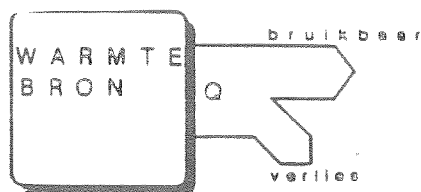
1981) geleerd zouden moeten hebben. Tenslotte veronderstellen we dat het begrip 'arbeid' bekend is uit de mechanicalessen in 4VWO (bijvoorbeeld uit het thema 'Verkeer', PLON 1983). Van de vakaspecten wordt alleen 'energieoverdracht' bekend verondersteld.

onderwijsbeeld 1: 'energie van een bepaalde soort gaat van bron naar ontvanger'

Met onderwijsbeeld 1 streven we naar de vorming van (tenminste) de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets' in zijn eenvoudigste vorm: energie gaat van de bron waar die ontstaat naar de plaats, waar die verbruikt wordt. Die conceptualisatie heeft het kenmerk dat energie iets is dat je meteen moet gebruiken als het beschikbaar is gekomen. Daarom beperken we ons in dit onderwijsbeeld tot 'overdrachte-nergiesoorten': elektr(odynam)ische energie, warmte, arbeid en stralingsenergie (eigenlijk: procesgrootheden). Daarmee kan dit onderwijsbeeld fysisch (min of meer) correct gebruikt worden.

Onderwijsbeeld 1 heeft betrekking op situaties in en om het huis waarin sprake is van een 'bron' (batterij, brandende brandstof, afkoelend water in de centrale verwarming) die een energiesoort levert aan een voorwerp of apparaat. In het voorwerp of apparaat wordt de energiesoort 'verbruikt' bij het uitvoeren van een taak. Onderweg van bron naar ontvanger kan een deel van de energiesoort op de verkeerde plek terecht komen en daardoor 'verloren' gaan voor de betreffende taakuitvoering.

In onderwijsbeeld 1 wordt niet alleen de voorstelling van energie als een 'bruikbaar iets', maar ook het kwantitatieve karakter van energie benadrukt. Dat komt onder meer tot uiting in het gebruik van formules om energiehoeveelheden uit te rekenen en in 'energiestroomdiagrammen' waarmee de grootte van de 'energiestroom' naar verschillende plaatsen aangegeven wordt. Figuur 4-1 is een voorbeeld van zo'n diagram uit het thema 'Energievoorziening'.



Figuur 4-1: Bruikbare en onbruikbare energiestroom bij een warmtebron (figuur 2.10 in het thema 'Energievoorziening').

We hebben aangenomen dat de leerlingen die de conceptualisatie 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten' gebruiken, voor het begripsprobleem komen te staan of warmte (een vorm van) energie is en hoe ze energie kunnen aanwijzen

als een 'iets' dat van de bron naar de ontvanger gaat (vergelijk het probleem van Anja in protocol E2-4). Dit 'gewenste' begripsprobleem kan bijvoorbeeld ontstaan bij de opdracht te omschrijven wat met de 'stookwaarde' van een brandstof bedoeld wordt.

In het eerste ronde protocolonderzoek hebben we leerlingen gevonden die de warmte die wordt afgegeven als een voorwerp afkoelt, niet als een 'bruikbaar iets' en dus niet als (een) energie(soort) zien. Voor deze leerlingen stellen we de situatie aan de orde dat warmte aan een kamer 'geleverd' wordt door het afkoelend water van de centrale verwarming. Zij zullen naar verwachting voor het begripsprobleem komen te staan wat de relatie is tussen het afkoelen en het afstaan van 'bruikbare' warmte/energie.

In dit stadium van de begripsopbouw proberen we begripsproblemen te vermijden die met energiebehoud te maken hebben. Een leerling die vindt dat er warmte/energie 'verbruikt wordt' als een voorwerp in temperatuur stijgt, hoeft hier nog geen begripsprobleem te ondervinden. Het lesmateriaal heeft het dan ook niet over 'de thermische (of inwendige) energie' van warm water, maar alleen over warmte die het water 'in gaat' of 'uit komt'. Leerlingen zouden daaruit de conclusie kunnen trekken dat er 'warmte' in het water zit. Wat het onderwijs betreft willen we een dergelijke formulering vermijden omdat daarin zowel warmte en thermische energie als warmte en temperatuur door elkaar lopen.

4.3.2 op weg naar 'energie als een behouden en bruikbaar iets'

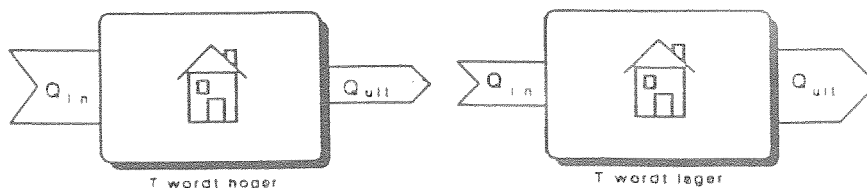
In het thema gebruiken we, voortbouwend op onderwijsbeeld 1, drie onderwijsbeelden om de 'nieuwe' conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' en de vakaspecten 'energiebehoud', 'energieomzetting' en 'degradatie' op te bouwen. Anders dan in het oorspronkelijke thema introduceren we de vakaspecten 'energieomzetting' en energiebehoud' niet tegelijkertijd, maar achtereenvolgens (in onderwijsbeeld 2 en 3). Bovendien beperken we de behandeling van deze vakaspecten in onderwijsbeeld 2 en 3 tot praktijksituaties waarin de aandacht gericht is op 'overdrachtenergiesoorten'. Pas in onderwijsbeeld 4 generaliseren we deze aspecten tot allerlei 'taaksituaties' uit het contextgebied van het thema. Dan ontstaat de noodzaak om over 'opslag-energiesoorten' te gaan praten omdat in onderwijsbeeld 4 verondersteld wordt dat energie in taaksituaties *altijd* behouden is. Door deze aanpak hopen we te voorkomen dat leerlingen 'opslagenergiesoorten' (uitsluitend) betekenis geven als de energie die 'nodig is' bij een bepaald proces, een begripsprobleem dat we in het eerste ronde onderzoek bij veel leerlingen zijn tegengekomen.

onderwijsbeeld 2: 'weglekken van energie'

In de eerste ronde vonden we blokkerende begripsproblemen over 'omzetten' bij sommige leerlingen die de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets' gebruikten (zie §3.5.2). In 'opweksituaties' konden zij geen 'toegevoerde' energie aanwijzen, in 'verbruiksituaties' geen energieproductie. Om het idee te ontwikkelen dat 'verbruik' en 'productie' van energiesoorten altijd samen gaan stellen we in de begripsopbouw (onderwijsbeeld 2) situaties aan de orde waarin voorwerpen/apparaten op

een (naar verwachting) herkenbare manier tegelijk 'ontvanger' en 'bron' van een energiesoort zijn. Tevens willen ermee een eerste aanzet geven tot de ontwikkeling van het aspect 'energiebehoud'.

Onderwijsbeeld 2 heeft in eerste instantie betrekking op situaties waarin warmte toegevoerd wordt voor verwarmingsdoeleinden. In die situaties wordt in de praktijk ook altijd warmte aan de omgeving afgegeven en is dus sprake van een ontvanger die tegelijkertijd (ongewenst) een bron van (minder bruikbare) warmte is (vakaspect 'degradatie'). We vonden (zie protocol E3-2) dat leerlingen denken dat er meer warmte nodig is om een ruimte 'op temperatuur te houden' dan er naar de omgeving 'weglekt'. In onderwijsbeeld 1 hebben de leerlingen 'warmte afgeven' reeds met 'afkoelen' in verband moeten brengen, zij het in de situatie dat het afgeven van warmte 'gewenst' is. Nu moeten ze warmte afgeven ook betrekken op situaties waarin dat 'ongewenst' is en optreedt alsof er van een 'warmtelek' sprake is. Onderwijsbeeld 2 biedt voor die situaties de voorstelling van warmtetoever en warmteafgifte (zie figuur 4-2).



Figuur 4-2: 'Warmtestroomdiagrammen' voor opwarmen en afkoelen (thema 'Energievoorziening' figuur 2.11).

Aan de hand van dit 'warmtestroomdiagram' wordt de volgende redenering gegeven. Voor 'opwarmen' is een 'netto' warmtetoever nodig. Als er een 'netto warmteafgifte' is, treedt er een temperatuurdaling op. In deze redenering is de relatie tussen warmte en temperatuur in de vorm van $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ essentieel¹⁾. Dan is er geen netto warmtetoever of -afgifte als de temperatuur constant blijft. Deze laatste regel geeft een eerste aanzet tot het aspect 'energiebehoud'.

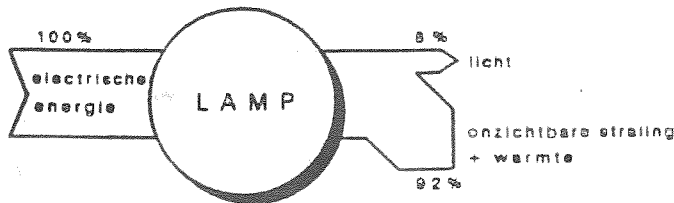
Er zullen naar verwachting leerlingen zijn die denken dat er aan een ruimte die op temperatuur gehouden wordt, meer warmte wordt toegevoerd dan er aan de omgeving wordt afgegeven. Bij deze leerlingen willen we het 'gewenste begripsprobleem' oproepen: 'koelt een warm voorwerp dan niet af als er geen (netto) warmte-/energie-toevoer is?' Dit begripsprobleem kan opgeroepen worden bijvoorbeeld door

1. In deze formule is Q de toe- of afgevoerde warmte, c de soortelijke warmte, m de massa en ΔT de temperatuurverandering van de betreffende stof.

de opdracht te geven uit te leggen dat er geen warmte/energie nodig is om een perfect geïsoleerd voorwerp op een hoge temperatuur te houden. Naar analogie met 'op temperatuur houden' kan onderwijsbeeld 2 ook betrokken worden op 'op snelheid houden' van een voertuig en het 'verlicht houden' van een ruimte.

onderwijsbeeld 3: 'apparaten als energieomzeters'

Aan de hand van onderwijsbeeld 3 introduceren we het vakaspect 'energieomzetting' en gebruiken we de vakaspecten 'energiebehoud' en 'degradatie' in nieuwe praktijkcontexten. Dit onderwijsbeeld biedt voor apparaten die warmte, licht, elektrische energie of arbeid leveren de voorstelling dat er energie van een bepaalde soort wordt toegevoerd en energie van andere soorten wordt afgevoerd (zie figuur 4-3). Daarbij worden geen apparaten beschouwd die van toestand (bijvoorbeeld van temperatuur) veranderen tijdens hun werking (behalve bij het op gang komen). Er kan dus slechts sprake zijn van de omzetting van de overdrachtenergiesoorten (elektrische energie, warmte, arbeid en stralingsenergie) in elkaar.



Figuur 4-3: Een gloeilamp als energieomzetter (thema 'Energievoorziening' figuur 3-4)

In onderwijsbeeld 3 wordt het aspect 'energieomzetting' opgebouwd als het verdwijnen/verbruikt worden van een energiesoort en het gelijktijdig ontstaan/opgewekt worden van andere energiesoorten²⁾, waarbij de hoeveelheid energie constant blijft (uitbreiding van het aspect 'energiebehoud'). Het degradatie-aspect komt naar voren in het verschijnsel dat er meestal ook een niet-gewenste energiesoort (warmte) ontstaat.

Het is de bedoeling dat leerlingen die een intuïtief onderscheid maken tussen 'opweksituaties' en 'verbruiksituaties' bij dit onderwijsbeeld voor het 'gewenste begripsprobleem' komen te staan: 'is het mogelijk dat er tegelijk energie verbruikt en opgewekt wordt?' Bij leerlingen die het 'warm worden/blijven' van een apparaat niet beschouwen als het afgeven van de energiesoort 'warmte' of zelfs als 'energieverlies' willen we aanleiding geven tot het begripsprobleem: 'kun je de afgegeven warmte dan weer gebruiken?'

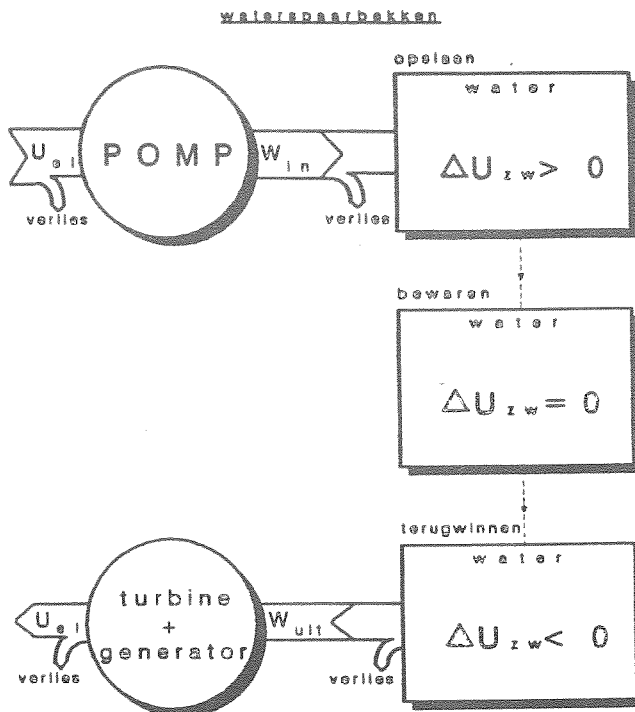
Het is de bedoeling dat onderwijsbeeld 3, met name de gedachte dat een apparaat

2. De mogelijkheid om energieomzettingen op te vatten als een gelijktijdig 'verdwijnen' en 'ontstaan' van energiesoorten, analoog met stofomzettingen als het verdwijnen en ontstaan van stoffen, ontleen we aan Buck (1984).

tegelijk 'verbruiker' en 'bron' van energie kan zijn en de regel dat een voorwerp van constante temperatuur evenveel warmte afgeeft als het opneemt uit onderwijsbeeld 2, aan de oplossing van deze begripsproblemen bijdragen.

onderwijsbeeld 4: 'energieopslag'

Onderwijsbeeld 4 heeft betrekking op situaties waarin sprake is van het 'opslaan' van energie om deze op een ander tijdstip 'terug te winnen' (energieopslag-systemen). Omdat de bij het opslaan toegevoerde energiesoort verdwijnt/verbruikt wordt en bij het terugwinnen een energiesoort ontstaat, terwijl er bovendien energie in 'opgeslagen' toestand aanwezig is, is het nodig om nieuwe energiesoorten te introduceren: 'opslagenergiesoorten' als bewegingsenergie, zwaarte-energie, thermische energie en chemische energie. Deze verschillen van aard van de eerder behandelde energiesoorten omdat ze (als soort) niet overgedragen kunnen worden. Onderwijsbeeld 4 geeft de voorstelling dat zo'n energiesoort als een 'iets' in het opslagsysteem aanwezig kan zijn, in water op een hoogte, in een vliegwiël, in een brandstof of in een heet voorwerp, bijvoorbeeld zoals in figuur 4-4.



Figuur 4-4: Stroomdiagram van energieopslag in een waterspaarbekken (thema 'Energievoorziening', figuur 5-6)

Met dit onderwijsbeeld wordt de opbouw van de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' voltooid. We hebben in het eerste ronde protocolonderzoek gevonden dat veel leerlingen 'opslag-energiesoorten' betekenis geven vanuit het denkbeeld dat energie 'verbruikt' wordt of wordt 'opgewekt'. Bijvoorbeeld 'bewegingsenergie is de energie die nodig is om te blijven bewegen' (zie protocol A-3) en 'zwaarte-energie is de energie die water krijgt als het valt' (zie §3.6.4 en protocol A-4). Voor deze leerlingen willen we aanleiding geven tot gewenste begripsproblemen als: is er dan ook energie als er niets gebeurt (als het voorwerp niet valt)?, en: kun je bewegingsenergie dan opslaan, die gebruik je toch?

Dit soort begripsproblemen kan naar verwachting worden opgelost via de redenering "je stopt er energie (elektrische energie, arbeid of warmte) in, later haal je er energie uit, in de tussentijd moet er dus energie inzitten" die we in de eerste ronde bij een aantal leerlingen zagen functioneren (zie bijvoorbeeld protocol E1-1).

4.3.3 op weg naar 'energie als behouden entiteit'

Als de begripsopbouw in het thema gelukt is, is het onderscheid dat leerlingen intuïtief maken tussen 'energiebronnen', 'energieverbruikers' en 'gewone dingen' ondergraven. Elk apparaat is dan immers een verbruik- en opwekapparaat, elk 'gewoon ding' kan door temperatuurverandering, hoogteverandering en dergelijke tot een 'energiebron' gemaakt worden. Dan kan die indeling geheel overboord gezet worden, waarmee het karakter van energie als 'werkingsvoorwaarde' ook verlaten wordt.

In het gereviseerde blok 'Arbeid en Energie' wordt de conceptualisatie 'energie als een behouden entiteit' opgebouwd door de aandacht geheel te richten op het vakaspect 'energiebehoud'. 'Werkingsvoorwaarde' (bruikbaarheid) wordt niet meer als eigenschap van energie gebruikt. Eerst worden eenvoudige situaties aan de orde gesteld die nauwelijks verbindingen met praktijksituaties hebben, daarna neemt de fysische complexiteit toe. Er moet bijvoorbeeld meer dan één energiesoort aan een voorwerp worden toegekend. Tenslotte worden situaties behandeld die complex zijn vanwege verbindingen met de praktijk: leerlingen moeten afzien van niet-natuurkundige 'denkbeelden', van energie als 'werkingsvoorwaarde'.

onderwijsbeeld 5: 'energievergelijking'

De situaties waarop onderwijsbeeld 5 betrekking heeft zijn niet beperkt tot een bepaald contextgebied, maar hangen alleen vanuit het vak met elkaar samen: zij kunnen natuurkundig op dezelfde wijze beschreven worden.

Onderwijsbeeld 5 geeft geen voorstellingen in de vorm van een 'energiestroomdiagram', zoals de andere onderwijsbeelden. Er wordt alleen een formulematige voorstelling gebruikt: de energievergelijking van een voorwerp of systeem. De energievergelijking zegt dat de verandering van de in een voorwerp of 'systeem' aanwezige hoeveelheid energie gelijk is aan de (netto) toe- of afgevoerde hoeveelheid. De toestand van een systeem kan zich met resp. zonder verandering van hoeveelheid energie wijzigen door toe- of afvoer van energie en door 'inwendige' energieomzettingen.

Bij leerlingen die energie als 'werkingsvoorwaarde' zien (wat in situaties waarin van beweging sprake is, aanleiding geeft tot een verwarring tussen kracht en energie), willen we aanleiding geven tot 'gewenste' begripsproblemen zoals: wat is precies het verschil tussen (bijvoorbeeld de zwaarte-)kracht en (zwaarte-)energie, tussen warmte en thermische energie, tussen arbeid en kinetische energie?

Onderwijsbeeld 5 is hetzelfde als in het oorspronkelijke blok werd gebruikt. We verwachten niettemin dat dit nu veel beter zal functioneren omdat de verschillende zaken (het onderscheid tussen 'opslag'- en 'overdrachtenergiesoorten', de 'opslag' van energie in een voorwerp) nu in het thema veel beter zijn voorbereid. Bovendien passen we het onderwijsbeeld niet meteen op zeer complexe situaties toe, zoals in het oorspronkelijke blok het geval was, maar hebben we een opbouw in de complexiteit van de situaties aangebracht.

4.4 Het gereviseerde lesmateriaal

In deze paragraaf bespreken we de globale opzet van het gereviseerde thema en blok en gaan we in op de uitwerking van de onderwijsbeelden.

4.4.1 globale opzet van het thema 'Energievoorziening'

Het doel van het thema is te bereiken dat leerlingen energie als een 'behouden en bruikbaar iets' kunnen gebruiken in situaties uit het contextgebied 'persoonlijk en maatschappelijk energiegebruik'. Deze doelstelling is iets beperkter dan die van het oorspronkelijke thema: het onderwerp 'de Eerste Hoofdwet van de Warmteleer' wordt nu in het gereviseerde blok behandeld.

Het thema kent een 'Oriëntatie', een 'Basisdeel' en een 'Afronding'. Elk hoofdstuk (zie bijlage 3 voor de inhoudsopgave) begint met een korte inleiding die uitmondt in enkele richtvragen. Elke paragraaf bestaat uit een deel met teksten en illustraties waarin leerstof aangeboden wordt en een deel met opgaven of opdrachten voor experimenten. Elk hoofdstuk van het Basisdeel eindigt met een paragraaf 'samenvatting en eindopgaven'. De 'eindopgaven' zijn wat complexer dan de andere opgaven van het hoofdstuk omdat elementen uit verschillende paragrafen in een opgave samenkomen.

De *Oriëntatie* (hoofdstuk EV1³) van het thema) schetst 'het energieprobleem', introduceert de themavraag en biedt een aantal activiteiten die de leerlingen laten kennis maken met het contextgebied. Daarnaast is er een activiteit bedoeld om leerlingen hun aanvankelijke energiebegrip naar voren te laten brengen. Het is de bedoeling dat de leraren zo rekening kunnen houden met de aanvankelijke energiebegrippen van de leerlingen.

In het *Basisdeel* (de hoofdstukken EV2 t/m EV6) wordt het energiebegrip opge-

3. Met EV gevolgd door een cijfer geven we het nummer aan dat een hoofdstuk of paragraaf in het thema 'Energievoorziening' heeft.

bouwd aan de hand van de vier onderwijsbeelden van het thema. Daarbij komen de volgende onderwerpen aan de orde:

- * het meten en berekenen van het energieverbruik thuis;
- * voorzieningen om het energieverbruik te verkleinen bij verwarmen, auto rijden en verlichten;
- * de beperktheid van het rendement van apparaten;
- * een betrouwbare, zuinige en schone elektriciteitsvoorziening;
- * energieopslag in en om het huis en bij de elektriciteitsopwekking;
- * de mogelijkheid van hergebruik van 'afval-energie'.

In de *Afronding* (hoofdstuk EVT) wordt de themavraag beantwoord. Ook moeten de leerlingen terugkijken op hun aanvankelijk energiebegrip en nagaan in hoeverre dat veranderd is.

4.4.2 uitwerking van onderwijsbeeld 1

Onderwijsbeeld 1 ('energie van een bepaalde soort gaat van bron naar ontvanger') wordt in de eerste paragraaf van het Basisdeel ('Energiegebruik in een huishouden') uitgewerkt. Het wordt eerst kwantitatief toegepast in de context van elektrische apparaten. Vervolgens worden brandende brandstoffen als warmtebronnen behandeld, waarbij het begrip 'stookwaarde' geïntroduceerd wordt. Dat is bedoeld om leerlingen te leren onderscheid te maken tussen brandstoffen als energiebron en warmte als een energiesoort die door de bron geleverd wordt. We gebruiken onderwijsbeeld 1 ook voor de introductie van soortelijke warmte aan de hand van afkoelend water in de radiator van een centrale verwarmingsinstallatie: het water in de radiator is de 'warmtebron' die door het afgeven van warmte in temperatuur daalt. Voor het water in de radiator wordt onderwijsbeeld 1 als volgt in het lesmateriaal aangeboden:

Warm water

Voor huisverwarming wordt meestal gebruik gemaakt van een gas-gestookte ketel per huis. Tegenwoordig wordt in steeds meer steden stadsverwarming toegepast. Hierbij wordt het warme koelwater van een elektriciteitscentrale gebruikt voor het verwarmen van huizen. Door goed geïsoleerde buizen stroomt dat water van de centrale naar de huizen. In huis wordt via de radiatoren warmte uit het water aan de lucht afgegeven. Het afgekoelde water stroomt terug naar de centrale. De hoeveelheid warmte die in de radiatoren afgegeven is wordt gegeven door:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

afgegeven
warmte
(in J)

massa van
de
afgekoelde
stof
(in kg)

soortelijke warmte
specifieke waarde
afhankelijk
van de stof
(in J/kg K)

temperatuur-
daling
(in °C of K)

Binas tabel 10,11,12

Opgave EV2-4 ⁴⁾. *Verwarmen met stadsverwarming.*

Water van 80°C stroomt uit de stadsverwarmingsleiding de radiator van een huis binnen. Daar wordt warmte afgestaan voor verwarming. Het afgekoelde water (40°C) stroomt terug naar de centrale.

- Bereken hoeveel water nodig is voor het leveren van 1 MJ warmte.
- Bereken hoeveel water per seconde het huis in (en uit) stroomt als er 10 kW warmtevermogen in het huis wordt afgestaan.
(‘Energievoorziening’ blz.20)

Met opgave EV2-4 willen we de leerlingen herinneren aan de relatie tussen warmte en temperatuurverandering, die in de onderbouw waarschijnlijk hoofdzakelijk in het geval van ‘opwarmen’ is behandeld. Nu leren ze ook de formule $Q = c.m.\Delta T$ te gebruiken⁵⁾. Die is waarschijnlijk nieuw voor hen. We willen onder andere met deze opgave aanleiding geven tot het ‘gewenste begripsprobleem’ hoe iets dat afkoelt ‘bruikbare’ warmte kan leveren.

4.4.3 uitwerking van onderwijsbeeld 2

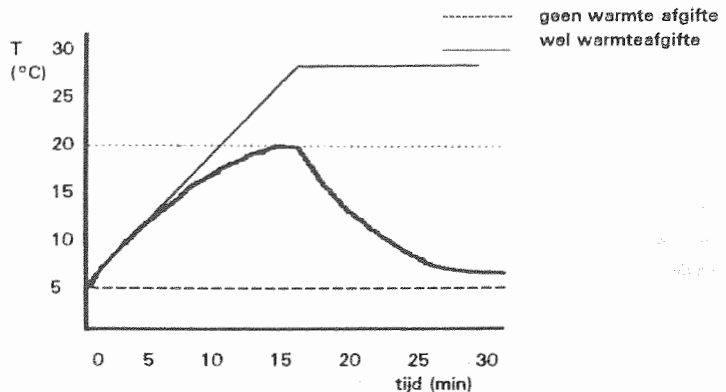
In de context van huisverwarming wordt van onderwijsbeeld 1, dat betrokken is op de centrale verwarming als warmtebron, overgestapt op onderwijsbeeld 2 (‘wegleken van energie’) dat betrekking heeft op de woonruimte als ontvanger van warmte. Een nieuw element is dat er warmte ‘weglekt’ naar de omgeving zodat niet alleen de warmtetoevoer, maar ook de warmteafgifte beschouwd moet worden. Omdat ‘verwarmen’ voor leerlingen zowel ‘op temperatuur houden’ als ‘de temperatuur verhogen’ kan betekenen, maken we nadrukkelijk onderscheid tussen ‘opwarmen’ en ‘op temperatuur houden’. Het volgende stukje illustreert hoe in het lesmateriaal de stap wordt gezet naar de regel dat de warmtetoevoer bij ‘op temperatuur houden’ even groot is als de warmteafgifte aan de omgeving:

Op temperatuur houden

Om voor een huis het temperatuurverschil met de omgeving in stand te houden, moet de warmtetoevoer steeds gelijk zijn aan de warmteafgifte. In elke seconde komt er evenveel warmte in huis als er uit gaat: $Q_{in} = Q_{uit}$. In een stroomdiagram betekent dit dat het vermogen ($P_{Q,in}$), dat er aan warmte inkomt even groot is als het vermogen ($P_{Q,uit}$) dat er aan warmte uitgaat: $P_{Q,in} = P_{Q,uit}$.

Deze tekst wordt ondersteunt door ‘warmtestroomdiagrammen’ zoals figuur 4-2 (afgebeeld op blz.100), waarin de toe- en afvoer van warmte in beeld gebracht wordt. Onder andere aan de hand van de volgende opgave willen we het ‘gewenste begripsprobleem’ van onderwijsbeeld 2 laten ontstaan.

-
- Deze code betekent: opgave 4 uit hoofdstuk 2 van het thema ‘Energievoorziening’ (EV).
 - Achteraf gezien zijn de getallen onhandig gekozen: zowel de temperatuur als het temperatuurverschil zijn 40°C.



Figuur 4-5: Opwarmen bij constante warmtetoevoer en afkoelen zonder warmtetoevoer (thema 'Energievoorziening' figuur 2.12).

Opgave EV2-7. *Opwarmen van een huis.*

In fig.2.12 is o.a. het temperatuursverloop geschetst als aan een huis een constant vermogen wordt toegevoerd. Neem aan dat er geen warmteafgifte is aan de omgeving.

- Leg uit waarom de temperatuur in huis dan rechtevenredig met de tijd toeneemt. Na verloop van tijd wordt de warmtetoevoer gestopt.

- Leg uit waarom de temperatuur constant blijft.

In fig.2.12 is ook het temperatuurverloop geschetst voor een huis waaraan een constant vermogen wordt toegevoerd, terwijl wel sprake is van warmteafgifte.

- Leg uit waarom de temperatuur steeds minder toeneemt tijdens het opwarmen. ('Energievoorziening' blz.27)

Verondersteld wordt dat de leerlingen de relatie tussen warmtetoevoer en temperatuurstijging kwalitatief kennen. Het is de bedoeling dat zij die relatie ook op een kwantitatieve manier leren gebruiken door bij onderdeel a. van opgave EV2-7 de formule $Q = c.m.\Delta T$ in te vullen. Het 'gewenste begripsprobleem' dat er toch eigenlijk warmte 'verbruikt' moet worden om iets op temperatuur te houden, verwachten we bij onderdeel b., waar de leerlingen juist moeten aangeven dat er géén warmte nodig is als er geen warmteafgifte is.

Daarna komt de context 'bewegen en stroomlijnen' aan de orde, waarin het 'op snelheid houden' van een auto naar analogie met het 'op temperatuur houden' van een huis wordt beschouwd. De arbeid die een rijdende auto van de motor 'geleverd' krijgt, 'lekt' (als warmte) weg' naar de omgeving door de lucht- en rolweerstand. Daarom moet de 'netto' arbeid beschouwd worden. Is die groter dan nul, dan neemt de snelheid toe, is die kleiner dan nul, dan neemt de snelheid af. Is die gelijk aan nul, dan is de snelheid constant.

In §EV2.4 ('Verlichten, reflecteren en absorberen') wordt onderwijsbeeld 2 op het verlichten van een ruimte toegepast (afvoer door absorptie en transmissie door ra-

men). Met deze toepassing van onderwijsbeeld 2 willen we ook benadrukken dat licht een energiesoort is, iets dat sommige leerlingen in de eerste ronde nog niet leken te weten.

4.4.4 uitwerking van onderwijsbeeld 3

Onderwijsbeeld 3 ('apparaten als energieomzetters') wordt geïntroduceerd door apparaten als de boormachine en de gloeilamp te beschrijven als 'verbruikers' van de toegevoerde energiesoort en 'producenten' van de gewenste energiesoort. Met behulp van het aspect 'energiebehoud' kan nog een andere geproduceerde, maar niet gewenste, energiesoort aangewezen worden ('verlies'). Daarbij wordt de formule voor rendement geïntroduceerd.

$$\eta = \frac{U_{\text{uit, bruikbaar}}}{U_{\text{in}}} \cdot 100\%$$

rendement van het apparaat (in %)
inkomende energiesoort
bruikbare deel van de uitgaande energiesoorten

Om de 'gewenste begripsproblemen' van onderwijsbeeld 3 bij leerlingen te laten ontstaan is onder andere de volgende opgave opgenomen.

Opgave EV3-3. *Boormachine.*

Op de doos van een boormachine van het merk HAME, staat: opgenomen vermogen 500W; afgegeven vermogen 255W.

- Van welk soort zal het opgenomen vermogen zijn?
 - Van welk soort zal het (nuttig) afgegeven vermogen zijn?
- Behalve het gewenste afgegeven vermogen is er nog een ander uitgaand vermogen.
- Hoe groot en van welke soort is deze?
 - Welke regel gebruik je daarbij?
- Een boormachine moet gekoeld worden.
- Leg uit waarom.
 - Hoeveel vermogen moet via koeling afgevoerd worden?
 - Teken het stroomdiagram van deze boormachine.
- ('Energievoorziening' blz.41/42)

De leerlingen weten wel dat een boormachine elektrische energie verbruikt (onderdeel a.). Het 'gewenste begripsprobleem', dat een boormachine energie verbruikt en opwekt, kan ontstaan als leerlingen moeten aangeven dat er ook energiesoorten ontstaan (onderdeel b. en c.). Onderdeel e. is bedoeld om het andere 'gewenste begripsprobleem' te laten ontstaan: kun je 'het warm worden' van de boormachine zien als

productie van warmte/energie?⁶⁾ De onderdelen d. t/m f. zijn bedoeld om de situatie van de kwantitatieve kant te bekijken, waarbij 'energiebehoud' gebruikt moet worden.

Bij onderwijsbeeld 3 hebben we een aantal 'experimenten' uit het oorspronkelijke thema 'Energie' (zie §2.6) weer opgenomen. Maar alleen die waarin de ene overdracht-energiesoort in de andere wordt omgezet (zoals in een zonnecel).

Elk experiment bevat naast een instructie en opdrachten die gericht zijn op het bepalen van het rendement van het apparaat, ook een inleiding en enkele oriënterende opdrachten:

Experiment 3.3: *zonnecel*

In een zonnecel wordt de stralingsenergie van de zon gedeeltelijk omgezet in elektrische energie. In Nederland worden de cellen nog niet zo heel erg veel gebruikt, maar de toepassingen nemen wel toe, onder andere voor de draadpalen langs de snelwegen en de lichtboeien op de vaarweg.

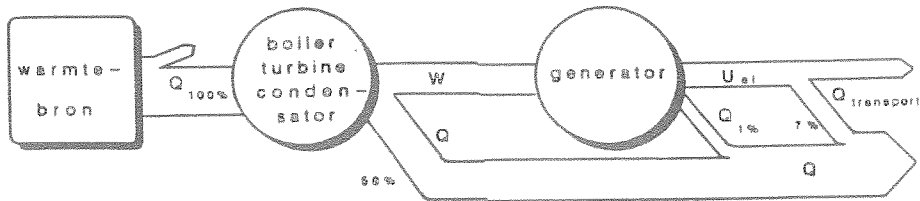
- a. Op welke plaatsen in de zonnecel worden energiesoorten afgevoerd, die tot het verlies gerekend moeten worden? Teken het energiestroomdiagram voor de zonnecel en zet daarin de energiesoorten die bij de omzetting betrokken zijn.
- b. Hoe hoog is, naar jouw schatting, het rendement van een zonnecel: 0,1%, 1%, 10%, 50% of 90%? Motiveer je schatting.
(‘Energievoorziening’, blz.45)

Deze zijn opgenomen om de leerlingen te stimuleren de begrippen rendement, 'verlies' en het energiestroomdiagram in de context van het experiment te gebruiken en zo de opstelling vanuit energie-oogpunt te beschouwen. Daaraan ontbrak het bij het uitvoeren van de experimenten in het oorspronkelijke thema (zie §3.5).

Na de experimenten wordt aandacht besteed aan mogelijkheden om rendementen te verbeteren. In dat verband komt de warmtemachine ter sprake als een 'omzetter' die een deel van de toegevoerde warmte in arbeid omzet, waarbij de rest van de warmte bij een kleiner temperatuurverschil naar de omgeving wordt afgevoerd. Daarbij introduceren we de formule voor 'maximaal theoretisch rendement'⁷⁾, waarmee we het probleem dat we in §2.6 gesignaleerd hebben, hoe 'de kwaliteit van een energiesoort' scherp omschreven kan worden, hebben proberen op te lossen: het maximale 'arbeidsrendement' dat bij gebruik van een energiesoort bereikt kan worden, als maat voor de 'kwaliteit' van de energiesoort.

In het energiestroomdiagram van de warmtecentrale worden onderwijsbeeld 1 en 3 aan elkaar geknoopt. Zie figuur 4-6.

-
6. Achteraf gezien is dit niet zo'n gelukkige situatie om dit begripsprobleem op te lossen: het is moeilijk in te zien dat de warmte nuttig gebruikt kan worden, bijvoorbeeld voor huisverwarming.
 7. Achteraf gezien is het veel te vroeg om dit begrip hier te introduceren, vanwege het feit dat het vanuit de conceptualisatie 'energie als een behouden bruikbaar iets' voor leerlingen vanzelfsprekend is dat een ideale warmtemachine een rendement van 100% heeft (zie §3.6.1), een punt dat voor ons nog niet helder was ten tijde van de revisie van het lesmateriaal.



Figuur 4-6: Energieomzettingen in een warmtecentrale (thema 'Energievoorziening', figuur 4.8)

4.4.5 uitwerking van onderwijsbeeld 4

Onderwijsbeeld 4 ('energieopslag') wordt eerst uitgewerkt in de situatie van 'energieopslag' in een waterspaarbekken ten behoeve van de elektriciteitsproductie. Geredeneerd wordt dat toepassing van het aspect 'energiebehoud' op het omhoog pompen en omlaag laten stromen het noodzakelijk maakt te zeggen dat er in het water energie (van een bepaalde soort: 'zwaarte-energie') ligt opgeslagen. Als toelichting bij deze redenering is het energiestroomdiagram van figuur 4-4 (zie blz.102) getekend.

Over energieopslagsystemen voor een auto (rotatie-energie in een vliegwiel, elektrochemische energie in een accu) en voor 'zonne-energie-systemen' (opslag van thermische energie in water of in een 'zonnemuur') worden gelijksoortige energiestroomdiagrammen gegeven. Een voorbeeld van een opgave die naar verwachting aanleiding geeft tot de 'gewenste begripsproblemen' van onderwijsbeeld 4 is opgave EV5-4.

Opgave EV5-4. *Toename van bewegingsenergie bij optrekken.*

Bij een autotest werd er gemeten hoe snel een auto optrekt. De massa van auto en bestuurder is 900 kg. Een gedeelte van de arbeid die de motor levert is nodig voor arbeid ten gevolge van de achterwaartse krachten. Het andere deel wordt gebruikt voor vergroten van de bewegingsenergie.

- Bepaal de toename van de bewegingsenergie bij optrekken van 0 km/h tot 60 km/h, van 60 km/h tot 80 km/h, van 80 km/h tot 100 km/h.
- Waarom verschilt de toename van de bewegingsenergie voor de snelheidstoename van 60 km/h tot 80 km/h van die van 80 km/h tot 100 km/h?

Als leerlingen bewegingsenergie betekenis geven als de energie die nodig is om te bewegen, zullen ze, net als we in het eerste ronde onderzoek zagen, één snelheid (bijvoorbeeld de gemiddelde snelheid, 70 km/h) in de formule $\frac{1}{2}m \cdot v^2$ invullen, in plaats van respectievelijk 80 km/h en 60 km/h (omgerekend naar m/s) en de uitkomsten van elkaar aftrekken.

In het kader van onderwijsbeeld 4 zijn een zevental 'experimenten met energie-soorten' opgenomen: omzettingen van een overdracht-energiesoort in een opslag-energiesoort (bijvoorbeeld bij het elektrisch verwarmen van water) of omgekeerd

(omzetting van bewegingsenergie van water in elektrische energie). Ze zijn onder andere bedoeld om leerlingen in concrete situaties de 'opgeslagen energie' aan te laten wijzen.

4.4.6 globale opzet van het gereviseerde blok 'Arbeid en Energie'

Met het gereviseerde blok willen we, net als met het oorspronkelijke blok, bereiken dat de leerlingen de 'energievergelijking' wendbaar kunnen gebruiken. De opzet van het blok is bij de revisie ingrijpend gewijzigd. Anders dan in het oorspronkelijke blok worden eerst 'geïdealiseerde' situaties behandeld en vervolgens toepassingen in praktijksituaties aan de orde gesteld.

Elk hoofdstuk van het blok (zie bijlage 4 voor de inhoudsopgave) begint met een korte, oriënterende inleiding. Elke paragraaf bevat een tekst met leerstof, gevolgd door opgaven. De meeste opgaven betreffen het opstellen en gebruiken van de energievergelijking van een systeem. Daarnaast zijn er enkele 'discussie-opgaven' met een kwalitatieve probleemstelling opgenomen. Die zijn bedoeld om eventuele nog aanwezige niet-natuurkundige denkbeelden ter discussie te stellen. Een hoofdstuk wordt beëindigd met een samenvatting en enkele complexe 'eindopgaven'.

In de *Oriëntatie* op het blok wordt de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' toegepast in contexten die nog niet in het thema aan de orde zijn geweest, zoals die waarin van menselijke inspanning sprake is. Zo hebben we geprobeerd de overgang van thema naar blok geleidelijker te laten verlopen dan in de oorspronkelijke thema/blok-combinatie. In het *Basisdeel* wordt de energievergelijking van bewegende voorwerpen in allerlei soorten situaties en bijbehorende energieomzettingen uitgewerkt. In de *Afsluiting* komen complexe realistische situaties aan de orde.

4.4.7 uitwerking van onderwijsbeeld 5

Onderwijsbeeld 5 ('energievergelijking') wordt geleidelijk opgebouwd. In het hoofdstuk 'Arbeid en bewegingsenergie' wordt als eerste de energievergelijking in een zo eenvoudig mogelijke situatie opgesteld: die van een puntmassa die met een constante snelheid beweegt ($\Delta U_k = 0$). Als concreet voorbeeld wordt een slede op een luchtkussenbaan genoemd. Vervolgens komen situaties aan de orde waarvoor een arbeidsterm aan de energievergelijking moet worden toegevoegd met als eenvoudigste situatie de 'aangedreven' puntmassa. De aldus opgebouwde energievergelijking wordt daarna op allerlei 'realistische' situaties toegepast zoals in de volgende opgave.

Opgave AE2-9. *Uitrijden*

Een fietser (massa met fiets 85 kg) rijdt 25 km/h. Hij laat zijn fiets uitrijden tot stilstand.

- Stel de energievergelijking op voor de fietser met fiets tijdens het uitrijden.
- Waar is de uitgaande arbeid tijdens het uitrijden naar toe gegaan? In welke vorm kun je het daar terug vinden?
- Beredeneer hoe groot deze arbeid is.

Vanuit de praktijk is er voor leerlingen in deze situatie geen sprake van energie omdat de fietser niet meer trapt. Bij onderdeel a. kan dus het 'gewenste begripsprobleem' ontstaan of de bewegingsenergie/bewegingskracht geen 'voorwaartse kracht' (werkingsvoorwaarde) van het uitrijden is. Onderdeel b. is mede bedoeld om het denkbeeld dat 'de bewegingsenergie na het uitrijden verbruikt is' ter discussie te stellen voor het geval dat deze tijdens het thema nog niet is weggenomen.

In het hoofdstuk 'Arbeid en potentiële energie' komen situaties aan de orde waarin de energievergelijking ook een potentiële energie-term (zwaarte-energie, veerenergie) bevat. Onder andere aan de hand van een slinger komt de 'inwendige' energieomzetting van kinetische energie in zwaarte-energie aan de orde, waarbij (in het ideale geval) in de energievergelijking geen arbeidsterm voorkomt. Daarna komen ook min of meer realistische situaties aan de orde waarin een arbeidsterm optreedt vanwege wrijving of aandrijving (bijvoorbeeld de gewichten van een klok).

In het hoofdstuk 'Arbeid, warmte en moleculaire energie' wordt de energievergelijking opgesteld voor systemen waarvan de moleculaire energie (=kinetische en potentiële energie van de moleculen) verandert. Eerst wordt het adiabatische geval beschouwd, daarna komen ook situaties met warmtetoevoer en warmteafvoer aan de orde.

Tenslotte, in het hoofdstuk 'Interne arbeid en afzetkrachten', worden situaties behandeld waarin van een 'interne arbeidsbron' sprake is die echter niet in de energievergelijking optreedt omdat er sprake is van 'interne energieomzetting'. Bijvoorbeeld: in het geval van 'interne' arbeid door een hoogspringer is er een omzetting van chemische energie in kinetische energie en zwaarte-energie. Op deze wijze willen we het begripsprobleem oplossen, dat de hoogspringer zich inspant en dus arbeid verricht, terwijl er geen arbeidsterm in de energievergelijking optreedt. Er wordt ingegaan op het feit dat een mens, een auto en andere systemen met een 'inwendige arbeidsbron' slechts van snelheid kunnen veranderen of op snelheid kunnen blijven door 'zich af te zetten' tegen een ondergrond. Als het aangrijpingspunt van de 'afzetkracht' dan niet verplaatst wordt, wordt er geen 'uitwendige' arbeid verricht en is er dus ook geen sprake van energieoverdracht.

5 Het tweede ronde protocolonderzoek

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk gaan we na welke begripsproblemen optreden in het onderwijs aan de hand van de gereviseerde thema/blok-combinatie 'Energievoorziening/Arbeid en Energie' bij leerlingen uit 4/5VWO, in hoeverre het de 'gewenste' begripsproblemen betreft en in hoeverre deze problemen in de loop van het onderwijs worden opgelost. Het ligt voor de hand de begripsontwikkeling in het tweede ronde protocolonderzoek, anders dan in de eerste ronde, te beschrijven aan de hand van de 'onderwijsbeelden'. Immers, we hebben de veronderstelde opeenvolging van conceptualisaties van energie in het herziene lesmateriaal geoperationaliseerd als een opeenvolging van onderwijsbeelden (zie §4.3).

Het tweede ronde protocolonderzoek is in grote lijnen hetzelfde opgezet als dat van de eerste ronde. In §5.2 beschrijven we in welke details er afwijkingen zijn. Verder geven we in die paragraaf informatie over de keuze van leraren, klassen en proefgroepen. In §5.3 t/m 5.9 beschrijven we per onderwijsbeeld de resultaten van de protocolanalyse en bediscussiëren we de uitwerking van de onderwijsbeelden in het lesmateriaal. In §5.10 formuleren we de conclusies ten aanzien van de hypothesen die we in §4.2 over de relatie tussen de begripsopbouw en de begripsontwikkeling hebben opgesteld.

5.2 Opzet en uitvoering van het tweede ronde protocolonderzoek

In deze paragraaf geven we informatie over de leraren, klassen en proefgroepen die aan het tweede ronde onderzoek naar begripsontwikkeling hebben meegewerkt. We gaan slechts in op de uitvoering van het protocolonderzoek en de analyse voor zover die afwijken van de eerste ronde die in §3.2 is beschreven.

5.2.1 verzameling van gegevens

De leraren L_1 en L_3 waren ook in de tweede ronde bereid mee te werken aan het onderzoek naar begripsontwikkeling. Om de school- en leraarvariabelen in het onderzoek zoveel mogelijk constant te houden, besloten we de audio-opnamen opnieuw in hun klassen te maken.

Leraar L_1 van school 1 begon in 4VWO met het thema 'Energievoorziening' op het door het project voorgestelde tijdstip (begin mei 1988). Zijn klas zullen we aanduiden als klas 4-11. Door onvoorziene lesuitval kon hij het thema niet voor het einde

van het schooljaar afronden, maar pas aan het begin van het volgende schooljaar, september 1988 (in klas 5-11). In de periode oktober - november maakten we in klas 5-11 audio-opnamen tijdens het blok.

Leraar L₃ van school 2 zou het lesmateriaal gebruiken aan het begin van het schooljaar 1988/1989 in zijn 5VWO-klassen. Hij viel echter langdurig uit. Zijn vervanger had geen ervaring met thema/blok-combinaties. Daarom moesten we helaas afzien van het maken van audio-opnamen aan school 2.

Op het moment dat bekend werd dat het maken van opnamen aan school 2 geen doorgang kon vinden, was het thema reeds afgerond op de andere scholen die het gereviseerde lesmateriaal gebruikten. We besloten dan maar alleen voor het blok audio-opnamen te maken aan één van deze scholen, school 3 met leraar L₄. De opnamen vonden plaats in de periode oktober - november 1988 in klas 5-12. Om ook voor het thema een tweede serie opnamen te verkrijgen benaderden we leraar L₅ van school 4. Hij begon in februari 1989 met het thema in een 5VWO-klas (klas 5-13).

In klas 4-11/5-11 en 5-12 werden proefgroepen geselecteerd, in beide klassen één. Daarbij werden dezelfde criteria aangelegd als in de eerste ronde gebruikt zijn (zie §3.2). In klas 5-13 is geen proefgroep gekozen. Leraar L₅ prefereerde het houden van klassediscussies boven groepsdiscussies vanwege de geringe omvang van zijn klas (8 leerlingen).

Uit tijdsbesparing zijn de lessen in de tweede ronde niet allemaal door een observator gevolgd, met name niet die van groep 4-13 en 5-12. In plaats daarvan is aan de leraren gevraagd een logboek bij te houden van het verloop van hun lessen. Tabel 5-1 geeft meer informatie over de samenstelling van de proefgroepen.

Tabel 5-1: Gegevens van de proefgroepen/klassen

<i>leerling</i>	<i>jongen/meisje</i>	<i>groep</i>	<i>themaperiode</i>	<i>groep</i>	<i>blokperiode</i>
Sita	m	4-11/5-11	mei-sept '88	5-11	okt-nov '88
Els	m	4-11/5-11	mei-sept '88	5-11	okt-nov '88
Bert	j	4-11	mei-juni '88	—	—
Joop	j	4-11	mei-juni '88	—	—
Mike	j	5-11	sept '88	5-11	okt-nov '88
Erik	j	5-11	sept '88	5-11	okt-nov '88
groep	3j	(4-12	mei-sept '88) ¹⁾	5-12	okt-nov '88
klas	5m & 3j	5-13	feb-apr '89	—	—

We kregen van de leerlingen van de proefgroepen toestemming hun schriftelijke aantekeningen te kopiëren. Van klas 4-11/5-11 en 4-12/5-12 konden we beschikken over de antwoorden bij de proefwerken over het thema en het blok voor alle leerlingen. Bovendien hebben we hun verslagen bij de experimenten verzameld.

De banden zijn selectief uitgewerkt op de wijze die in §3.2 beschreven is. In het bijzonder hebben we daarbij gelet op discussies bij opgaven waar we een 'gewenst'

1. Van deze groep hebben we alleen de uitwerking van proefwerkopgaven en de verslagen van experimenten bestudeerd.

begripsprobleem verwachtten. Ook andere delen waaruit onverwachte begripsproblemen of het gebruik van een denkbeeld zou kunnen blijken zijn geselecteerd, vervolgens opnieuw afgeluisterd en letterlijk uitgeschreven. De andere delen zijn globaal uitgewerkt.

5.2.2 de protocolanalyse

De analyse van de protocollen is uitgevoerd door de projectleider in discussie met anderen, zoals beschreven in §3.2. Het beschikbare schriftelijke leerlingmateriaal gebruikten we voor het verkrijgen van aanvullende gegevens.

Richtlijn bij de analyse vormden de hypothesen die we in §4.2 geformuleerd hebben: de vraag in hoeverre de leraren tijdens het onderwijs de bedoelde onderwijsbeelden gebruikten en in hoeverre leerlingen verwachte en niet verwachte begripsproblemen ontmoetten en oplosten. Net zoals in de eerste ronde vormden de gebruikte conceptualisaties, de vakaspecten en de leefwereldindeling van situaties daarbij onze aandachtspunten.

Het optreden van begripsproblemen hebben we zo bij leerlingen uit de proefgroepen in detail kunnen vaststellen. Deze resultaten hebben we proberen te verbreden tot een grotere groep leerlingen door:

- ook de klassikale gesprekken te analyseren. Daarin komen ook andere leerlingen aan het woord;
- overeenkomsten en verschillen tussen klassen te signaleren;
- gebruik te maken van proefwerken en experimentverslagen uit klas 4-11/5-11 en 4-12/5-12. Uit die klassen hebben we van een groep van 44 leerlingen de schriftelijke antwoorden op zowel het eerste (afgenomen halverwege het thema) als het tweede thema-proefwerk (afgenomen na afloop van het thema) verzameld.

5.3 Het functioneren van de 'Oriëntatie' van het thema 'Energievoorziening'

Met de 'Oriëntatie' (hoofdstuk EV1) van het thema 'Energievoorziening' wordt nastreefnd dat:

- de context 'persoonlijk en maatschappelijk energiegebruik' voor leerlingen wordt opgeroepen;
- de leerlingen hun aanvankelijk energiebegrip naar voren brengen zodat zij er aan het eind van het themaonderwijs op kunnen terugkijken en de leraren daarmee rekening kunnen houden.

In beide klassen die we volgen werd een lesuur aan dit hoofdstuk besteed.

In deze paragraaf gaan we na welke conceptualisaties van energie bij leerlingen tijdens de 'Oriëntatie' naar voren komen en in hoeverre dit hoofdstuk functioneert zoals bedoeld.

5.3.1 energie in taaksituaties

Uit de discussies die bij het behandelen van de 'Oriëntatie' in de klas gehouden worden komt naar voren dat er zowel leerlingen zijn die bij 'taaksituaties' de

conceptualisatie 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten' gebruiken, als leerlingen met 'energie als een bruikbaar iets'.

De eerstgenoemde conceptualisatie vinden we bij Joop uit groep 4-11. Volgens hem 'verbruikt' een elektrisch verwarmingselement energie om water op te warmen. Uit zijn woorden blijkt dat warmte voor hem geen energie is. Bovendien vindt hij dat je energie niet meer kunt terugkrijgen als het eenmaal voor verwarmen gebruikt is. Een andere leerling uit die groep weet daarentegen dat energie 'behouden' is:

Sita: Energie gaat toch nooit weg, ik bedoel het blijft altijd bestaan, alleen in een andere vorm misschien.

Er is in de klas van Joop en Sita een leerling, Tom, die in twijfel trekt of energie wel behouden is. Hij beschouwt daartoe een geïdealiseerde situatie: een perfect geïsoleerde ruimte. Bovendien gebruikt hij de voorstelling van warmte/energie als een 'iets' dat je 'in de ruimte' kunt stoppen en er weer uit kunt halen.

Protocol OBO-1^b (klas 4-11, halverwege les 1)

- 1 Tom Ik weet niet of het [= energie is behouden] in het geheel wel waar is. Dat is wel zo, maar volgens mij niet altijd
- 2 L₁ Heb je een idee van situaties waarin het eventueel niet het geval is?
- 3 Tom Stel bijvoorbeeld dat je een perfect afgesloten ruimte hebt en dan is er verwarming en die geeft warmte af en die warmte zou je dus opnieuw kunnen gebruiken als warmte, als ie dus in totaal is afgesloten [klinkt alsof hij dat grote onzin vindt]
- 4 Ger [instemmend met Tom] Dan gebruik je die energie niet
- 5 Els Ik vindt het ook maar raar
- 6 Tom Dan stop je er energie in en je haalt het er weer uit
- 7 L₁ (gaat in op 'warmteisolement') dan verbruikt het toch niets als je een hoeveelheid gas of een hoeveelheid stof helemaal afsluit zodat de warmte er niet uit kan, dan wordt het ook niet verbruikt
- 8 Tom Ja, als je een andere bron van energie gebruikt die wordt omgezet dan is dat in principe ook niet verbruikt want het is nog energie
- 9 (de leraar gaat naar een volgende vraag)

Tom geeft als voorbeeld van een situatie waarin energie volgens hem niet behouden is (1) een typische 'verbruik-situatie' (op temperatuur houden van een woonruimte) waarbij hij 'verlies' door warmteafgifte aan de omgeving uitsluit: een 'perfect afgesloten ruimte' waarin een 'verwarming'(-sapparaat) aanwezig is die warmte afgeeft (3). Hij redeneert dat je de warmte/energie na gebruik opnieuw zou kunnen gebruiken als die behouden zou zijn en dat vindt hij onzinnig. Ger (4) stemt met hem in: dat zou betekenen dat je de warmte/energie geheel niet gebruikt. Het afwijzen van die redenering betekent dat warmte/energie volgens hen 'verbruikt' wordt bij het op temperatuur houden en dus niet behouden is.

De leraar lijkt aan te nemen (7) dat iedereen toch wel weet dat een (netto) warmteto-

-
2. OBO-1: we zullen de protocollen noemen naar het onderwijsbeeld (OB) waar ze bijhoren. In de 'Oriëntatie' van het thema 'Energievoorziening' is geen onderwijsbeeld uitgewerkt, vandaar de aanduiding OBO-1: het eerste protocol dat bij het 'nulde' onderwijsbeeld hoort.

voer leidt tot temperatuurverhoging. Met andere woorden: hij begrijpt de redenering van Tom niet. Tom begrijpt op zijn beurt niet wat de leraar in 7 bedoelt. Wat de leraar zegt betreft hij in (8) op de situatie waarin energie volgens hem *wel* behouden is: een 'bron' wordt omgezet in iets anders dat energie is. Waarschijnlijk doelt hij op brandstof die bij verbranding wordt 'omgezet' in warmte (=hete verbrandingsgassen). De leraar heeft het in 7 immers over 'gas', 'stof' en 'warmte'.

Tom heeft 'energiebehoud' vanuit het grondidee 'energie als een bruikbaar iets' betekenis gegeven: energie is slechts behouden als zij van de ene bruikbare vorm (bijvoorbeeld brandstof) wordt 'omgezet' in een andere bruikbare vorm (zie 8), maar energie is niet behouden als zij 'verbruikt' wordt.

De leraar richt zich niet op het verhelderen van de redenering van Tom (hij vraagt bijvoorbeeld niet: heb je het over opwarmen of warm houden?), maar de uitspraken van Tom zijn voor hem aanleiding te vertellen 'hoe het zit'. De leraar en de leerling begrijpen elkaar niet (zie 7 en 8) vanwege een verschil in conceptualisatie.

De redenering van Tom impliceert dat de ruimte, ondanks zijn perfecte afsluiting, toch zou afkoelen als er geen warmte aan wordt toegevoerd. Dit wijst op het bestaan van een denkbeeld dat *warme voorwerpen 'vanzelf', dat wil zeggen zonder warmteafgifte aan de omgeving, afkoelen tot de omgevingstemperatuur*. Dit denkbeeld, dat we achteraf ook in protocollen uit de eerste ronde kunnen aanwijzen, zal in de rest van dit hoofdstuk een belangrijke rol spelen. De uitspraken van Tom geven aan dat dit denkbeeld door sommige leerlingen reeds bij aanvang van het thema gebruikt wordt.

We vinden ook enkele leerlingen, onder andere Sita, die weliswaar vinden dat warmte/energie 'verbruikt' wordt bij opwarmen, maar ook van mening zijn dat er bij afkoelen weer warmte 'ontstaat' en aan de omgeving wordt afgegeven.

5.3.2 energie in valsituaties

In §3.8 hebben we de volgende denkbeelden gevonden m.b.t. valsituaties:

- valsituaties hebben niets met energie te maken;
- 'energie als werkingsvoorwaarde voor vallen': een vallend voorwerp 'krijgt' energie en 'verbruikt' die meteen om te vallen;
- 'energie als de activiteit bewegen': de activiteit vallen zelf is energie: hoe groter de valsnelheid desto meer energie.

Deze denkbeelden vinden we alle drie ook terug in de discussies van leerlingen over valsituaties tijdens de 'Oriëntatie'. Joop betreft energie bijvoorbeeld niet op het vallen, maar alleen op het omhoog gaan van een weggeworpen bal:

Joop: De bal heeft energie nodig om omhoog te komen. Op een gegeven moment is die op en wordt de bal weer aangetrokken door de aantrekkingskracht van de aarde.

Er wordt energie 'verbruikt' bij het omhoog gaan en die is 'op' in het hoogste punt. Opvallend is ook dat de aantrekkingskracht van de aarde volgens Joop pas gaat werken als het voorwerp gaat vallen.

Andere leerlingen brengen vallen wel met energie in verband maar vinden dat een vallende steen geen energie kan hebben: "die steen heeft nooit energie als ie naar be-

neden valt, de aantrekkingskracht zorgt voor de energie om die steen naar beneden te krijgen" (denkbeeld 'energie als werkingsvoorwaarde voor vallen').

Weer andere leerlingen nemen snelheid als een maat voor energie en kunnen daarvoor bij een worp het omhoog gaan op dezelfde manier beschrijven als het vallen: de steen krijgt de energie, die het 'verbruikt' heeft bij het omhoog gaan, bij het vallen weer terug. Zij vinden dan ook dat een bewegend voorwerp energie *heeft*. Eén van hen geeft als voorbeeld "een achtbaan, die heeft energie als die naar beneden komt en die gebruikt hij weer om naar boven te komen" (denkbeeld: 'energie als de activiteit bewegen'). De leraar grijpt dit voorbeeld aan om de leerlingen de relatie tussen 'snelheid hebben' en 'energie hebben' duidelijk te maken. Maar dan blijkt dat sommige leerlingen een heel andere relatie leggen tussen snelheid en energie.

Protocol OBO-2 (klas 5-13, les 2)

- 1 L₅ Zo'n karretje in een achtbaan, daar ben je het wel mee eens dat als tie naar beneden gaat dat ie energie heeft?
- 2 Koen Nee dan krijgt ie snelheid
- 3 L₅ En dat is iets anders dan energie?
- 4 Koen Ja want (onduidelijk: dan ontwikkelt hij) (onverstaanbaar)
- 5 L₅ Jij zegt, het is niet energie die in de kar zit, als die kar in het laagste punt is dan sjeest ie daar dus voorbij en dan gaat ie weer omhoog, daar is toch energie voor nodig?
- 6 Koen Ja maar daar gaat (onverstaanbaar) de snelheid ... die energie wordt ontwikkeld in de snelheid
- 7 L₅ Energie is ergens in die snelheid, alleen noem je het geen energie, maar we noemen dat snelheid, het is geen energie
- 8 Koen Nog niet, als tie omhoog gaat, dan wel
- 9 L₅ Dan zie je duidelijker dat het energie is, je weet dat het moeite kost om iets op te tillen, dus d'r is kennelijk energie voor nodig. D'r is een soort afspraak gemaakt dat je vanwege die snelheid een bepaalde hoeveelheid energie kunt toekennen aan dat karretje (en legt verder de formule van kinetische energie uit)

Voor Koen is er bij omlaag gaan niet vanwege de snelheid (2) van energie sprake maar wordt er energie 'ontwikkeld' (4), waarschijnlijk vanwege de werking van de zwaartekracht. Bij het omhoog gaan is er wel sprake van energie vanwege snelheid (6, 8): dan 'ontwikkelt' de snelheid de energie om omhoog te komen.

Voor de leraar is het vanzelfsprekend dat het hebben van snelheid het hebben van energie inhoudt. Door Koen komt hij erachter dat niet alle leerlingen die relatie leggen (5, 7), waarop hij gaat uitleggen hoe het natuurkundig zit (9).

Het zou kunnen zijn dat de situatie van een achtbaan voor een leerling als Koen productief is om een nieuwe relatie te gaan leggen tussen snelheid en energie (hebben): snelheid is niet alleen het gevolg van de 'werking' van energie (bij naar beneden gaan), maar het kan er ook de oorzaak van zijn (bij omhoog gaan).

5.3.3 discussie en conclusies

Een belangrijke doelstelling van de 'Oriëntatie' betrof het vastleggen van het beginpunt van de begripsontwikkeling van leerlingen opdat de leraren in het onderwijs rekening konden houden met de feitelijke beginsituatie en de leerlingen aan het eind van het themaonderwijs op hun aanvankelijke denkbeelden zouden kunnen terugkijken.

Deze opzet is mislukt. De leraren krijgen weliswaar enig inzicht in de denkbeelden van de leerlingen, maar de klassesdiscussies konden niet beperkt worden tot het verhelderen van de denkbeelden. In plaats daarvan voelen de leraren zich (mede door de verwachtingen van de leerlingen) genoodzaakt te vertellen 'hoe het precies zit'. Daarbij moeten ze begrippen gebruiken die in de begripsopbouw pas aan het einde van het thema aan de orde komen. Ze zien daarbij geen mogelijkheid rekening te houden met het feit dat leerlingen hun uitleg anders kunnen opvatten dan zij bedoelen.

We concluderen dat het onderwijs aan de hand van het hoofdstuk EV1 ('Oriëntatie') niet in zijn opzet geslaagd is. Mogelijk is de werkvorm 'klassegesprek' ook niet geschikt om het gestelde doel te bereiken vanwege de verwachting van zowel de leerlingen als de leraar zelf dat de leraar uiteindelijk zegt 'hoe het eigenlijk in elkaar zit'.

5.4 Het functioneren van onderwijsbeeld 1

Onderwijsbeeld 1 ('energie van een bepaalde soort gaat van bron naar ontvanger') is opgenomen om de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets' bij leerlingen te activeren of zonodig alsnog te ontwikkelen door energie als een 'iets' tussen bron en ontvanger aan te wijzen.

In beide proefklassen wordt ongeveer anderhalve les besteed aan de paragrafen en opgaven waarin dit onderwijsbeeld aan de orde komt.

5.4.1 onderwijsbeeld 1 in de context 'elektrische apparaten'

In de context 'elektrische apparaten' zegt onderwijsbeeld 1 dat elektrische energie uit de elektriciteitsbron komt en naar het elektrisch apparaat gaat waar het verbruikt wordt. De formules voor elektrische energie ($U_{el} = V.I.t$) en voor vermogen ($P = U/t = V.I$) en het begrip kWh komen aan de orde.

Bij het maken van de opgaven over elektrische energie zijn leerlingen en leraren vooral bezig met het invullen van de formules, nodig om het gevraagde kwantitatieve antwoord te krijgen. In de begripsopbouw hebben we verondersteld (zie §4.3.1) dat alle leerlingen weten dat elektrische energie in een stroomkring van de spanningsbron naar het verbruiksapparaat gaat. Uit een discussie in klas 5-13 blijkt dat deze veronderstelling onjuist is.

Mia: De batterij geeft geen energie, de stroom wekt de energie in de lamp op hoor, de stroom

Daarmee kan Mia de elektrische stroom goed onderscheiden van de elektrische energie. Een andere leerling kan deze beide onderscheiden door elektrische energie voor

te stellen als een 'iets' dat in de stroom is opgeslagen: 'de elektrische stroom bevat energie'.

5.4.2 onderwijsbeeld 1 in de context 'centrale verwarming'

In de context 'centrale verwarming' zegt onderwijsbeeld 1 dat warm water een bron van warmte is: het kan warmte afgeven (het vakaspect 'energieoverdracht') en koelt daarbij af. In het lesmateriaal zijn enkele opgaven opgenomen over 'afgeven/leveren van warmte' en over het begrip 'soortelijke warmte'. Die zijn mede bedoeld om een begripsprobleem te laten ontstaan bij die leerlingen die afkoelen niet zien als het afgeven van 'bruikbare' warmte/energie.

begripsopbouw door de leraren

De leraren gaan vooral in op de vraag *waar de warmte zich bevindt tijdens het transport*, met name in het geval van 'stadsverwarming'.

Protocol OBI-1 (klas 4-11, les 2)

L₁ Die huizen (in Nieuwegein) hebben een centrale verwarming met water dat uit de elektrische centrale in Utrecht komt. De warmte uit de centrale wordt opgeslagen in een transportvloeistof en in de huizen moet dat weer worden afgekoeld. Als je nou een stof neemt die veel warmte opneemt per kg dan heb je daar weinig van nodig. Dus dan kun je per kg stof veel warmte vervoeren en daarom is water zo'n geschikt transportmiddel voor warmte

Om een voorstelling te geven van het transport van warmte van de elektrische centrale naar de huizen, gebruikt de leraar het beeld dat er warmte in het water 'opgeslagen wordt'. Hij legt weinig nadruk op het feit dat het water *moet* afkoelen om warmte af te geven, waarschijnlijk omdat hij deze relatie bekend verondersteld.

In de begripsopbouw in het lesmateriaal hebben we warmte steeds als een 'overdrachtenergiesoort' behandeld, die ergens 'in kan gaan', 'uit kan komen' en stroomt. Zo bezien is het warme water de energiebron. Het was de bedoeling de aandacht te richten op de temperatuuurdaling bij het afgeven van warmte. De leraar gebruikt echter een andere voorstelling: de elektrische centrale is de 'bron', er stroomt warmte met het water door de buizen van de centrale verwarming en die komt in huis terecht. De aandacht wordt daardoor niet op de temperatuurverhoging bij het opnemen en de temperatuuurdaling bij het afgeven van de warmte gericht, maar op de 'opslag van warmte in water'. De andere doelstelling van onderwijsbeeld 1, het 'aanwijzen' van energie tussen bron en ontvanger, geeft daar overigens zelf aanleiding toe. Dat blijkt ook uit één van de opgaven: de vraag waarom 'water een geschikte vloeistof om warmte te transporteren' is.

begripsontwikkeling bij leerlingen

Alle leerlingen lijken warmte als een energiesoort tussen de warmtebron en de ontvanger aan te kunnen wijzen. Maar niet duidelijk is of ze met 'warmte' bedoelen het warme water zelf of de warmte die daarin opgeslagen is.

Het andere 'gewenste' begripsprobleem, de relatie tussen warmte afgeven en afkoelen, treedt inderdaad op. Maar leerlingen vinden er een onverwachte oplossing voor. Ze ontkennen impliciet dat er een relatie bestaat tussen 'warmte afgeven' en temperatuurdaling van het water in een radiator. Zie bijvoorbeeld Duco in het volgende protocol.

Protocol OBI-2 (klas 5-13, les 4)

- | | | |
|----|------|--|
| 1 | René | Zie je die heeft de grootste soortelijke warmte |
| 2 | Duco | Dat zei ik toch al |
| 3 | René | Maar als je nou een hele lage soortelijke warmte had dan koelt het veel sneller af |
| 4 | Duco | Dat heeft niks met afkoelen te maken |
| 5 | René | Tuurlijk wel |
| 6 | Duco | Ja? Ja maar dat is juist beter want dan |
| 7 | René | Nee |
| 8 | Duco | Jawel want dan zit er heel veel energie in en als het afkoelt gaat er weinig energie weg |
| 9 | René | Natuurlijk niet dan gaat juist nee he nee |
| 10 | Duco | Dat is toch zo als je een kleine soortelijke warmte, vermenigvuldigd hem maar |

[gesprek wordt afgebroken omdat de leraar klassikaal verder met de les doorgaat]

Duco vindt dat soortelijke warmte niets met afkoelen te maken heeft (4), maar alleen met de hoeveelheid warmte die (als een 'iets') in het water 'zit' (3). Hij probeert in 6, 8 en 10 aan te tonen dat de redenering van René niet klopt. Zijn argument is: als soortelijke warmte met afkoelen te maken zou hebben, dan zou het een maat zijn voor de hoeveelheid warmte/energie die bij afkoeling (ongewenst) 'weggaat' (8). Dan zou het beter zijn als water een lage soortelijke warmte heeft (6) want dan gaat er bij afkoeling maar weinig weg van de grote hoeveelheid warmte/energie die het water bevat (8).

René legt een relatie tussen afkoelen en soortelijke warmte (3), maar slaagt er in 9 niet in deze te expliciteren bijvoorbeeld in termen van 'warmte afgeven'.

Achter de uitspraken van Duco vermoeden we een redenering, waarvan we reeds enige elementen in §5.3 bij Tom gevonden hebben. In volgende protocollen, bij andere leerlingen, zullen we nog meer elementen aantreffen. Die redenering ziet er als volgt uit.

Bij verwarmen van (bijvoorbeeld) water wordt warmte/energie 'verbruikt'. Als de warmtetoevoer gestopt wordt, koelt het water 'vanzelf' af, zonder warmte/energie aan de omgeving af te geven. De gebruikte warmte is dus 'op', 'verbruikt' en kan niet meer terug gekregen worden.

In een centrale verwarming kan warmte/energie worden opgenomen door reeds verwarmd water (zonder 'verbruikt te worden' voor temperatuurverhoging) en 'in het water zitten' om op een andere plaats afgegeven te worden. Net zoals de temperatuur van het water niet stijgt bij het opnemen van de 'extra', nog niet 'verbruikte' warmte, daalt de temperatuur niet bij het afgeven ervan.

In deze redenering wordt een onderscheid gemaakt tussen een doelgericht veroorzaakt proces dat energie kost (opwarmen) en een proces dat 'vanzelf' verloopt en daarom niets met energie te maken heeft (afkoelen).

De uitleg van de leraar in protocol OBI-1 lijkt (onbedoeld) sprekend op de redenering van Duco. Slechts de zinsnede 'in de huizen *moet* dat [water] weer afgekoeld worden' geeft aan dat de leraar een geheel andere zienswijze heeft dan Duco: daarmee verwijst hij naar de verandering in temperatuur van het water die bij het leveren van warmte in huis optreedt.

5.4.3 discussie en conclusies

Terugkijkend op het lesmateriaal vinden we dat onderwijsbeeld 1 in teksten en figuren onvoldoende helder naar voren wordt gebracht. Voor het maken van veel opgaven, met name die over elektrische energie, is het niet nodig om onderwijsbeeld 1 te gebruiken. Dat verklaart waarom onderwijsbeeld 1 in de discussies minder naar voren komt dan verwacht.

Bij het ontwerpen van de begripsofbouw hadden we verwacht dat leerlingen met de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets' zouden redeneren dat de warmte die verbruikt wordt bij het opwarmen van het CV-water weer wordt afgegeven bij het afkoelen. We hebben nu gevonden dat er een alternatieve redenering vanuit deze conceptualisatie mogelijk is. Die redenering brengt aan het licht dat er in onderwijsbeeld 1 in feite reeds een zekere behoudsregel gebruikt wordt. Dit onderwijsbeeld zegt weliswaar niet dat warmte behouden is bij opwarmen en afkoelen afzonderlijk, maar wel als deze processen samengenomen worden.

In onderwijsbeeld 1 hebben we geen aandacht besteed (en willen besteden vanwege de dreigende verwarring van energie en materie) aan de vraag hoe energie aanwezig is tussen de bron en de ontvanger. Leerlingen als Duco vormen zich niettemin een beeld hoe energie getransporteerd wordt: 'opgeslagen' in het transportmiddel. Dat beeld wordt door de leraren bevestigd. Maar dat leidt bij sommige leerlingen tot een voorstelling waarbij de aanwezigheid van energie is losgekoppeld van de toestand van het transportmiddel (de elektrische stroom/elektronen; het warme water).

conclusies

1. Er worden in een aantal opgaven situaties aan de orde gesteld die aanleiding geven tot een beschrijving in termen van onderwijsbeeld 1. Er zijn echter ook (te) veel opgaven die niet productief zijn voor het ontwikkelen van onderwijsbeeld 1.
2. Leerlingen die bij aanvang van het thema de conceptualisatie 'energie als bruikbaar iets' nog niet ontwikkeld hebben, lijken onvoldoende gelegenheid te krijgen deze conceptualisatie aan de hand van onderwijsbeeld 1 te ontwikkelen.
3. Het lesmateriaal roept de context 'energietransport' op. In sommige opgaven wordt de bron van het 'energierijke' transportmiddel als 'energiebron' beschouwd (de batterij), in andere situaties wordt het 'energierijke transportmiddel' zelf als bron beschouwd (warm water). Dat geeft aanleiding tot misverstanden, ook bij leraren.

4. De leraren gebruiken het aspect 'energieopslag' vanuit de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets'. Zij komen niet te weten dat leerlingen dit aspect op een geheel andere manier betekenis geven vanuit 'energie als een (niet-behouden) bruikbaar iets'.
5. Leerlingen die het aspect 'energieopslag' in de context van energietransport gebruiken, ontmoeten begripsproblemen die door ons niet verwacht werden. Zij brengen het afgeven van warmte/energie door water niet in verband met de temperatuuurdaling van het water.
6. In de wijze waarop onderwijsbeeld 1 is uitgewerkt in het lesmateriaal is een impliciete behoudsregel ('evenveel bij afkoelen terug krijgen als bij opwarmen verbruikt is') aanwezig die voor leerlingen niet vanzelfsprekend is.

5.5 Het functioneren van onderwijsbeeld 2

Onderwijsbeeld 2 ('weglekken van energie') richt de aandacht op de 'ontvanger' van energie en stelt het 'verbruik' van energie voor de taken verwarmen en bewegen ter discussie.

Leraar L₅ besteedt vier lessen aan de paragrafen en opgaven over dit onderwijsbeeld, voornamelijk in de vorm van klasgesprekken. Leraar L₁ wisselt groepswork af met klassediscussies. Hij besteedt er zes lessen aan, gedeeltelijk in klas 4-11, gedeeltelijk in het volgende schooljaar in klas 5-11.

5.5.1 onderwijsbeeld 2 in de context 'verwarmen en isoleren'

In de context 'verwarmen en isoleren' houdt onderwijsbeeld 2 in dat een ruimte met een temperatuur boven de omgevingstemperatuur warmte toegevoerd kan krijgen en warmte afgeeft aan de omgeving. Het is de bedoeling dat de leerlingen zich gaan afvragen of een ruimte met een hogere temperatuur dan de omgeving afkoelt als er net-toe-geen energie wordt toe- of afgevoerd. Ook moeten leerlingen in deze context betekenis geven aan de begrippen warmtegeleiding, soortelijke warmte en warmtecapaciteit.

de begripsopbouw door de leraren

De leraren introduceren onderwijsbeeld 2 aan de hand van de warmtestroomdiagrammen uit het lesmateriaal (zie figuur 4-1 op blz.98 en 4-2 op blz.100). Vooral L₁ komt daarbij enkele problemen tegen.

In zijn begripsopbouw bij de introductie van onderwijsbeeld 2 besteedt leraar L₁ eerst aandacht aan 'verlies' bij een kachel. In het lesmateriaal staat 'verlies' echter voor 'nog bruikbare' warmte uit een warmtebron die (meteen) 'op de verkeerde plek' terecht komt, zoals het geval is bij schoorsteenverliezen. Dat 'verlies' wordt onderscheiden van 'warmteafgifte' door de verwarmde ruimte, die optreedt vanwege temperatuurverschil met de omgeving. De leraar maakt het in de begripsopbouw gewenste onderscheid tussen 'warmteverlies' en 'warmteafgifte' niet, maar vat deze twee samen onder de term 'verlies'.

Protocol OB2-1 (klas 4-11, les 3)

- 1 L₁ (bij zijn bespreking van het warmtestroomdiagram figuur 4-1 gaat hij in op de slechte isolatie van het lokaal) dus als je dat voor dit lokaal zou moeten doen zou je een dunne pijl van bruikbaar en een dikke pijl van verlies krijgen
- 2 L₁ (maakt de overgang van figuur 4-1 naar 4-2) Zo'n soort schema kun je ook voor een huis tekenen en dan komt er een pijl bij aan de linkerkant, het huis wordt opgewarmd van de ene kant door de verwarming van het huis en verlieswarmte aan de omgeving

In 1 betreft L₁ figuur 4-1 niet op de 'schoorsteenverliezen' van een kachel, maar op de warmteafgifte ten gevolge van slechte isolatie. In 2 doet hij voorkomen of figuur 4-2 een uitbreiding is van 4-1, terwijl de afgegeven warmte in de ene figuur de door een warmtebron geproduceerde bruikbare warmte is en in de andere figuur de (onbruikbaar geworden) warmte die een huis uit gaat. Zijn gebruik van de term 'verlieswarmte' voor warmte die aan de omgeving afgegeven wordt verhuult dat het in figuur 4-2 om (in de kamer) gebruikte warmte gaat en in figuur 4-1 om warmte die niet in de kamer is terecht gekomen.

Deze uitleg zou door leerlingen die 'energie als een (niet-behouden) bruikbaar iets' zien (zoals Tom in protocol OB0-1 doet) verstaan kunnen worden als een bevestiging van hun redenering: een deel van de aan een huis toegevoerde warmte 'gaat op' aan verwarmen (= op temperatuur houden), de rest gaat verloren, waarbij het niet uit maakt of die door de schoorsteen of door de muren en ramen naar buiten gaat.

Leraar L₁ heeft de ervaring dat leerlingen warmte en temperatuur vaak met elkaar verwarren. Hij vindt dat er in het lesmateriaal onvoldoende aandacht is voor dat probleem en wijdt er een afzonderlijke discussie aan. Daartoe stelt hij de vraag:

- L₁ Wie zou mij kunnen uitleggen wat nou eigenlijk het verschil is tussen de warmte van dat glas water en de temperatuur ervan?

Het toekennen van warmte aan het glas water ('de warmte van het glas water') is in onze begripsopbouw ongewenst, niet alleen omdat die zegswijze natuurkundig dubieus is, maar ook omdat die het maken van een scherp onderscheid tussen warmte en temperatuur bemoeilijkt. Beide worden zo immers aan het water toegekend terwijl het feit dat warmte niet moet worden toegekend, maar toe- of afgevoerd wordt juist een duidelijk punt van onderscheid met temperatuur zou kunnen vormen.

leerlingen over warmtetoevoer en warmteafgifte

Het is de bedoeling dat de leerlingen voor het 'gewenste' begripsprobleem komen te staan waarom een voorwerp of ruimte niet afkoelt als de (netto) warmtetoevoer nul is. In de discussies van groep 4-11 komen de begripsontwikkeling en begripsproblemen, die rond onderwijsbeeld 2 optreden, veel duidelijker naar voren dan in de klasgesprekken in klas 5-13. We zullen daarom vooral groep 4-11 volgen.

Sita loopt tegen het 'gewenste' begripsprobleem aan. Zij verbaast zich er over dat er geen warmte nodig is om een perfect geïsoleerd huis op temperatuur te houden. Dat probleem kan ze al snel oplossen: "Oh, er is geen warmteverlies". Terwijl

er in de opgave slechts over 'warmteafgifte' gesproken wordt gebruikt zij de term 'warmteverlies' die de leraar in zijn uitleg heeft gebruikt (zie protocol OB2-1). Ze legt bovendien de relatie tussen 'verlies' en temperatuurverschil met de omgeving:

Sita: Kun je dat zeggen, als de temperatuur hoog is heb je meer warmteverlies?

Zo kan ze al snel op een correcte manier omgaan met opgenomen en afgegeven warmte in vrij complexe situaties. We concluderen dat Sita onderwijsbeeld 2 leert. Joop brengt daarentegen het handhaven van het temperatuurverschil met de omgeving in verband niet met het afgeven van energie aan de omgeving, maar alleen met 'energieverbruik'. Als er *bovendien* warmte aan de omgeving wordt afgegeven kost dat "extra warmte"³⁾ die niet nodig is als een huis perfect geïsoleerd is. Sita gaat tevergeefs de discussie met Joop aan:

Protocol OB2-2 (groep 4-11, les 3)

- 1 Joop Er is toch *altijd* verlies in een huis
- 2 Sita Nee joh, als je een goede isolatie hebt niet
- 3 Joop Je hebt altijd verlies
- 4 Sita Nee
- 5 Joop Natuurlijk wel

(ze gaan door naar een volgende opgave)

Joop vindt dat er altijd verlies *in* een huis is (1), ook bij een perfecte isolatie. Dat suggereert dat hij een ander 'verlies'-begrip gebruikt dan Sita: de energie die in huis nodig is/verbruikt wordt om het op temperatuur te houden. Sita brengt 'verlies' alleen in verband met isolatie (2), hetgeen erop wijst dat zij het afgeven van warmte naar de omgeving de enige vorm van verlies vindt.

We kunnen de redenering van Joop begrijpen als we veronderstellen dat een huis volgens hem 'vanzelf' afkoelt, ook al is het perfect geïsoleerd. Vergelijk de redenering van Tom in OBO-1. Daarom is er "altijd" warmte nodig ("verlies") om het huis op temperatuur te houden. Sita vindt daarentegen dat een huis *alleen* kan afkoelen door warmteafgifte aan de omgeving (= 'verlies' in haar betekenis).

Uit andere discussies blijkt dat warmte en temperatuur voor Joop nog geen duidelijk onderscheiden begrippen zijn en dat Joop het (daarom?) ook niet heeft over warmte als een 'iets'. Hij moet de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets' voor warmte nog ontwikkelen.

In een lange discussie over (de warmtecapaciteit van) een CV gaat hij uiteindelijk over energie als een 'iets' praten en daarmee onderscheid maken tussen warmte en temperatuur. Daarbij lijkt hij een zelfde soort redenering te ontwikkelen als Duco in protocol OB1-2:

3. Joop gebruikt de term "extra warmte" zelf. Hij bedoelt daarmee de warmte die (naar zijn mening 'extra') nodig is om het warmteverlies naar de omgeving te compenseren. Op blz.121 hebben wij de term 'extra warmte' gebruikt in een andere betekenis: de warmte die, zonder te worden verbruikt, in warm CV-water wordt opgenomen en in de radiator wordt afgegeven.

- (a) water wordt 'eerst' opgewarmd in de ketel;
 - (b) daarbij wordt een deel van de toegevoerde warmte verbruikt;
 - (c) de rest van de warmte wordt in het water opgenomen; dit leidt niet tot temperatuurverhoging en deze warmte wordt dus niet verbruikt; deze warmte wordt in de kamer afgegeven; dit leidt niet tot het dalen van de temperatuur van het water;
 - (d) het water komt afgekoeld (door 'vanzelf afkoelen', bijvoorbeeld in de toe- en afvoerleidingen) terug in de ketel, wordt daar weer 'eerst' opgewarmd enz.
- De meeste elementen van deze redenering vinden we terug in het volgende protocol, waarin Joop betekenis geeft aan 'de warmtecapaciteit van een CV-installatie'.

Protocol OB2-3 (groep 4-11, les 4)

- | | | |
|---|------|--|
| 1 | Joop | Warmtecapaciteit, dat is wat een voorwerp afstaat nadat hij opgewarmd is |
| 2 | Sita | Nee, de warmte die hij afstaat of opneemt bij een temperatuurstijging of daling |
| 3 | Joop | Wat dan, wie afgeeft? Nee nadat hij opgewarmd is
(ze worden het niet eens; als de leraar er is vraagt Joop wat warmtecapaciteit is; de leraar vraagt om een toelichting:) |
| 4 | Joop | Als tie een kleine warmtecapaciteit heeft houdt dat in dat je veel warmte nodig heeft om eerst warm te worden, dus zeg maar dat die warmte 100 is, is het dan zo dat ie 80 % van die warmte nodig heeft om zelf warm te worden en 20% van de warmte afstaat?
(de leraar vat dit op alsof 20% van de opgenomen warmte meteen weer wordt afgestaan en denkt dat hij een correct begrip heeft) |

Voor Joop heeft warmtecapaciteit te maken met de hoeveelheid warmte die de ketel kan leveren, de warmte die beschikbaar komt voor verwarming (1).

Element (a) vinden we in 1 en 4: een voorwerp/de CV moet *eerst* warm worden. Element (b) vinden we in 4: voor het opwarmen is warmte nodig (80%). Die warmte is 'verbruikt'. Het afkoelen tot de omgevingstemperatuur gaat 'vanzelf', zonder warmteafgifte aan de omgeving. De verbruikte warmte komt dus niet meer beschikbaar. Nadat het opgewarmd is (1, 3) neemt het water (zonder temperatuurverhoging) nog meer warmte (de 20%) op die niet 'verbruikt' wordt en dus weer kan worden afgegeven (2,3). Impliciet blijft dat het water telkens weer opgewarmd moet worden als het terugkomt in de ketel (element d).

Het afkoelen gaat volgens Joop 'vanzelf' zonder warmteafgifte aan de omgeving. Daarom kan de 'verbruikte' 80% van de warmte niet meer worden afgestaan om gebruikt te worden voor het verwarmen van de kamer.

Uit het feit dat Joop nu over het 'afgeven' van warmte is gaan spreken, leiden we af dat hij ertoe neigt energie als een 'iets' te zien. Tegen de tijd dat hij zo ver is, gaat het onderwijs reeds over naar onderwijsbeeld 3. Bij Bert, die ook deel uitmaakt van de groep van Joop en Sita, vinden we een soortgelijke begripsontwikkeling als bij Joop. Het leggen van de relatie tussen warmte afgeven en afkoelen leidt er toe dat hij warmte en temperatuur gaat onderscheiden:

Bert: Die één (= CV) die staat, die staat minder energie af bij een graad temperatuurdaling [dan de andere CV]

Opvallend is dat in de leerlingdiscussies verwijzingen naar de 'warmtestroomdiagrammen' uit het lesmateriaal ontbreken. Deze diagrammen functioneren veel minder dan we verwachtten. Maar er wordt in de opgaven nauwelijks expliciet naar gevraagd of verwezen.

leerlingen over soortelijke warmte

Koken (1989) onderzocht de proefwerkantwoorden van een groep van 44 leerlingen uit school 2 en 3 die natuurkunde in 5VWO in hun vakkenpakket kozen. In één van de opgaven van het proefwerk dat na het behandelen van onderwijsbeeld 3 in de proefklassen (in 4VWO) werd afgenomen, moest onderwijsbeeld 2 gebruikt worden. Het betrof de situatie dat een gegeven hoeveelheid water in een aquarium door een elektrische dompelaar op temperatuur wordt gehouden. Gevraagd werd uit te rekenen hoeveel warmte in een uur door het aquarium aan de omgeving wordt afgestaan. De bedoeling was dat de leerlingen zouden zeggen dat alle warmte die in de dompelaar wordt ontwikkeld ook wordt afgegeven aan de omgeving en dus als antwoord het gegeven vermogen zouden vermenigvuldigen met de tijd.

23 leerlingen (52%) gebruikten echter de formule $c.m.\Delta T$ (c is de soortelijke warmte). De meeste leerlingen vulden voor ΔT het temperatuurverschil van het aquariumwater met de omgeving in. Sommigen vermenigvuldigden de uitkomst nog eens met de tijd, maar enkele anderen vulden voor ΔT de tijd in.

Koken suggereert dat de leerlingen 'maar een formule pakken en invullen'. Een andere mogelijkheid lijkt ons waarschijnlijker: de leerlingen denken dat er warmte 'verbruikt' wordt bij het warm houden. Dan zou soortelijke warmte de volgende betekenis kunnen hebben:

soortelijke warmte als maat voor de hoeveelheid warmte/energie die nodig is om (1 kg) water warm te houden (bij een temperatuurverschil van 1°C met de omgeving).

Deze warmte wordt 'verbruikt' om het 'vanzelf afkoelen' te compenseren. De mate van 'vanzelf afkoelen' is evenredig met het temperatuurverschil met de omgeving. De hoeveelheid warmte/energie om het afkoelen te compenseren is dat dus ook. De verbruikte hoeveelheid is natuurlijk ook evenredig met de tijd dat het water warm gehouden wordt. Dat zou kunnen verklaren waarom veel leerlingen de uitkomst nog eens met de tijd vermenigvuldigden of de ΔT als tijd nemen. We vonden een soortgelijke betekenis bij Duco (zie §5.4).

Van groep 4-11 was Sita de enige die bij de aquariumopgave een correct antwoord gaf (overigens nadat ze eerst $c.m.\Delta T$ gebruikte, maar voor $\Delta T = 0$ invulde). Dat komt overeen met wat we in de protocollen vonden: zij kan als enige van die groep onderwijsbeeld 2 gebruiken. Dat Sita het desondanks eerst fout doet geeft aan dat het denkbeeld dat er warmte verbruikt wordt ook nog voor de hand ligt voor leerlingen die onderwijsbeeld 2 reeds hebben ontwikkeld.

We concluderen dat ongeveer de helft van de leerlingen het 'gewenste' begripsprobleem niet heeft ontmoet, dan wel niet de bedoelde oplossing heeft gevonden.

5.5.2 onderwijsbeeld 2 in de context 'bewegen en stroomlijnen'

In de context 'bewegen en stroomlijnen' houdt onderwijsbeeld 2 in dat een automotor arbeid levert ('toevoert') aan een rijdende auto. Die arbeid is nodig vanwege arbeid door achterwaartse krachten en wordt als warmte afgegeven aan de omgeving. Snelheidstoename is dus alleen mogelijk als de 'ingaaende' arbeid, geleverd door de motor, groter is dan de 'uitgaande arbeid/warmte' vanwege achterwaartse krachten. De snelheid is constant als er evenveel arbeid de auto 'in komt' als er 'uit gaat'.

begripsopbouw door de leraren

De leraren proberen de begripsopbouw in het lesmateriaal in grote lijnen te volgen, maar net als bij 'verwarmen en isoleren' stuiten zij daarbij op enkele probleempunten. Ook hier slagen ze er niet in om 'opslag van energie' te vermijden. Leraar L_5 schrijft in zijn lessenverslagboek:

"Eigen probleem: Arbeidsopslag in de vorm van bewegingsenergie. Ik kon kinetische energie hier niet vermijden. Moest dat of kon het toch genoemd worden?"

begripsontwikkeling bij leerlingen

Bert geeft in de context van een optrekkende auto een andere dan de bedoelde betekenis aan de termen 'ingaaend vermogen' en 'uitgaand vermogen'. Hij vindt dat het 'voorwaarts' en 'achterwaarts' vermogen (een naamgeving die Bert ontleent aan die van de krachten op de auto) bij elkaar opgeteld moeten worden. De reden waarom geeft hij in het volgende protocol, waarin hij zich tot leraar L_1 richt omdat hij geen gehoor vindt bij Sita en Els.

Protocol OB2-4 (groep 4-11, les 5)

- | | | |
|---|-------|---|
| 1 | Bert | Moet je niet deze twee [$P_{\text{voorwaarts}}$ en $P_{\text{achterwaarts}}$] allebei optellen want hij levert die om te rijden naar voren en hij levert die ook nog eens om een tegenwerkende kracht tegen te gaan |
| 2 | L_1 | Jij zegt hij levert ook het achterwaartse vermogen P_{uit} he? |
| 3 | Bert | Ja |
| 4 | L_1 | Dat is niet zo P_{in} is wat de motor per seconde aan de auto levert en P_{uit} is wat de auto per seconde aan de omgeving levert |
| 5 | Bert | Ooh, ja eigenlijk is P_{uit} een gevolg van P_{in} |
| 6 | L_1 | In en uit, daar moet je de auto bij denken zoals in de tekening getekend is, P_{in} is wat de auto inkomt en P_{uit} is wat de auto uitgaat |
| 7 | Bert | Ja
(uit het vervolg blijkt niet welk nieuw inzicht Bert heeft verworven) |

In 1 heeft Bert het niet over 'leveren aan' (zoals onderwijsbeeld 2), maar 'leveren om': de auto 'levert'/gebruikt arbeid voor twee taken: om te rijden ($P_{\text{voorwaarts}}$) en om de tegenwerkende krachten tegen te gaan ($P_{\text{achterwaarts}}$).

Uit 2 en 4 blijkt dat L_1 begrijpt welke redenering Bert houdt. In 4 geeft de leraar uitleg in termen van onderwijsbeeld 2, waarbij hij motor, auto en omgeving van elkaar onderscheidt. Bert begrijpt dat hij fout redeneerde: de twee vermogens mag hij niet optellen want de een is de oorzaak van de ander (5).

De redenering van Bert dat er arbeid/energie nodig is voor twee taken (naar voren rijden en het tegengaan van de achterwaartse kracht) impliceert het denkbeeld dat er, los van het optreden van achterwaartse krachten, arbeid/energie 'verbruikt' wordt om te blijven bewegen. Dit lijkt het equivalent van het denkbeeld dat Van Genderen (1989) voor krachten vindt, namelijk dat er een (netto) voorwaartse kracht nodig is om in voorwaartse richting te blijven bewegen.

Els en Sita accepteren de analogie tussen 'ingående' en 'uitgaande' arbeid en warmte. Ze weten uiteindelijk (voor het geval dat de snelheid constant is):

Sita: $W_{in} = W_{uit}$ en dan zal de snelheid niet verder stijgen

In zijn eerder genoemde onderzoek vermeldt Koken (1989) dat 18 leerlingen (44%) bij een proefwerkvraag over een auto waarvan 'inkomende arbeid' en 'uitgaande arbeid' bekend zijn, een antwoord gaven waaruit het gebruik van onderwijsbeeld 2 blijkt: de auto trekt op omdat $W_{in} > W_{uit}$.

5.5.3 discussie en conclusies

We hebben geconstateerd dat de begripsopbouw een leraar op het verkeerde spoor kan zetten. Een beter warmtestroomdiagram zou de leraren moeten helpen om 'verlies' door 'op de verkeerde plek terecht komen' en 'warmteafgifte' vanwege een temperatuurverschil duidelijker van elkaar te onderscheiden in hun begripsopbouw. We hebben aanwijzingen gevonden dat sommige leerlingen pas tijdens het onderwijs met onderwijsbeeld 2 een onderscheid tussen warmte en temperatuur gaan maken. Er zijn leerlingen met het denkbeeld dat afkoelen kan plaatsvinden zonder warmteafgifte aan de omgeving. Dat maakt begrijpelijk waarom leerlingen de redenering van onderwijsbeeld 2 niet kunnen volgen. Zij vinden dat er warmte 'verbruikt' wordt bij 'op temperatuur houden': die warmte is nodig om het 'vanzelf afkoelen' te compenseren.

Het vergelijken van opgenomen en later afgegeven warmte zou, eventueel ondersteund door experimenten, een eenvoudiger eerste aanzet tot 'energiebehoud' kunnen vormen dan onderwijsbeeld 2. Daarmee kan immers het denkbeeld worden weggenomen dat iets afkoelt zonder warmteafgifte. Dat kan naar verwachting weer bijdragen aan het wegnemen van het denkbeeld dat warmte bij op temperatuur houden wordt 'verbruikt'.

In de context 'bewegen en stroomlijnen' is het vergelijken van opgenomen en afgegeven energie een nog groter probleem. Het denkbeeld dat een voorwerp 'vanzelf' (dat wil hier zeggen zonder uitwendige kracht en dus zonder dat er arbeid wordt verricht) tot stilstand komt is waarschijnlijk nog sterker dan het denkbeeld dat afkoelen kan plaatsvinden zonder warmteafgifte.

We vragen ons nu af of de analogie tussen 'op snelheid houden' en 'op temperatuur houden', die we in onderwijsbeeld 2 hebben uitgewerkt, wel zo'n gelukkige is. De zegswijze 'arbeid leveren aan' is in de natuurkunde ongebruikelijk. Nu blijkt deze zegswijze ook minder dan verwacht aan te sluiten bij de zegswijze 'arbeid leveren' uit de leefwereld, die gebruikt wordt in de zin van 'arbeid leveren om' of 'een prestatie leveren' waarbij er geen 'ontvanger' is.

conclusies

1. De leraren proberen onderwijsbeeld 2 te gebruiken maar ontmoeten op twee punten problemen. Het is hen niet duidelijk dat er in de onderwijsbeelden 1 en 2 van verschillende soorten 'energieverlies' sprake is. Verder voelen de leraren zich genoodzaakt om over 'warmte-opslag' en 'arbeid-opslag = kinetische energie' te gaan praten.
2. Er zijn leerlingen die in de discussies rond onderwijsbeeld 2 aanleiding vinden om in ieder geval warmte als een (niet behouden) 'bruikbaar iets' te gaan zien.
3. Ongeveer de helft van de leerlingen waarvan we proefwerkvragen hebben onderzocht vindt dat een 'warm' voorwerp altijd 'vanzelf', zonder warmte aan de omgeving af te geven, afkoelt en dat er dus voortdurend (netto) warmte 'verbruikt' moet worden om een voorwerp op een temperatuur boven de omgevings-temperatuur te houden. Om gelijksoortige redenen ('vanzelf' tot stilstand komen) vinden ze dat er aan een auto die met constante snelheid rijdt meer energie toegevoerd moet worden dan de auto in dezelfde tijd aan de omgeving afgeeft. Deze leerlingen hebben de 'gewenste' begripsproblemen bij onderwijsbeeld 2 niet ontmoet of hebben er niet de bedoelde oplossing bij gevonden.
4. De andere helft van de leerlingen heeft wel de 'gewenste' begripsproblemen ontmoet en opgelost. Zij zien niet alleen in dat de (in dezelfde tijd) opgenomen en afgegeven warmte/energie bij op temperatuur houden aan elkaar gelijk zijn maar weten bovendien dat de hoeveelheden energie betrokken bij opwarmen en weer afkoelen tot de begintemperatuur aan elkaar gelijk zijn. Evenzo kunnen ze onderwijsbeeld 2 gebruiken voor optrekken, afremmen en op snelheid houden.
5. In de begripsopbouw is geen rekening gehouden met het optreden van het denkbeeld dat afkoelen en tot stilstand komen 'vanzelf' plaatsvinden en dat er geen energie(soort) bij ontstaat en/of aan de omgeving wordt afgegeven.

5.6 Het functioneren van onderwijsbeeld 3

Met onderwijsbeeld 3 ('apparaten als energieomzeters') worden apparaten beschouwd als 'verbruikers' van de beschikbare energiesoort en als 'producenten' van andere energiesoorten. Het gaat om de apparaten tijdens hun 'normale' werking, niet tijdens het 'op gang komen' en het 'uitlopen'.

We verwachten 'gewenste' begripsproblemen rond het 'produceren', niet alleen van de 'bruikbare' energiesoort, maar vooral van de energiesoort die als 'verlies' gezien moet worden.

De leraren besteden ongeveer 6 lessen aan de hoofdstukken over onderwijsbeeld 3. Bij leraar L₁ vallen die lessen gedeeltelijk in 4VWO, gedeeltelijk in 5VWO. Omdat de leerlingen uit groep 4-11 in 5VWO niet meer bij elkaar in de klas zitten, verandert deze proefgroep van samenstelling. In plaats van Joop en Bert gaan Mike en Erik deel uitmaken van groep 5-11.

5.6.1 onderwijsbeeld 3 in de context 'elektrische apparaten'

Het onderwerp 'transport van energie' wordt in het lesmateriaal niet aan de orde gesteld, maar leerlingen voelen hiertoe zelf de behoefte omdat zij 'transport' als een bron van 'energieverlies' bij elektrische apparaten zien. Ze ondervinden dan hetzelfde (door ons niet verwachte) begripsprobleem dat we in §5.4.1 tegen kwamen, namelijk het onderscheid tussen elektrische energie en elektrische stroom. René vindt dat de elektrische stroom aan het eind van een kabel kleiner is dan aan het begin: "er moet toch verlies zijn".

Zo'n zelfde probleem vinden we in de leerlingantwoorden op een proefwerkvraag. Het gaat om het tekenen van het energiestroomdiagram van een elektrisch verwarmingselement. In de door Koken onderzochte groep van 44 leerlingen wordt eenzelfde probleem gevonden bij het tekenen van een energiestroomdiagram van een verwarmingselement. Volgens 12 leerlingen (27%) wordt het toegevoerde elektrische vermogen slechts *gedeeltelijk* in warmte omgezet. Het andere deel van het toegevoerde vermogen komt het element weer uit.

De leerlingen zouden via twee redeneringen tot dit antwoord kunnen komen:

- 'er is altijd verlies' door de weerstand in de draden. De elektrische stroom zou dus nog wat energie over moeten houden om door de retourdraad te kunnen stromen. Dit 'verlies' draagt niet bij tot de gewenste taak 'verwarmen' omdat er op een niet-gewenste plaats wordt verwarmd;

- er wordt elektrische stroom 'verbruikt', maar een deel van de stroom gaat door naar de andere pool (verwarring van elektrische energie en elektrische stroom, Licht, 1989).

De oorzaak waardoor dit onverwachte begripsprobleem bij onderwijsbeeld 3 optreedt is waarschijnlijk dezelfde als bij onderwijsbeeld 1: het onderscheid tussen elektrische energie en elektrische stroom is in deze onderwijsbeelden moeilijk te geven.

5.6.2 onderwijsbeeld 3 in de context 'apparaten die arbeid leveren'

Er zijn nauwelijks leerlingen die moeite hebben met de gedachte dat een boormachine niet alleen (elektrische) energie *verbruikt*, maar ook energie levert. Onder het leveren van energie lijken ze echter de 'activiteit' bewegen te verstaan. Een leerling zegt het zo: "Elektriciteit is de energiesoort die verdwijnt, die wordt omgezet in beweging". Vervolgens wordt het bewegen benoemd als energiesoort: 'bewegingsenergie'. Maar er ontstaat een begripsprobleem rond de vraag wat het verschil is tussen 'arbeid' en 'bewegingsenergie'.

Protocol OB3-1 (klas 5-13, les 9)

Situatie: klasgesprek over de vraag welke gewenste energiesoort door een boormachine wordt afgegeven

- 1 Sara (de afgegeven energiesoort is) Arbeid
- 2 Ada Kan je niet zeggen bewegingsenergie als tie ronddraait?
- 3 Sara Is dat niet hetzelfde als arbeid?
- 4 Rene Rondraaienergie

(de leraar gaat in op arbeid als *afgegeven* energiesoort en bewegingsenergie als de energiesoort *van* de draaiende boormachine)

Binnen onderwijsbeeld 3 kan geen reden aangegeven worden waarom arbeid in dit verband een juiste term is en bewegingsenergie niet. De leraar gaat dan ook verder dan onderwijsbeeld 3 als hij het verschil gaat uitleggen: hij gaat bewegingsenergie aan de boormachine toekennen. Deze uitleg geeft aanleiding tot misverstanden tussen leraar en leerlingen, onder andere omdat de leraar het over 'de bewegingsenergie van de boor' heeft, die constant is, en de leerlingen het hebben over energie als 'activiteit' (het ronddraaien) die voortdurend wordt 'geleverd'.

Veel leerlingen vinden aanvankelijk dat er in de boor (-machine en/of de boorpunt) energie 'op gaat' aan wrijving ('wrijvingsenergie') en warmte. Er zijn leerlingen die in de loop van de discussie warmte als 'geproduceerde energiesoort' gaan aanwijzen. Zij zijn het 'gewenste' begripsprobleem tegengekomen rond het 'warm worden' van apparaten' en warmteafgifte en hebben dat opgelost. Het volgende protocol geeft aan dat Bert er toe komt om het 'koelen' van een boormachine als het afvoeren van warmte te gaan zien.

Protocol OB3-2 (groep 4-11, les 8)

Situatie: gegeven is dat de boormachine van 500W een nuttig vermogen van 255W afgeeft. Gevraagd wordt 'hoeveel vermogen moet via koeling van de boormachine afgevoerd worden?' (onderdeel f. van een opgave).

- 1 Bert [onderdeel] f, 245, dat moet gekoeld worden, dat gaat op aan warmte en wrijving
(Ze rekenen de uitkomst om in procenten en tekenen het gevraagde energiestroomdiagram)
- 2 Els We hebben trouwens [onderdeel] f nog niet. Volgens mij gaat allem.... gaat dat helemaal niet allemaal
- 3 Bert (wijst aan in energiestroomdiagram) Kijk nu, nou dit is 255W ja? dat gaat op aan arbeid, ja? en dan vragen ze 'hoeveel vermogen moet via de afkoeling afgevoerd worden?'
- 4 Els Dus hoeveel van die 255?
- 5 Bert Nee, hoeveel van die 500W, 255 gaat in arbeid zitten en 245 gaat in warmte zitten
- 6 Els Ik begrijp hem, en dat moet hier afgekoeld worden
- 7 Bert Die 245W en dat moet afgekoe.. afgevoerd worden

Bert vindt dat '245' watt gekoeld moet worden (1). Hij bedoelt waarschijnlijk niet dat er zoveel vermogen aan warmte naar de omgeving afgevoerd moet worden, want die 245W 'gaat op aan warmte en wrijving' (1). Mogelijk komt hij door het tekenen van het energiestroomdiagram en het hardop lezen van de vraag (3) tot de ontdekking dat 'wrijvingsenergie' geen energiesoort is en dat gevraagd wordt hoeveel watt *afgevoerd* wordt. Dat zou de reden kunnen zijn waarom hij 'wrijving en warmte' in 5 samen neemt tot 'warmte' en '245W afkoelen' (zoals hij het zelf in 1 en Els in 6 formuleert) in 7 door '245W afvoeren' vervangt.

Els kan onderdeel f niet beantwoorden (2) misschien omdat ze denkt aan het deel van de 'nuttige' 255W (4) dat nodig is om te koelen. In 6 betreft ze, net als Bert, het afkoelen op de 245W maar (nog) niet op 'afvoeren'.

In §5.5 kwam naar voren dat leerlingen het denkbeeld gebruiken dat er meer energie aan een auto toegevoerd moet worden dan er door de auto aan de omgeving wordt

afgegeven als de auto een gelijke snelheid, temperatuur en hoogte houdt. Dat denkbeeld komt ook naar voren in verslagen over één van de 'experimenten' die de leerlingen bij onderwijsbeeld 3 moeten uitvoeren. In dat experiment moet het *rendement van een elektromotor* bepaald worden als die motor een blokje over een oppervlak met wrijving voorttrekt. Het blijkt voor leerlingen niet duidelijk te zijn dat de arbeid door de wrijvingskracht op het blokje niet het 'verlies' is, maar juist betrekking heeft op de gewenste taak. Slechts één van de vijf beschikbare leerlingverslagen noemt alléén de verliezen in de elektromotor. In de vier andere verslagen wordt ook 'wrijving(-senergie)' als verliespost opgegeven, bijvoorbeeld: "Warmte door wrijving van het blokje over de oppervlakte". Deze leerlingen vinden dus dat er zowel voor het bewegen (de gewenste taak) als voor 'wrijving' (= 'verlies') arbeid/energie nodig is. Dat is hetzelfde denkbeeld dat we bij Bert in protocol OB2-4 vonden. Bovendien beschouwen ze bij hun berekening van het rendement niet alleen de verliezen die in de elektromotor optreden, maar ook de verliezen die in andere delen van de situatie, in dit geval het blokje, optreden (vergelijkbaar met het meenemen van de 'verliezen' in de toe- en afvoerdraden van een 'verwarmingselement', zie §5.6.1).

5.6.3 onderwijsbeeld 3 in de context 'verwarmingsapparaten'

Een opgave bij onderwijsbeeld 3 betreft de vraag "waarom is het rendement van een elektrische kachel bijna 100%?" Die opgave is bedoeld om het begripsprobleem op te roepen dat het 'verlies' bij de omzetting van elektrische energie in warmte ook de productie van warmte betreft en dus ook bruikbaar is.

Protocol OB3-3 (klas 4-11, les 9)

Situatie: klassediscussie over de vraag waarom het rendement van een elektrische kachel bijna 100% is

- | | | |
|---|----------------|---|
| 1 | Koos | Het wordt niet omgezet in licht of zo en er is waarschijnlijk ook geen wrijving |
| 2 | L ₁ | Je kunt dus eigenlijk geen verliespost aangeven. Wat wou jij zeggen Bert? |
| 3 | Bert | Het energieverlies is eigenlijk warmte en warmte heb je net nodig bij die kachel, dus eigenlijk is alles wat die kachel uitstraalt bruikbare energie, dus ook het rendement of ook de eh .. verlies |
| 4 | L ₁ | Kun je nog iets noemen wat eigenlijk verloren gaat? |
| 5 | Koos | Het opwarmen van die kachel, en licht |
| 6 | L ₁ | Ja dat is goed |

Koos ziet twee mogelijke oorzaken van 'verlies': het omzetten in licht en 'wrijving' (1). Bert redeneert in 3 dat 'energieverlies' de productie van de energiesoort warmte betreft, die 'uitgestraald' wordt en dus ook bruikbaar is. Ondanks deze correcte redenering vraagt de leraar naar 'iets dat verloren gaat' (4). Bert reageert er niet op. Koos probeert nog eens 'licht' en noemt het 'opwarmen van de kachel', welk antwoord door de leraar wordt goedgekeurd.

Bij protocol OB3-2 concludeerden we dat Bert het inzicht gekregen had dat warmte (ook de 'ongewenste' warmte die in een boormachine ontstaat) aan de omgeving wordt afgegeven. We zien in protocol OB3-3 dat Bert dit inzicht in een andere context

correct kan gebruiken. Dat de leraar in 4 toch nog naar een verliespost blijft vragen, is begrijpelijk omdat de opgave die vraag suggereert: 'bijna 100%'. Dat doet afbreuk aan het uitstekende antwoord van Bert en zou door sommige leerlingen opgevat kunnen worden als bevestiging van het denkbeeld dat 'er voortdurend een beetje warmte opgaat aan het verwarmen [= op temperatuur houden] van de kachel zelf'.

5.6.4 onderwijsbeeld 3 in de context 'warmtemachines'

In het lesmateriaal worden warmtemachines beschreven als omzeters van een deel van de toegevoerde warmte in arbeid, waarbij de rest van de toegevoerde warmte bij lage temperatuur aan de omgeving wordt afgegeven. De formule voor 'maximaal theoretisch rendement' wordt gegeven.

begripsopbouw door de leraren

Leraar L₁ gaat dieper op warmtemachines in dan in de begripsopbouw bedoeld is. Hij probeert aan te geven waarom het rendement van een warmtemachine beperkt is. Hij legt daarbij problemen bloot die aan onze begripsopbouw kleven. Want bij zijn uitleg ontkomt hij er niet aan 'warmte' toe te kennen aan de verbrandingsgassen van een benzinemotor en aan het koelmiddel. Dat heeft hij nodig om duidelijk te maken wat bedoeld wordt met 'de warmte van een bepaalde temperatuur'. Bij het schrijven van het thema wisten we wel dat die zegswijze slechts een vage aanduiding is van iets dat we niet scherper aan leerlingen konden vertellen. Achteraf realiseren we ons dat dit vage begrip wel tot problemen moet leiden. Er is zelfs sprake van een *contradictio in terminis* in de uitdrukking 'warmte van een bepaalde temperatuur' omdat warmte in de natuurkunde staat voor energieoverdracht ten gevolge van een temperatuurverschil.

begripsontwikkeling bij leerlingen

De uitleg door de leraren lijkt over de hoofden van de leerlingen heen te gaan: ze reageren er nauwelijks op. Bij het maken van de opgaven beperken ze zich tot het invullen van de formule voor maximaal rendement en kunnen geen argumenten geven waarom de temperaturen daarin in kelvin moeten staan. Eén leerling geeft zelfs een argument waarom de temperatuur ook in graden celsius mag staan: "het gaat toch om temperatuurverschillen, dan maakt het niet uit". Maar het gaat niet alleen om temperatuurverschillen, ook om de temperatuur zelf ($\Delta T/T$).

Het wordt sommige leerlingen niet duidelijk dat het maximaal theoretisch rendement slechts betrekking heeft op warmtemachines. Zij gebruiken de bijbehorende formule ook om het rendement van bijvoorbeeld een verwarmingselement uit te rekenen. We concluderen dat dit deel van de begripsopbouw geheel mislukt is.

5.6.5 discussie en conclusies

Het idee achter onderwijsbeeld 3, dat energie tegelijkertijd verbruikt en opgewekt kan worden, lijkt voor leerlingen voor de hand te liggen als het gaat om situaties waarin de toegevoerde en de (gewenst) geproduceerde energiesoort herkenbaar zijn. In situaties waarin een apparaat warmte, licht of elektrische energie levert spreken

de leerlingen over toe- en afvoer van energie (als een 'iets'). In het geval dat er arbeid geleverd wordt ligt het voor leerlingen meer voor de hand om energie als een activiteit te zien en te benoemen als 'bewegingsenergie', 'boorenergie', 'wrijvingsenergie' en dergelijke. De voorstelling van 'energie als activiteit' is in overeenstemming met het (ongewenste) denkbeeld dat er (netto) energie nodig is om een voorwerp op snelheid te houden. Volgens leerlingen wordt niet alleen energie geleverd om de wrijving te 'overwinnen' (wrijvingsarbeid of 'wrijvingsenergie'), maar ook voor de 'activiteit' bewegen ('bewegingsenergie', het in beweging houden) zelf. In onze begripsopbouw hebben we die redenering willen voorkomen door bij bewegende apparaten de aandacht niet op de 'activiteit' bewegen, maar op de overdracht van energie door (uitwendige) arbeid te richten. Dat is niet gelukt. In de aangeboden situaties (zoals de boormachine) is onvoldoende duidelijk welk onderdeel de motor is die arbeid 'levert' en welk onderdeel arbeid 'ontvangt'. Situaties waarin de arbeid geleverd wordt om een ander apparaat aan te drijven, zoals het aandrijven van een dynamo, geven mogelijk minder begripsproblemen omdat de producent en de ontvanger van de arbeid dan onderscheiden apparaten zijn.

Alle leerlingen weten weliswaar dat een werkend apparaat warm wordt, maar ze ontwikkelen niet allemaal het inzicht dat een apparaat daarom ook warmte aan de omgeving afgeeft. Dat zou kunnen samenhangen met het denkbeeld dat een warm voorwerp 'vanzelf' afkoelt. Door de 'warmte' die tijdens het werken van het apparaat ontstaat warmt het apparaat aanvankelijk op. Het gaat dan ook 'vanzelf' afkoelen, zonder warmte aan de omgeving af te geven. Na verloop van tijd is alle warmte nodig om dat 'vanzelf afkoelen' te compenseren en blijft het apparaat op temperatuur. De leerlingen die wel over het 'afgeven van warmte aan de omgeving' spreken, hebben de gewenste begripsontwikkeling doorgemaakt en kunnen de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' gebruiken als het over apparaten gaat. Maar vanuit de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' is het onbegrijpelijk waarom niet alle toegevoerde (warmte-)energie in een 'ideale' warmtemachine nuttig gebruikt kan worden. Om te begrijpen dat dat niettemin toch het geval is, moet een abstracter energiebegrip gebruikt worden.

conclusies

1. De leraren hebben in grote lijnen de begripsopbouw in het lesmateriaal gevolgd.
2. De leerlingen hebben aan de hand van onderwijsbeeld 3 geleerd dat de aan een apparaat toegevoerde energie kan worden omgezet in een 'gewenste' energiesoort.
3. Sommige leerlingen hebben bovendien geleerd dat de 'verloren gegane' energie als warmte aan de omgeving wordt afgegeven. Zij hebben onderwijsbeeld 3, en daarmee de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets', in de context van apparaten leren gebruiken.
4. Andere leerlingen vinden dat de verloren gegane energie 'op gaat' aan wrijving en aan het warm worden/blijven van het apparaat en niet aan de omgeving wordt afgegeven. Deze leerlingen hebben het 'gewenste' begripsprobleem niet ontmoet of niet zoals bedoeld kunnen oplossen.

5. We vinden ook onverwachte begripsproblemen: over transport van elektrische energie (de verwarring tussen elektrische energie en elektrische stroom) en over 'op snelheid houden' (de activiteit bewegen, 'bewegingsenergie', als gewenste energiesoort en 'arbeid door de wrijvingskracht' als 'verlies').
6. Het gedeelte over warmtemachines functioneerde niet naar verwachting.

5.7 Het functioneren van onderwijsbeeld 4

Met onderwijsbeeld 4 ('energieopslag') wordt de opbouw van de conceptualisatie 'energie als een behouden bruikbaar iets' in het lesmateriaal afgerond. In onderwijsbeeld 4 worden vanuit de natuurkunde de 'Wet van behoud van energie' en vanuit de praktijk de wenselijkheid van energieopslag bij elektriciteitsproductie, vervoer en huisverwarming als kaders aangereikt om betekenis te geven aan 'opslag-energiesoorten'. De leraren besteden ongeveer 7 lessen aan de hoofdstukken waarin onderwijsbeeld 4 gebruikt wordt.

5.7.1 beginsituatie van leerlingen t.a.v. energieopslag

Sommige leerlingen vinden aanvankelijk dat je energie helemaal niet kunt opslaan, maar dat je 'elektriciteit' in een accu opslaat. Ook de leerlingen die vinden dat energieopslag wel mogelijk is hebben het alleen over opslag in accu's en batterijen. Als ze ingaan op de vraag wat precies wordt opgeslagen, hebben ook zij het echter over 'elektriciteit' of 'stroom':

"de elektriciteitsmaatschappijen slaan het gewoon op als ze teveel hebben in grote accu's. Daarin wordt stroom opgeslagen."

We vinden geen uitspraken waaruit naar voren komt dat de toestand van de accu verandert bij het opslaan van energie in een accu of het weer gebruiken van die energie. Het enige dat we opmerken is een vaag beeld van 'vol' of 'leeg' zijn van accu's. Sommige leerlingen weten ook nog dat opslag van elektriciteit/elektrische energie te maken heeft met 'spanning':

"Ik dacht dat elektriciteit alleen laag, zo rond 20 of 100 V opgeslagen kan worden."

We concluderen dat de kennis van leerlingen over 'opslagsystemen' beperkt is tot opslag van 'elektriciteit' in batterijen en accu's en dat de leerlingen met elkaar van mening verschillen over de vraag of dat ook al dan niet opslag van energie is.

5.7.2 onderwijsbeeld 4 in de context 'energieopslag in een spaarbekken'

In de context van energieopslag in waterspaarbekkens zegt onderwijsbeeld 4 dat het water evenveel arbeid levert als het door de turbines omlaag stroomt als er netto bij het omhoogpompen aan toegevoerd is. Daarom kun je zeggen dat er in het water een nuttig bruikbare energiesoort ('zwaarte-energie') in het water in het spaarbekken 'aanwezig' is. Het 'opslaan, bewaren en terugwinnen' van energie is weergegeven in een energiestroomdiagram (figuur 4-4, zie blz.102).

Bij de introductie van het begrip 'zwaarte-energie' aan de hand van figuur 4-4 komt Sita voor het 'gewenste begripsprobleem' te staan wat bedoeld wordt met: 'omhooggepompt water bevat energie'.

Protocol OB4-1 (klas 5-11, les 17)

L₁ legt zwaarte-energie uit aan de hand van de praktijksituatie 'het plan Lievense': windmolens wekken elektriciteit op en met die elektriciteit wordt water omhoog gepompt. We geven enkele kernzinnen uit zijn lange uitleg. De uitspraken van Sita hebben we onverkort opgenomen.

- 1 L₁ Die arbeid (door de pomp) gaat dus zitten in de zwaarte-energie van het water en nu zie je dat die zwaarte-energie in de figuur is aangegeven in een rechthoek. Daarmee geven we de opslag aan, want eigenlijk, op het moment dat het water omhoog gepompt is, is de energie voor het oog verdwenen, het water staat stil en pas als het water weer de gelegenheid krijgt naar beneden te stromen, dan zie je dat dat water energie bevat (legt figuur 4-4 verder uit)
Wat wou je vragen Sita?
- 2 Sita Nou, eh, de energie die het kost om dat omhoog te pompen, dat water, is die net, eh net zo groot als dat het water opwekt?
- 3 L₁ Ja
- 4 Sita Ja, maar dan hou je toch energie over, dan pomp je het omhoog en dan krijg je nieuwe energie en dan kan je opnieuw pompen
- 5 L₁ Het gaat er dus om dat de energie binnenkomt op een ongelegen moment. Het waait hard, maar het is bijvoorbeeld 's nachts en er wordt weinig energie gebruikt. Nou, dan gebruik je hem dus om water omhoog te pompen, dan ben je hem kwijt en overdag op een of ander pickuur dan laat je dat spaarbekken leeglopen en
- 6 Sita Oooh
- 7 L₁ dat betekent dat er op dat moment extra elektrische energie wordt opgewekt
(leraar geeft opdracht opgaven te maken)

In 1 zegt de leraar dat het omhooggepompte water 'onzichtbare energie bevat' die 'erin is gaan zitten' bij het omhoog pompen en 'zichtbaar wordt' bij het omlaag vallen.

Sita gaat in 2 na of ze de leraar goed begrepen heeft dat het water (bij omlaag vallen) net zoveel energie opwekt als er nodig is (en verbruikt, verdwenen is) voor het omhoog pompen. Als de leraar het daarmee eens is kan ze aangeven waarom ze de redenering van de leraar in 1 fout vindt. Als het water dan bovendien nog niet verbruikte 'energie bevat' kun je die gebruiken om het water verder omhoog te pompen (4). En dat kan niet volgens haar argument in 2.

De leraar legt in 5 en 7 uit dat hij dat niet bedoeld heeft. Hij heeft het daarbij over het 'kwijt zijn' van de energie na het omhoog pompen en het 'opwekken' van elektrische energie bij het leeglopen.

Sita combineert twee redeneringen met elkaar. De eerste redenering betreft het 'opwekken' van energie (2):

- bij het omhoogpompen wordt er energie 'verbruikt';
- bij het omlaag stromen door de waterkrachtcentrale wordt weer evenveel energie 'opgewekt' als er voor het omhoog pompen 'verbruikt' is.

Deze redenering sluit aan bij eerdere redeneringen van Sita over 'vanzelf verloopende processen', zoals afkoelen: daarbij ontstaat energie die aan de omgeving wordt afgegeven (zie bijvoorbeeld protocol OB2-2 en OB2-3). De tweede redenering (4) betreft 'opslag van energie', een begrip waarvoor binnen de eerste redenering geen plaats lijkt te zijn:

- bij het omhoogpompen wordt de toegevoerde energie 'verbruikt';
- je 'krijgt nieuwe energie' als het water omhoog gepompt is, namelijk de opgeslagen zwaarte-energie;
- deze energie kan gebruikt worden om het water verder omhoog te pompen.

Uit het laatste punt leiden we af dat er volgens Sita geen sprake is van zwaarte-energie vanwege de veranderde toestand van het water, maar als een soort 'extra' iets dat beschikbaar is om gebruikt te worden. Sita signaleert in 4 dat deze twee redeneringen met elkaar in tegenspraak zijn: als je de opgeslagen energie gebruikt om het water verder omhoog te pompen en het water daarna door de waterkrachtcentrale laat stromen, krijg je meer energie terug dan je er oorspronkelijk ingestopt hebt.

L_1 volgt in 5 de eerste redenering van Sita, maar 'vergeet' te noemen dat de 'verdwenen' energie nog aanwezig is vanwege de veranderde toestand van het water. Het is daarom de vraag of Sita in 6 begrijpt wat met 'opslag' bedoeld wordt of daar dat begrip maar weer weglaat.

Bij het maken van de opgaven over zwaarte-energie kwam er in geen van beide klassen een discussie op gang over het ontstaan, aanwezig zijn of verdwijnen van (zwaarte-)energie bij (veranderingen van) hoogte. Onze indruk is dat de opgaven niet tot productieve onderwijssituaties leiden omdat ze te gemakkelijk opgelost kunnen worden door het invullen van de formule $U_z = m \cdot g \cdot h$, zonder een expliciete betekenisgeving aan het begrip 'zwaarte-energie'.

Het experiment 'waterpomp' blijkt wél tot de gewenste discussies aanleiding te geven. De leerlingen moeten vooraf 'het rendement van de omzetting van elektrische energie naar zwaarte-energie' schatten en uitspreken of dit naar hun verwachting afhankelijk is van de 'opvoerhoogte'. Dan volgen de groepsgenoten van Sita, Mike en (vooral) Erik, een redenering die sterk lijkt op de betekenisgeving voor 'opslag' van warmte in het water van een centrale verwarming die we in §5.4 bij Duco (protocol OB1-2) en in §5.5 bij Joop (protocol OB2-3) vonden:

- bij het omhoog pompen wordt een deel van de toegevoerde energie 'verbruikt' en kan niet meer worden teruggewonnen;
- het andere deel wordt in het omhoog gepompte water opgeslagen zonder dat er sprake is van een zichtbare verandering van het water;
- de 'opgeslagen' energie komt weer beschikbaar als het water door de waterkrachtcentrale naar beneden stroomt.

Protocol OB4-2 (groep 5-11, les 22)

Situatie: discussie bij het experiment 'waterpomp' over de vraag of het rendement van de waterpomp afhangt van de opvoerhoogte.

- | | | |
|---|------|--|
| 1 | Mike | Hoe hoger, hoe lager het rendement (Erik stemt in) |
| 2 | Sita | Ja nee het rendement is natuurlijk groter |
| 3 | Erik | Nee, hij moet hier veel meer energie instoppen |

- 4 Sita Ja, maar je krijgt er veel meer energie uit natuurlijk
 5 Erik .. dus gaat meer energie verloren
 6 Sita Hoe meer je erin stopt hoe meer je er uit krijgt als het goed is
 7 Erik Ja maar we hebben het hier over de hoogte, hij wordt hier wel hoger
 8 Sita Nee als je het water hoger doet dan krijgen ze meer energie d'r uit,
 (Erik: nee) ja want als je het water hoger gooit, dan moet je er meer
 instoppen, dan hou je hetzelfde rendement
 9 Erik Nee want volgens mij als het hoger wordt moet je harder pompen, je
 pomp die gaat minder hard draaien, dus je rendement is lager
 (afleiding, later wordt de draad weer opgepakt en standpunten worden
 herhaald)
 10 Sita De verhouding blijft natuurlijk hetzelfde van wat je erin stopt en je eruit
 krijgt (twijfel bij de anderen)
 11 Sita Wat is dan rendement?
 12 Els Rendement is U_{in} min U_{uit}
 13 Erik Nee U_{in} gedeeld, nee U_{uit} gedeeld door U_{in} (Sita stemt in)
 14 Els Dat is helemaal niet waar
 15 Erik Ja want U_{uit} dit wordt wel langzamer, kijk het gaat wel hoger, zij [Sita]
 zegt: komt hetzelfde uit, maar duurt wel langer, pomp die moet nu meer
 arbeid om het omhoog te krijgen (afleiding)
 16 Erik Nu wordt meer energie gebruikt om toch hetzelfde te krijgen, hoger
 (ze worden het niet eens, maar gaan door over de verliezen en kijken
 daarvoor naar de omzettingen)
 17 Erik (leest voor uit de inleiding bij de proef) Elektrische energie wordt
 omgezet in arbeid, en dan in zwaarte-energie
 18 Sita Je zet die pomp aan, die gaat draaien, arbeid en dan krijg je van die
 andere energie, klotst omhoog van die eh hoe heet dat
 (discussie afgelopen)

Erik redeneert in 3, 5 en 7 dat het rendement lager wordt bij grotere hoogte omdat er meer energie aan het omhoog pompen 'verloren gaat'. Hij is het oneens met Sita dat er meer energie 'uit komt' als je het water hoger oppompt. Hij vindt dat er dan meer energie nodig is omdat je 'harder' moet pompen (9) waardoor het rendement afneemt (er blijft minder bruikbare energie 'over').

Als hij de formule voor rendement geeft, komt Erik voor het probleem te staan wat U_{uit} is (15). Hij beschouwt 'de arbeid om het omhoog te krijgen' niet als U_{uit} , maar als de 'gebruikte energie' en concludeert uit het feit dat het langer duurt 'om hetzelfde te krijgen' (=dezelfde hoeveelheid water omhoog te pompen) dat er meer energie verbruikt wordt.

Sita vindt aanvankelijk dat het rendement groter wordt (2) omdat je er meer energie uit krijgt (4). Met de energie die 'eruit komt' zou ze kunnen bedoelen de arbeid die de pomp levert. Gezien protocol OB4-1 en de rest van de discussie lijkt het ons waarschijnlijker dat ze het heeft over de energie die wordt opgewekt als het water (langs turbines) omlaag valt. Vervolgens (6, 8) gaat ze ook rekening houden met 'wat je erin stopt' waardoor ze concludeert dat het rendement hetzelfde blijft (8) omdat de verhouding tussen wat je 'erin stopt' en wat je 'eruit krijgt' hetzelfde blijft (10).

In 18 gaat Sita energiesoorten benoemen ('arbeid') maar de naam van 'die andere energie' kan ze niet vinden.

Opvallend in de redenering van Erik is dat hij niet ingaat op de vraag hoe de energie is opgeslagen en wat er gebeurt als het water valt. Sita lijkt daarentegen nu begrepen te hebben dat je inderdaad 'nieuwe energie krijgt' (18, zie ook protocol OB4-1, 4). Ze weet echter niet hoe die energie heet. Waarom gebruikt Sita de term 'zwaarte-energie' niet? Erik noemt die immers in 17. Het lijkt erop dat die term voor Sita een andere dan de gewenste betekenis heeft. Want de enige uitspraak, waarin zij tijdens het thema uit zichzelf de term 'zwaarte-energie' gebruikt, luidt:

Sita: Als je een kubieke meter naar beneden laat vallen, dan krijg je zoveel zwaarte-energie.

In deze uitspraak geeft zij 'zwaarte-energie' betekenis als de energie die 'je bij het vallen [beschikbaar] krijgt'. Deze betekenisgeving werd overigens vlak daarvoor (onbedoeld) door de leraar gesuggereerd:

L₁ Dit is de zwaarte-energie die ontstaat bij het naar beneden vallen.

Soortgelijke discussies als in groep 5-11 moeten zich ook in andere groepen hebben afgespeeld. Dat leiden we af uit zes groepsverslagen van klas 5-12 over de experimenten bij onderwijsbeeld 4. In twee van deze verslagen wordt waarschijnlijk het gewenste begrip zwaarte-energie gebruikt. Dat moge blijken uit het antwoord dat in één van beide groepen gegeven wordt:

"hoe hoger des te meer zwaarte-energie er ontstaat: $U_w = m.g.h$ "

In twee verslagen vinden we geen duidelijke antwoorden. Daarbij valt op dat de leerlingen niet kunnen beslissen of het rendement toe- dan wel afneemt met de hoogte.

In het derde tweetal verslagen vinden we de verwachting dat het rendement afneemt met de hoogte omdat het 'verlies' aan "het omhoog transporteren van water groot" is. In één verslag wordt dat als volgt gemotiveerd:

"hoe groter de opvoerhoogte, hoe meer moeite de waterpomp moet doen om het water op te voeren → lager rendement;
verliezen 60%: - omzetting elektrische energie naar zwaarte-energie 10%
- wrijving (in de motor) 50%"

Uit dit antwoord blijkt dat deze leerlingen de "omzetting" van elektrische energie naar zwaarte-energie "verlies" vinden. Dat leidt hen tot de conclusie dat de 'verliezen' groter zijn bij grotere opvoerhoogte en het rendement dus lager. Ook is te zien dat 40% van de toegevoerde energie niet als 'verlies' genoemd wordt en dus blijkbaar 'opgeslagen' wordt.

Uit antwoorden bij het eindproefwerk blijkt dat alle leerlingen hebben geleerd de formule van zwaarte-energie te gebruiken. Ongeveer de helft van de leerlingen blijkt te weten dat ze bij omhoog pompen van water moeten spreken van *verandering* van zwaarte-energie. We beschouwen dat als een aanwijzing dat zij zwaarte-energie betrekken op de plaats in het zwaartekrachtsveld. We concluderen dat ongeveer de helft van de leerlingen tijdens het thema een acceptabel zwaarte-energiebegrip heeft ontwikkeld.

5.7.3 onderwijsbeeld 4 in de context 'energieopslag bij voertuigen'

In de context van energieopslag bij voertuigen zegt onderwijsbeeld 4 dat er (netto) arbeid geleverd moet worden om een auto te versnellen en dat er netto evenveel arbeid/warmte afgevoerd moet worden om hem tot de oorspronkelijke snelheid af te remmen. De arbeid die de auto bij afremmen levert kan als rotatie-energie (in een vliegwiel) of als elektrochemische energie (in een accu) worden opgeslagen en later teruggewonnen.

Op blz.110 hebben we opgave EV5-4 overgenomen waarin de leerlingen de 'toename van de bewegingsenergie' moeten uitrekenen wanneer een auto versnelt van bijvoorbeeld 80 naar 100 km/h. De daar beschreven 'gewenste' begripsproblemen doen zich inderdaad voor. De meeste leerlingen uit de klassen 5-11 en 5-13 weten niet welke van de gegeven snelheden ze in de formule voor bewegingsenergie moeten invullen. Velen vullen het gemiddelde in. De leraren leggen uit waarom dat fout is: "je moet de bewegingsenergie die erin zit bij een bepaalde snelheid, uitrekenen en het verschil is dan de toename". De leerlingen leren dit 'kunstje' toepassen maar begrijpen het niet: "ik snap er niets van" en "welke snelheid moet je nu nemen?". Hieruit zien we dat het 'gewenste begripsprobleem' niet wordt opgelost. We vinden aanwijzingen dat leerlingen 'bewegingsenergie' toch de betekenis geven van 'de energie die nodig is om te bewegen' die we door onze begripsopbouw probeerden te voorkomen. Een voorbeeld: op de vraag waarom de toename van de bewegingsenergie van 80 naar 100 km/h groter is dan die van 60 naar 80 km/h geven leerlingen antwoorden als: "de tegenwerking is dan groter". Ze denken dus aan het energieverbruik bij rijden en niet aan de verandering van snelheid.

Sita brengt bewegingsenergie daarentegen in verband met zowel het 'verbruik' van arbeid bij optrekken als 'arbeid die eruit komt' bij afremmen. Dat lijkt veel op de redenering van energie gebruiken en opwekken die ze bij het omhoog pompen en laten vallen van water hield (zie protocol OB4-1).

In het eindproefwerk over het thema kwamen slechts 7 van de 44 leerlingen (16%) op het idee de verandering van kinetische energie van een tram te berekenen aan de hand van het verschil tussen de toegevoerde elektrische energie en de arbeid door de achterwaartse krachten die zij in eerdere onderdelen van de opgave berekend hadden. De meeste andere leerlingen namen de formule $U_k = \frac{1}{2}m.v^2$ en vulden er de eindsnelheid of de gemiddelde snelheid in, die ze op een andere manier hadden berekend.

We concluderen dat de meeste leerlingen aan het eind van het thema het begrip 'kinetische energie' als 'de energie van een rijdend voertuig vanwege zijn snelheid' nog niet ontwikkeld hebben. We kunnen begrijpen waarom dat begrip moeilijker is dan 'opslag van zwaarte-energie'. Want, anders dan in het geval van een spaarbekken, is het in de praktijk niet de bedoeling energie in een auto of tram 'op te slaan'. Daarom is het van belang veel (meer dan gedaan is) aandacht te besteden aan het 'opwekken' van arbeid/energie bij afremmen en deze hoeveelheid te vergelijken met de bij optrekken 'verbruikte' energie (vergelijk §5.5.3).

5.7.4 onderwijsbeeld 4 in de context 'opslag van zonne-energie'

Het is de bedoeling dat leerlingen betekenis geven aan de begrippen 'thermische energie' en 'chemische energie' in de context 'opslag van zonne-energie' in 'warmtemuren', in water en in smeltstoffen.

De leerlingen van groep 5-11 worstelen tot aan het eind van het thema met de vraag wat het verschil is tussen 'thermische energie' en warmte. Ze constateren bijvoorbeeld dat $c.m.\Delta T$ de formule is voor thermische energie en warmte. Ze veronderstellen dat er verschillende soorten 'warmte' zijn: chemische energie, kinetische energie en thermische energie. Ze vragen enkele malen aan de leraar wat het verschil is tussen thermische energie en warmte. De leraar antwoordt dat thermische energie 'de opgeslagen warmte' is, maar dat verheldert het verschil met warmte niet. Groep 5-11 vindt het "allemaal een beetje verwarrend".

In de context van opslag van zonne-energie komt ook het gebruik van smeltstoffen aan de orde. Veel leerlingen gebruiken dan de redenering dat de warmte die nodig is om de smeltstof in zijn vaste fase tot het smeltpunt te verwarmen 'verbruikt' wordt en niet kan worden teruggewonnen (vergelijk het denkbeeld over 'warmteverbruik' dat we in §5.3 en 5.4 vonden). Slechts de warmte die (zonder temperatuurverhoging) bij het smelten wordt 'opgeslagen' kan weer beschikbaar komen voor gebruik. Een smeltstof met een hogere smeltemperatuur kan volgens deze redenering met een lager 'rendement' gebruikt worden omdat er meer warmte/energie bij het opwarmen wordt 'verbruikt'.

Het eindproefwerk van het thema bevatte een opgave over opslag van zonne-energie in een smeltstof. Uit antwoorden blijkt dat een aantal leerlingen de formules $Q=c.m.\Delta T$ en $Q=\text{smeltwarmte}.m$ beide kennen. Zij hebben echter geen criterium om te kiezen welke van de twee ze in de opgave moeten gebruiken om de totale opgeslagen 'thermische energie' uit te rekenen.

Van de 44 leerlingen uit klas 4-11 en 4-12 zijn er slechts 6 (14%) die de opgave correct maken en beide formules gebruiken. Er zijn nog eens 6 leerlingen (14%), waaronder Sita en Els, die beide formules invullen maar ze niet bij elkaar optellen. De rest (72%) gebruikt één van beide formules, de meesten (55%) $Q = c.m.\Delta T$.

We concluderen dat het denkbeeld 'energie verbruiken voor temperatuurverhoging, energie opslaan bij constante temperatuur', die we aan het begin van het thema bij Duco vonden, aan het eind van het thema nog bij veel leerlingen aanwezig is. Dit denkbeeld lijkt in de context van 'energie/warmte opslaan in smeltstoffen' zelfs voor de hand te liggen.

We vinden bij smelten nog een ander denkbeeld. Er zijn leerlingen die zeggen dat er bij smelten energie 'verbruikt' wordt, en tegelijk van mening zijn dat er bij smelten 'energie vrij komt'. Zij vinden dat blijkbaar niet in tegenspraak met elkaar. Een leerling zegt het zo:

Bij het smelten van vaste stoffen komt energie extra vrij, er moet een rooster gebroken worden [eerder is gezegd dat zoiets energie kost] en dat levert extra energie

Watts (1983) vermeldt een uitspraak die hier op lijkt:

Keith: Well as it (ice) melts it will give off heat ... as the bonds break between the atoms ... and roll over each other ... the heat will be given off ... so it produces heat energy

Deze leerlingen vinden dat de moleculen bij het breken van de bindingen extra snelheid/warmte/energie krijgen (vergelijk het breken van een uitgerekt elastiekje). Zij zouden kunnen redeneren dat deze energie niet onmiddellijk, maar op een later, gewenst ogenblik wordt afgegeven: er is sprake van 'energieopslag' in de gesmolten stof. Zo'n soort denkbeeld komt naar voren in de toelichting van een leerling die in de genoemde proefwerkopgave over smeltstoffen de 'vrijgekomen' energie berekent met de smeltwarmte:

gesmolten paraffine heeft meer thermische energie dan vaste paraffine want bij smelten is die energie vrijgekomen

We concluderen dat veel leerlingen onverwachte begripsproblemen hebben met 'opslag van thermische energie' die voortkomen uit het idee dat er energie opgeslagen kan worden zonder temperatuurverhoging. Voor een belangrijk deel gaan die begripsproblemen terug op de problemen die we bij onderwijsbeeld 1 en 2 over warmte ontdekten.

5.7.5 discussie en conclusies

Onderwijsbeeld 4 biedt de voorstelling dat energie in bepaalde 'energieopslag-systemen' aanwezig kan zijn als een 'iets'. Rond dit beeld hebben we bij leerlingen globaal twee redeneringen gevonden.

De eerste is dat de toegevoerde energie wordt 'verbruikt' bij het veranderen van de toestand van het opslagsysteem en dat er weer evenveel energie wordt 'opgewekt' en afgegeven wanneer het opslagsysteem terugkeert in zijn oude toestand. Weliswaar weten de leerlingen dat het opslagsysteem in zijn nieuwe toestand de 'potentie' heeft om energie op te wekken, maar deze potentie zelf wordt nog niet herkend als een energiesoort.

De tweede redenering zegt dat een deel van de toegevoerde energie 'verbruikt' wordt om het opslagsysteem in een zodanige toestand te krijgen dat er energie in kan worden opgeslagen. Deze 'verbruikte' energie kan echter niet worden teruggewonnen omdat de terugkeer naar de oorspronkelijke toestand 'vanzelf' gaat. De rest van de toegevoerde energie wordt (ongebruikt) als een 'iets' opgeslagen en kan op een later tijdstip 'vrijkomen' voor gebruik. Deze redenering brengt aan het licht dat de leerlingen onvoldoende en vooral te weinig eenvoudige situaties krijgen aangeboden waarin zij een proces van terugkeer naar de 'natuurlijke' toestand (vallen, afkoelen, tot stilstand komen) expliciet met energie in verband moeten brengen.

conclusies

1. De leraren volgen de begripsopbouw in grote lijnen.
2. Er zijn leerlingen die de 'gewenste begripsproblemen' bij onderwijsbeeld 4 ontmoeten. Maar onderwijsbeeld 4 lijkt hen onvoldoende te helpen bij het vinden van oplossingen.

3. Er zijn andere leerlingen die een onverwacht begripsprobleem ontmoeten: ze zien 'energieverbruik' bij het 'opslaan' van energie niet als een omkeerbaar proces.
4. Onderwijsbeeld 4 leidt niet tot de beoogde productieve onderwijssituaties.

5.8 Terugblik op het thema

In deze paragraaf gaan we na hoe de leerlingen aan het eind van het thema terugblikken op hun begripsontwikkeling. Daarnaast besteden we aandacht aan de cijfers die bij de themaproefwerken behaald zijn. Tevens beschrijven we de reacties van de leraren L_1 en L_5 op het thema.

5.8.1 het functioneren van de 'terugblik'

De leerlingen blikten terug op het thema aan de hand van dezelfde opdracht waarmee zij tijdens de 'Oriëntatie' hun aanvankelijke denkbeelden naar voren hadden moeten brengen (zie §5.3). Die opdracht staat in de laatste paragraaf van het thema opnieuw afgedrukt. De leraren besteedden een half lesuur aan de hernieuwde behandeling van die opdracht.

Een terugblik op het aanvankelijk energiebegrip van de leerlingen bleek echter niet goed mogelijk door de manier waarop de discussie in de 'Oriëntatie' was verlopen. In hun schriften konden de leerlingen niet terugvinden welke denkbeelden zij aan het begin van het thema hadden gebruikt. Bovendien waren zijzelf en hun leraren zo vlak voor het eindproefwerk meer gericht op het zoeken naar eventuele reken- en redeneerfouten die het proefwerkcijfer kunnen beïnvloeden dan op nadenken over de vraag hoe hun energiebegrip in de loop van het thema was veranderd.

We concluderen dat de doelstelling van de 'terugblik op het thema' niet is gerealiseerd. Het houden van een discussie over denkbeelden aan het begin en het eind van een lessenserie is geen goede vorm om leerlingen met hun leraar te laten reflecteren op de begripsontwikkeling die ze hebben doorgemaakt.

5.8.2 evaluatie van het thema aan de hand van de themaproefwerken

In het voorafgaande hebben we op diverse plaatsen leerlingantwoorden op de themaproefwerken besproken. In tabel 5-2 worden de cijfers van de leerlingen van groep 4-11/5-11 voor deze proefwerken gegeven, evenals de gemiddelde cijfers van de 44 leerlingen waarvan beide proefwerken beschikbaar waren.

We zien dat de gemiddelde cijfers van groep 4-11 bij het eerste themaproefwerk en van groep 5-11 bij het tweede themaproefwerk dicht bij de groepsgemiddelden liggen. We zien ook dat de leerling die de 'beste' begripsontwikkeling doormaakte (Sita) het hoogste cijfer behaalde, terwijl de leerlingen met de meeste begripsproblemen (vooral Joop en in mindere mate Mike en Erik) het aanzienlijk minder goed doen.

Uit de analyse van de proefwerken krijgen we de indruk dat de begripsontwikkeling van ongeveer de helft van de 44 leerlingen vergelijkbaar is met die van Sita die min of meer parallel aan de begripsopbouw in het thema is verlopen.

Tabel 5-2: De proefwerkresultaten voor groep 4/5-11⁴⁾

	Sita	Els	Joop	Bert	Mike	Erik	gemiddeld cijfer	
							groep 4/5-11	groep van 44
1e themaproefwerk	8,7	7,9	4,1	6,9	–	–	6,8	7,2
2e themaproefwerk	7,5	7,2	–	–	5,5	5,8	6,5	6,8

5.8.3 terugblik op het thema door de leraren

In een nagesprek hebben we de twee leraren bij wie we audio-opnamen gemaakt hebben (L_1 en L_5) naar hun mening gevraagd over het thema 'Energievoorziening'. Hun opmerkingen hebben vooral betrekking op de plaats van onderwijsbeeld 4 in het thema.

Leraar L_1 zei dat hij in de loop van het thema beter ging begrijpen waarom er zo voorzichtig met kinetische energie, zwaarte-energie en dergelijke wordt omgesprongen. Hij had een aantal problemen bij leerlingen opgemerkt. 'Opslag' vonden de leerlingen bijvoorbeeld moeilijker dan hij verwachtte. Dat merkte hij onder andere aan het verwarren van stromings- en opslagenergiesoorten en uit het feit dat veel leerlingen niet wisten waarom de ene energiesoort een Δ in de formule heeft en de andere niet. Leraar L_1 meldde voorts dat de leerlingen niet zagen dat de 'Wet van behoud van energie' in de onderwijsbeelden 2 en 3 eigenlijk al uitgewerkt is voor verschillende situaties. Hij uitte kritiek op de introductie van kinetische energie in het thema. Deze vond hij onvoldoende als de leerlingen deze formule nog niet in een ander thema (bijvoorbeeld 'Verkeer') hadden gezien.

Leraar L_5 meldde daarentegen weinig begripsproblemen bij leerlingen te zijn tegengekomen. Hij heeft als kritiek dat het thema, met name het hoofdstuk rond onderwijsbeeld 4, onnodig uitgebreid is en dat de energiestroomdiagrammen onnodig ingewikkeld zijn. Hij vindt het verwarrend dat situaties die al eerder aan de orde zijn geweest in dat hoofdstuk weer terugkomen. Hij meldde dat zijn leerlingen van dat hoofdstuk zeiden dat 'makkelijke dingen moeilijk uitgelegd' worden. Dat er in zijn klas weinig begripsproblemen waren wordt niet door onze gegevens ondersteund.

Het verschil in het aantal begripsproblemen dat door de leraren wordt opgemerkt schrijven we toe aan het verschil in werkvorm die zij hebben gehanteerd. In de klas van L_1 moesten de leerlingen hun problemen met elkaar eerst proberen te formuleren, voordat de leraar naar hun groep toe kwam om uitleg te geven. Zo kreeg L_1 niet alleen (correcte of incorrecte) antwoorden te horen, maar ook de problemen waar leerlingen niet uitkwamen. Daarbij bleek hem rond onderwijsbeeld 4 dat de leerlingen begrepen als 'bewegingsenergie' en 'zwaarte-energie' anders hadden begrepen dan hij had bedoeld.

In de klas van L_5 was het vooral de leraar die vragen formuleerde. Op grond van

4. Joop en Bert maakten geen deel uit van groep 5-11; Mike en Erik maakten geen deel uit van groep 4-11. Daarom hebben we hun cijfer bij het tweede, respectievelijk het eerste themaproefwerk niet in de tabel opgenomen.

de leerlingantwoorden ging hij verder of gaf hij een extra uitleg. De leerlingen namen termen als 'zwaarte-energie' en 'bewegingsenergie' over en kregen veel minder de gelegenheid te expliciteren wat zij daaronder verstonden. Daarom leek het hen alsof deze begrippen opnieuw werden uitgelegd, terwijl ze die al kenden. Dat zij die opvatting in een andere betekenis dan bedoeld, werd hen (en de leraar) niet duidelijk.

5.9 Het functioneren van onderwijsbeeld 5

Onderwijsbeeld 5 ('de energievergelijking van een systeem') wordt uitgewerkt in het gereviseerde blok 'Arbeid en Energie'. In onderwijsbeeld 5 is energie een 'entiteit' die in een systeem aanwezig is vanwege de toestand van het systeem en die kan stromen van het ene systeem naar het andere. Door energieoverdracht van of naar het systeem en/of door inwendige energieomzettingen kan de toestand van het systeem veranderen, mits de energievergelijking van het systeem maar kloppend blijft.

Het functioneren van het blok hebben we onderzocht aan de hand van audio-opnamen van groep 5-11 en groep 5-12 (zie §5.2). Leraar L_1 besteedde in klas 5-11 24 lessen, leraar L_4 in klas 5-12 19 lessen aan het blok.

5.9.1 onderwijsbeeld 5 en de relatie tussen arbeid en bewegingsenergie

Onderwijsbeeld 5 wordt in het tweede blokhoofdstuk geïntroduceerd bij de behandeling van bewegingssituaties. Voor leerlingen die energie nog uitsluitend als iets bruikbaar zien willen we de vraag oproepen wat het verschil is tussen kinetische energie en arbeid. Een bijdrage aan de beantwoording van die vraag kan geleverd worden door de energievergelijking die voor de behandelde systemen de vorm heeft:

$$W_{\text{in}} - W_{\text{uit}} = \Delta U_{\text{kin}}.$$

We vinden bij aanvang van het blokonderwijs nog geen leerlingen die het hebben over 'de kinetische energie van een bewegend voorwerp'. De leerlingen van wie de begripsontwikkeling tijdens het thema min of meer als gewenst verliep gaan het tijdens de behandeling van het tweede blokhoofdstuk hebben over 'de kinetische energie'. Ze localiseren kinetische energie niet in het bewegende voorwerp zoals in onderwijsbeeld 5 gewenst is, maar zien het min of meer als een eigenschap van de situatie als geheel.

De eerste keer dat Sita het over de kinetische energie van een voorwerp heeft betreft het de situatie waarin een ijshockeypuck 'vanzelf' tot stilstand komt:

Sita: Door zijn kinetische energie schiet hij nog een eind door [wat is dat dan?] kinetische energie? Dat is de arbeid die hier in de hockeypuck zit

Volgens Sita maakt de kinetische energie dat de hockeypuck niet meteen tot stilstand komt: ze ziet kinetische energie als 'opgeslagen arbeid'.

Leerlingen die de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' nog niet tijdens het thema ontwikkeld hebben blijken situaties als die van de hockeypuck

vooral formeel aan te pakken. Zij leren de energievergelijking correct opstellen en invullen in situaties waarin sprake is van verandering van snelheid. Maar in complexe situaties, met name 'autorijden met constante snelheid', kunnen zij niet meer volstaan met puur formele redeneringen. Dan blijkt dat zij niet kunnen afzien van energie als iets 'bruikbaar'. Ze geven kinetische energie (of 'bewegingsenergie') betekenis als de energie die nodig is voor het bewegen. Dat komt niet alleen naar voren in situaties waarin een kwalitatieve redenering wordt gevraagd, maar ook bij het opstellen van een energievergelijking. We geven enkele voorbeelden:

- leerlingen blijven de leraar steeds weer vragen of ΔU_k nul is bij een beweging met constante snelheid. Hoewel ze de formulematige uitleg van de leraar lijken te kunnen volgen, komen ze bij een volgende opgave toch weer met dit probleem terug. Daaruit blijkt dat het begripsprobleem door de uitleg niet is weggenomen;
- bij het berekenen van de (verandering van de) kinetische energie bij optrekken of afremmen zijn er steeds weer leerlingen die zich afvragen of de gemiddelde waarde van de twee gegeven snelheden ingevuld moet worden in de formule $\frac{1}{2}m \cdot v^2$, een fout die ook in het thema werd gemaakt (zie §5.7.3).
- ook het denkbeeld dat er bij rijden met constante snelheid twee taken zijn waarvoor energie nodig is: het in beweging houden en het 'overwinnen' van de wrijvingskrachten (zie §5.5.2, protocol OB2-4, en §5.6.2) vinden we terug. Het komt tot uiting in de energievergelijking die een leerling opstelt voor een voorwerp dat met constante snelheid beweegt: " $W_{in} = \Delta U_{kin} + U_{wrijving}$ ", te vertalen als: de ingaande arbeid wordt gebruikt om te bewegen (ΔU_{kin} , de leerling weet niet wat er met de Δ bedoeld wordt) en om de wrijving te overwinnen ($U_{wrijving}$, de 'wrijvingsenergie').

We zien het een en ander als een aanwijzing dat er in de begripsopbouw van dit hoofdstuk ondanks alles te weinig aandacht is besteed aan (het opstellen van de energievergelijking in) situaties waarin een voorwerp 'vanzelf' tot stilstand komt. Daardoor wordt het idee dat kinetische energie in een bewegend voorwerp aanwezig is niet of onvoldoende ontwikkeld en blijven leerlingen het denkbeeld gebruiken dat bewegingsenergie de energie is die nodig is om te bewegen. Dat heeft tot gevolg dat het onderscheid tussen arbeid en kinetische energie onduidelijk blijft.

5.9.2 onderwijsbeeld 5 en de relatie tussen arbeid en potentiële energie

In het derde hoofdstuk van het blok wordt de term zwaarte-energie toegevoegd aan de termen arbeid en kinetische energie in de energievergelijking.

De leerlingen die het begrip 'kinetische energie' zoals gewenst hebben ontwikkeld, hebben geen moeite meer om 'zwaarte-energie' de gewenste betekenis te geven. De begripsproblemen die Sita had, bijvoorbeeld met het begrip 'zwaarte-energie' bij de behandeling van onderwijsbeeld 4 in het thema, zijn verdwenen. Reeds de eerste keer dat zij het tijdens het blok over 'zwaarte-energie' spreekt kan zij die term, samen met het Δ -teken, correct gebruiken. Sita is het bijvoorbeeld niet met Els eens dat een dalend gewicht 'zwaarte-energie krijgt' maar ze zegt: "de zwaarte-energie neemt toch af want hij gaat naar beneden".

In de andere proefgroep (groep 5-12) doet zich een dergelijke discussie voor

waarin echter gesproken wordt over 'hoogte-energie' in plaats van 'zwaarte-energie'. De term 'hoogte-energie' lijkt voor leerlingen productiever dan 'zwaarte-energie'. 'Hoogte-energie' verwijst naar de 'toestand' hoogte, terwijl leerlingen 'zwaarte-energie' eerder met de 'oorzaak' zwaartekracht lijken te associëren.

Het vergt ook veel van leerlingen als Sita om in complexe praktijksituaties af te zien van bruikbaarheid als wezenlijk kenmerk van energie. Het volgende protocol geeft daarvan een voorbeeld.

Protocol OB5-1 (klas 5-11, les 12 van het blok)

(over een discussievraag of er bij een watermolen "zwaarte-energie vrijkomt")

- | | | |
|----|----------------|---|
| 1 | Sita | Het wordt misschien omgezet, maar het komt toch niet vrij |
| 2 | L ₁ | Wat wordt er dan omgezet? |
| 3 | Sita | De zwaarte-energie wordt omgezet in bewegingsenergie |
| 4 | L ₁ | Bewegingsenergie waarvan? |
| 5 | Sita | Van het rad, of van het water nou ja |
| 6 | L ₁ | Dat zou betekenen dat de verandering van de zwaarte-energie van het water gelijk is aan ΔU_{kin} van het rad |
| 7 | Ans | Nee dat kan nooit, dat kun je toch niet met elkaar vergelijken
(de leraar legt uit dat de kinetische energie van het rad dan zou toenemen. De leerlingen zijn niet allemaal overtuigd) |
| 8 | L ₁ | Wat is het gevolg als U_k steeds toeneemt? |
| 9 | Sita | Dan gaat ie steeds sneller draaien |
| 10 | L ₁ | En is dat het geval? |
| 11 | LL'n | Nee, dat is niet waar |
| 12 | L ₁ | Dus uiteindelijk gaat het niet zitten in de toename van de bewegingsenergie van het rad, maar waar gaat het dan heen? |
| 13 | Els | Dat moet het rad aandrijven |
| 14 | Sita | Arbeidsenergie |

In de bediscussieerde uitspraak staat 'zwaarte-energie' voor energie die beschikbaar komt doordat water valt. Sita wijst er in 3 op dat de zwaarte-energie wordt omgezet zodat er 'bewegingsenergie' beschikbaar komt. De vraag van de leraar in 4 verrast haar: zij geeft in 5 wel een antwoord, maar daaruit blijkt dat ze niet zou weten aan welk voorwerp ze bewegingsenergie zou moeten toekennen: er bewegen zoveel dingen door het vallen van het water.

De leraar richt de aandacht op de bewegingsenergie van het rad en gaat praten over de snelheid van het rad. Sita neemt dat in 9 over en kan in 14 als alternatief voor het in 3 gehanteerde begrip 'bewegingsenergie' de term 'arbeidsenergie' noemen.

Leerlingen die het denkbeeld 'energie als werkingsvoorwaarde voor vallen' gebruiken leren weliswaar de begrippen kinetische energie en zwaarte-energie formeel toe te passen in eenvoudige valsituaties, maar in wat meer complexe praktijksituaties hebben ze daarmee veel meer moeite dan leerlingen zoals Sita. Een voorbeeld daarvan vinden we bij de groep van Sita, in een discussie over de vraag of er op een weggeworpen bal een kracht omhoog werkt. We zullen het protocol samenvatten en enkele belangrijke uitspraken citeren.

Erik: Je geeft een kracht mee aan die bal [...] anders kan ie nooit omhoog komen.

Sita merkt op dat de snelheid omhoog afneemt en is het daarom niet met Erik eens:

Sita: Daar hebben we nog nooit van gehoord: een kracht omhoog die zorgt voor het *afnemen* van de snelheid omhoog

Daarna richt de discussie zich op de omzetting van bewegingsenergie in zwaarte-energie. Volgens Erik vindt die plaats *in het hoogste punt*. We interpreteren dat als: de bal krijgt (bewegings-)energie 'mee'; die gebruikt hij om omhoog te bewegen en die is op in het hoogste punt; dan gaat de zwaartekracht werken: de bal krijgt (zwaarte-)energie die hij gebruikt om omlaag te bewegen (vergelijk wat Toos en Rian zeggen in protocol A-4, §3.7).

Els legt de relatie tussen de 'meegekregen bewegingsenergie' en de 'kracht die de bal meekrijgt':

Els: Is bewegingsenergie een kracht?

Sita: Volgens mij is er bij het opgooien kracht en dat wordt meteen omgezet in bewegingsenergie en als je hem dan loslaat dan neemt de bewegingsenergie langzaam af en wat [= het deel van de bewegingsenergie dat] afneemt, dat wordt omgezet in zwaarte-energie

Sita vindt dus dat er *tijdens* de beweging omhoog een omzetting van bewegingsenergie in zwaarte-energie plaats vindt. Opvallend is dat zij niet goed raad weet met de relatie tussen kracht en energie in het 'taakgedeelte' van de beweging: bij het weggoeien (de omzetting van kracht in bewegingsenergie).

Erik en Els zijn op zoek naar een oorzaak voor de 'gedwongen' beweging omhoog, een behoefte die voortkomt uit de aristoteliaanse zienswijze dat de afwijking van de 'natuurlijke' orde verklaard moet worden. Sita hanteert daarentegen een Newtoniaanse zienswijze: niet het omhoog gaan, maar het afnemen van de snelheid (de afwijking van de eenparige beweging) moet worden verklaard. Zij kan dat niet alleen met krachten, maar nu ook met energie.

Na dit gesprekje moet de leraar de andere leden van groep 5-11 er nog van overtuigen dat er geen kracht omhoog op de bal is. Zijn meest overtuigende argument is: "de bal kan tegen die tegenwerkende kracht in bewegen omdat hij energie heeft" (leerlingen reageren met "o ja"). Geloof in het 'hebben' van energie als de mogelijkheid om iets te doen maakt de aanwezigheid van een kracht omhoog overbodig.

Door dit soort discussies ontwikkelt het begrip energie in relatie tot valsituaties zich ook bij de andere leerlingen van de proefgroepen. De volgende situatie is daarvan een voorbeeld. Mike en Erik uit de groep van Sita gebruiken het denkbeeld 'bewegingsenergie is de energie nodig om te bewegen' bij een vraagstuk over het omhoog hijsen van een piano. Zij geven als energievergelijking voor de piano:

$$-W_{\text{verrijving}} = \Delta U_k + \Delta U_z$$

Ze kunnen ΔU_z correct interpreteren als de zwaarte-energie die de piano krijgt. De arbeid van de persoon die de piano omhoog trekt lijkt in deze vergelijking echter te ontbreken, maar dat is niet het geval: die persoon levert de 'bewegingsenergie' ΔU_k . Els vraagt aan Erik wat ΔU_k is en hij antwoordt: "dat is de bewegingsenergie" en

meteen daarna vraagt hij zich af of die niet nul is omdat de piano met constante snelheid omhoog getrokken wordt. Hij blijft onzeker over de betekenis van 'bewegings-energie' want hij informeert bij de leraar of hij het wel goed heeft. Het toevoegen van een arbeidsterm voor de arbeid van de persoon biedt hem een bevredigende oplossing voor zijn probleem.

We concluderen dat de begrippen 'zwaarte-energie' en 'kinetische energie' zich t.a.v. valsituaties bij de leerlingen in de loop van het blok in grote lijnen zoals gewenst ontwikkelen.

5.9.3 onderwijsbeeld 5 en de relatie tussen arbeid, warmte en moleculaire energie

In het vierde hoofdstuk van het blok wordt de 'energievergelijking' geschreven in de vorm van de Eerste Hoofdwet van de Thermodynamica waarbij 'warmte' als term aan de vergelijking wordt toegevoegd. De termen 'kinetische energie en potentiële energie' worden betrokken op moleculen en samengenomen in de term 'moleculaire energie'.

We vinden een aantal begripsproblemen die te maken hebben met de relatie tussen microscopische en macroscopische beschouwingen. We komen die met name tegen rond 'adiabatisch samenpersen van een gas' en 'faseveranderingen'.

De leerlingen worstelen tijdens de discussies over de Eerste Hoofdwet voortdurend met de vraag hoe de resultaten van formulematige redeneringen met behulp van de energievergelijking in overeenstemming gebracht kunnen worden met meer natuurkundige redeneringen, macroscopische dan wel microscopische.

"Ik krijg het goede antwoord er wel uit, maar ik begrijp niet hoe het precies zit"

We hebben enkele begripsproblemen gevonden die hiervoor verantwoordelijk kunnen zijn. De leerlingen verbazen zich er niet over dat de temperatuur daalt als een gas adiabatisch uitzet: het uitzetten gaat 'vanzelf' en afkoelen gaat ook 'vanzelf'. Maar dat een gas bij adiabatische compressie in temperatuur stijgt, vinden ze raar:

Erik Hoe kan het dat de temperatuur (bij adiabatisch samenpersen van een gas) omhoog gaat als je alleen maar arbeid hebt?

Els Ik dacht dat er geen ΔU_k [van de moleculen] was want er is geen warmte

Temperatuurverhoging beschouwen ze als een proces dat slechts door 'warmte' veroorzaakt kan worden. Als ze (bijvoorbeeld bij het induwen van een fietspomp) ervaren dat er inderdaad een temperatuurstijging optreedt bij het adiabatisch samenpersen van een gas, zoeken ze de verklaring in het ontstaan van warmte door 'wrijving' van de zuiger langs de cilinder. In het geval van een wrijvingsloos bewegende zuiger, waarin die verklaring niet mogelijk is, denken ze aan het wrijven van moleculen tegen elkaar. Arbeid kan volgens hen dus wel een temperatuurverhoging tot gevolg hebben, maar alleen via wrijving.

Er zijn ook leerlingen die moeite hebben met de relatie tussen temperatuurverhoging en de verkleining van het volume:

"Hoe kan dat nou [dat de temperatuur bij samenpersen stijgt] want die ruimte waarin ze [de moleculen] moeten bewegen wordt toch kleiner?"

Zij verwachten dat de temperatuur stijgt als het volume groter wordt omdat de moleculen dan 'meer bewegingsruimte' krijgen.

Sita uit groep 5-11 kan met behulp van de energievergelijking beredeneren dat de temperatuur toeneemt bij samenpersen. Ze gaat op zoek naar een meer voorstelbare verklaring voor de toename van de beweging/de snelheid van de moleculen want deze formulematige verklaring vindt ze niet voldoende. Zo'n verklaring vindt ze in de toename van de druk bij het samenpersen als oorzaak van de toename van de kinetische energie van de moleculen.

Sita: [De temperatuur neemt toe] "omdat je, denk ik, je pompt die dingen samen, dan gaan ze harder botsen" en later: "de druk wordt hoger dus ze gaan sneller bewegen."

Sita komt in problemen met deze relatie als ze bij het verwarmen van een gas bij constante druk concludeert dat de temperatuur gelijk blijft omdat de druk gelijk blijft. Haar begripsprobleem lijkt een stap dichterbij de oplossing te komen als de leraar een uitleg geeft in termen van *energietoevoer*:

Sita: Ik begrijp het, het is gewoon de arbeid, die wordt omgezet in warmte

We concluderen dat leerlingen naast een beschrijving met behulp van de 'energievergelijking' ook behoefte hebben aan een 'voorstelling' waaruit blijkt waarom adiabatisch samenpersen leidt tot temperatuurverhoging. Zo'n voorstelling kan gegeven worden in termen van toevoer en afvoer van energie (als een entiteit), van 'omzetting van arbeid in warmte' en ook in termen van de (verandering van) beweging van moleculen door botsingen met de naar binnen bewegende zuiger.

5.9.4 discussie en conclusies

Aan het begin van het blokonderwijs zijn er nog weinig leerlingen die vinden dat een voorwerp energie kan 'hebben' vanwege zijn toestand. De leerlingen die tijdens het thema de 'gewenste' begripsontwikkeling doormaken overwinnen tijdens het blokonderwijs al snel het begripsprobleem wat 'de energie is van ...'. De begripsproblemen die zij tegenkomen, betreffen met name de toepassing van de Eerste Hoofdwet op gassen. De leerlingen die tijdens het themaonderwijs nog niet kunnen afzien van energie als werkingsvoorwaarde ondervinden tijdens het blok veel begripsproblemen. Zij kunnen die gedeeltelijk oplossen door te vertrouwen op het redeneren via de energievergelijking. Dat lukt een aantal leerlingen in eenvoudige taaksituaties waarin de energievergelijking een standaard-vorm heeft. In niet-standaardsituaties schiet de formele aanpak te kort want dan is een kwalitatieve fysische redenering nodig om de energievergelijking correct op te schrijven. Dan vallen veel leerlingen echter terug op niet-natuurkundige denkbeelden, zoals het denkbeeld dat energie 'verbruikt' wordt. Het afzien van niet-natuurkundige denkbeelden lijkt voor leerlingen het beste te lukken in het geval dat er geen doelgerichte maar uitsluitend 'vanzelf verlopende' processen plaatsvinden, zoals bij vallen en tot stilstand komen. Door de afwezigheid van een doelgericht proces worden leerlingen gedwongen zich af te vragen of het 'vanzelf verlopende' proces soms met energie te maken heeft en waarom. Aan het

einde van het blok lijken alle leerlingen correcte natuurkundige antwoorden voor valsituaties te kunnen geven.

We hebben echter geen voorbeelden gevonden waaruit blijkt dat zich ook voor taaksituaties een begripsontwikkeling voordoet bij leerlingen die tijdens het themaonderwijs in hun begripsontwikkeling geblokkeerd werden. Het denkbeeld dat iets 'vanzelf' afkoelt of tot stilstand komt, dat, zoals in §5.5 gebleken is, nauw samenhangt met het 'verbruikdenkbeeld', is in taaksituaties over verwarmen en bewegen bij deze leerlingen dan ook niet weggenomen. We schrijven dat toe aan de complexiteit van taaksituaties: daarin spelen 'vanzelf verloperende' en 'doelgericht veroorzaakte' processen beide een rol en is het 'verbruikdenkbeeld' hecht verankerd.

We concluderen dat de begripsopbouw in het blok voor alle leerlingen succesvol is geweest wat betreft valsituaties en slechts gedeeltelijk is gelukt wat betreft situaties waarin sprake is van horizontale bewegingen of van uitzettende en inkrimpende gassen.

5.10 Discussie en conclusies van het tweede ronde protocolonderzoek

In deze paragraaf geven we een antwoord op de vraag in hoeverre hypothese 1 (zie blz.97) ondersteund wordt door de resultaten van het protocolonderzoek. Daarbij maken we onderscheid tussen twee groepen leerlingen.

Groep A bestaat uit proefleerlingen als Sita en Bert, die in de loop van het themaonderwijs de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' ontwikkelen.

Groep B bestaat uit proefleerlingen als Joop, Mike en Erik die tijdens het themaonderwijs blijven vasthouden aan het 'verbruik-denkbeeld', al dan niet aangevuld met het denkbeeld dat een deel van de verbruikte energie 'verloren' gaat ('verbruik-en-verliesdenkbeeld').

5.10.1 groep A

De leerlingen van 'groep A' gebruiken het *verbruikdenkbeeld* niet alleen in het geval dat apparaten aan het werk zijn, maar vinden ook dat stoffen of voorwerpen energie 'verbruiken' als ze omhoog gebracht, verwarmd of versneld worden. Op een zeker moment ontwikkelen ze daarbij het idee dat het 'verbruiken' van energie (op hetzelfde of op een later moment) gepaard gaat met het '(af)geven' van energie. Het '(af)geven' van energie heeft dan betrekking op de 'omgekeerde' processen: vallen, afkoelen, een lagere snelheid krijgen. In veel situaties treden beide soorten processen tegelijk op en 'compenseren' ze elkaar geheel of gedeeltelijk.

Onderwijsbeeld 1 ('energie gaat van bron naar ontvanger') sluit aan op de gedachtengang van groep A. De onderwijsbeelden 2 ('weglekken van energie') en 3 ('apparaten als energiezetters') bouwen daarop voort. In die onderwijsbeelden wordt energie betrokken op situaties waarin de hoeveelheid toegevoerde energie even groot is als de hoeveelheid energie die aan de omgeving afgegeven wordt. Aan de

hand daarvan ontwikkelen deze leerlingen de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets'.

Het 'gewenste' begripsprobleem van onderwijsbeeld 4 ('energieopslag') wordt niet tijdens het themaonderwijs, maar pas in de loop van het blokonderwijs opgelost. Onderwijsbeeld 4 is bedoeld om de aandacht te richten op de aanwezigheid van energie vanwege de *toestand* van een voorwerp. Leerlingen van groep A zijn het er mee eens dat er energie nodig is om een voorwerp een hogere plaats, temperatuur of snelheid te geven en dat er evenveel energie '(af)gegeven' wordt tijdens het proces waarbij het voorwerp weer in zijn begintoestand terugkeert. Maar de voorstelling van energie als een 'opgeslagen iets' uit onderwijsbeeld 4 geeft de (ongewenste) suggestie dat de aanwezigheid van energie niet te maken heeft met de toestand van het opslagsysteem. Daarom geeft dat onderwijsbeeld hen geen handreiking voor de oplossing van hun probleem. De meer abstracte conceptualisatie 'energie als een behouden entiteit' biedt hen wèl een oplossing: die brengt hen ertoe 'energiebehoud' ook toe te passen op processen waarin de toestand van een voorwerp verandert.

5.10.2 groep B

De leerlingen van groep B vinden dat alléén *gedwongen processen* met energie te maken hebben: processen waarvoor een 'dwang' van een mens of apparaat nodig is. Bij 'gedwongen' processen is sprake van 'energieverbruik' (verbruikdenkbeeld), ook al wordt er bij sommige processen bovendien energie 'geproduceerd' (bijvoorbeeld door een dynamo) of 'opgeslagen'. Ze vinden dat *natuurlijke processen*⁵⁾, die 'van-zelf' verlopen als de dwang stopt, niets met energie te maken hebben. Dat spoort niet met de vooronderstelling die in de onderwijsbeelden 1 en 2 aanwezig is, namelijk dat leerlingen wèl weten dat een afkoelend voorwerp warmte aan de omgeving afgeeft. Daardoor sluit de begripsopbouw in het lesmateriaal niet aan bij de denkwijze van groep B en doen de 'gewenste' begripsproblemen zich bij hen niet voor. In plaats daarvan vinden we onverwachte begripsproblemen en misverstanden tussen leerlingen en het onderwijs, bijvoorbeeld over 'opslag' van energie. Die problemen worden in de loop van het themaonderwijs niet opgelost. Voor een belangrijk deel worden ze zelfs niet gesignaleerd door de leraar.

Wat taaksituaties betreft is ook onderwijsbeeld 5 niet in staat gebleken genoemde begripsproblemen van groep B weg te nemen. Maar wat vallen betreft komen in het blok eenvoudige situaties aan de orde, zoals het wrijvingsloos vallen. Deze geven onder andere aanleiding tot het denkbeeld dat de 'activiteit' vallen energie is, hetgeen betekent dat er energie 'aanwezig' is zolang er snelheid is. Gecombineerd met het gebruik van de energievergelijking leidt dat tot het ontwikkelen van de begrippen zwaarte-energie en bewegingsenergie/kinetische energie. Wat valsituaties betreft heeft

5. Het onderscheid tussen *gedwongen* en *natuurlijke* processen gebruiken we in analogie met het aristotelianse onderscheid tussen de 'gedwongen' beweging van een voorwerp dat omhoog gaat en de 'natuurlijke' valbeweging (Dijksterhuis 1950).

de gewenste begripsontwikkeling zich tijdens het blokonderwijs dus voor een belangrijk deel wèl voorgedaan, zij het op een andere manier dan verwacht.

5.10.3 twee kernproblemen

Samenvattend komen we tot de formulering van twee kernproblemen in de begripsopbouw.

Het eerste kernprobleem is dat de begripsopbouw niet voorziet in de oplossing van het niet-verwachte begripsprobleem van groep B: waarom zouden 'natuurlijke' processen met energie te maken hebben? Leerlingen van groep B hebben dat begripsprobleem slechts voor valsituaties tijdens het blokonderwijs opgelost.

Leerlingen van groep A vinden een oplossing voor dat begripsprobleem door 'natuurlijke' processen niet op zich te beschouwen, maar in relatie tot de 'gedwongen' processen waarmee ze gepaard gaan of die eraan vooraf zijn gegaan. Bij vallen is dat het omhoog brengen. Bij afkoelen is dat het opwarmen van de omgeving. Het 'vanzelf' opwarmen van de omgeving wordt ook als 'gedwongen' proces herkend. Ze komen impliciet tot de regel dat 'natuurlijke' processen te maken hebben met het '(af)geven' van energie(soorten). Daarmee is de indeling in 'natuurlijk' en 'gedwongen' processen van betekenis veranderd en verzwakt.

Het tweede kernprobleem betreft het 'gewenste begripsprobleem' bij onderwijsbeeld 4: hoe kan het dat een voorwerp of systeem energie 'heeft'? Dat begripsprobleem treedt op bij leerlingen van groep A, maar blijkt aan de hand van onderwijsbeeld 4 niet goed oplosbaar.

De leerlingen van 'groep B' ontmoeten het 'gewenste begripsprobleem' van onderwijsbeeld 4 niet. Zij gebruiken immers het idee dat er energie aanwezig (of 'opgeslagen') kan zijn in een voorwerp, als iets "extra's", zodat geen relatie gelegd hoeft te worden met de toestand van het voorwerp.

5.10.4 conclusies

1. Voor de leerlingen van groep A hebben de 'gewenste' begripsproblemen zich inderdaad voorgedaan. De leerlingen van groep B hebben de 'gewenste' begripsproblemen slechts t.a.v. valsituaties in het blok ondervonden. T.a.v. taaksituaties zijn voor hen hoofdzakelijk niet-voorzien begripsproblemen opgetreden.
2. Voor groep A zijn de begripsproblemen in de loop van het onderwijs in grote lijnen zoals verwacht opgelost. Voor groep B zijn de 'gewenste' begripsproblemen t.a.v. valsituaties opgelost. De onverwachte begripsproblemen die zich t.a.v. taaksituaties bij groep B voordeden zijn niet opgelost.
3. De belangrijkste oorzaak van het gedeeltelijk falen van de begripsopbouw is geweest dat het themaonderwijs niet voorziet in de oplossing van het begripsprobleem dat voortkomt uit het ontbreken van een relatie tussen 'natuurlijke' processen en energie.
4. De begripsopbouw heeft, met uitzondering van onderwijsbeeld 4, voor de leerlingen van groep A redelijk voldaan.

De slotconclusie van het tweede ronde protocolonderzoek luidt dat hypothese 1 slechts ondersteund wordt wat betreft de leerlingen van groep A.

6 Het vragenlijstonderzoek

6.1 Inleiding en vraagstelling

In het kwantitatieve deelonderzoek ('vragenlijstonderzoek') wordt nagegaan in welke mate leerlingen het energiebegrip vóór en na het thema- en blokonderwijs kwalitatief wendbaar kunnen hanteren in allerlei probleemsituaties. Bovendien wordt onderzocht in welke mate leerlingen gebruik maken van bepaalde denkbeelden over energie. Bij dit deelonderzoek is een groter aantal leerlingen betrokken dan bij het protocolonderzoek. Het is in de tweede onderzoeksronde uitgevoerd, voorafgegaan door een beperkt en oriënterend bedoeld vragenlijstonderzoek in de eerste ronde. We hebben ermee een antwoord gezocht op onze tweede onderzoeksvraag:

2 In welke mate verandert de kwalitatieve wendbaarheid waarmee leerlingen het energiebegrip gebruiken tijdens het thema- respectievelijk het blokonderwijs?

Voor de evaluerende tweede ronde hebben we deze onderzoeksvraag toegespitst tot hypothese 2 (Van der Valk & Lijnse, 1988)¹⁾ die bestaat uit drie deelhypothesen.

Hypothese 2

- 2a Na afloop van het onderwijs met het thema zal de kwalitatieve wendbaarheid waarmee de leerlingen het energiebegrip kunnen hanteren, weliswaar sterk zijn toegenomen, maar nog hoofdzakelijk beperkt zijn tot praktijkgerichte probleemsituaties uit het contextgebied van het thema.*
- 2b Na afloop van het onderwijs met het blok zal de kwalitatieve wendbaarheid van het energiebegrip verder zijn toegenomen, nu vooral met betrekking tot algemene fysische probleemsituaties.*

Omdat het instrument dat in het oriënterende eerste vragenlijstonderzoek gebruikt werd voor een belangrijk deel overeenkomt met dat van het tweede ronde onderzoek, bestaat de mogelijkheid de resultaten van beide onderzoeksronden, zij het globaal en met de nodige voorzichtigheid, met elkaar te vergelijken. Dat heeft geleid tot het formuleren van een derde deelhypothese:

- 2c Zowel na het thema- als na het blokonderwijs zal de bereikte kwalitatieve wendbaarheid in de tweede ronde aanzienlijk beter zijn dan in de eerste ronde.*

1. Hypothese 1, geformuleerd op blz.97, heeft betrekking op het protocolonderzoek.

De leerlingen die aan het protocolonderzoek hebben deelgenomen maken ook deel uit van de onderzoeksgroepen van het vragenlijstonderzoek. De stand van hun begripsontwikkeling t.a.v. energie hebben we kunnen aflezen aan denkbeelden over energie die in de discussies naar voren kwamen. Het gebruik van niet-natuurkundige denkbeelden zal naar verwachting in belangrijke mate de kwalitatieve wendbaarheid van het energiebegrip van leerlingen bepalen. Dat biedt de mogelijkheid relaties te leggen tussen de resultaten van beide deelonderzoeken. Dit doel ligt besloten in onderzoeksvraag 3.

- 3 *In hoeverre kunnen de gemeten veranderingen in kwalitatieve wendbaarheid verklaard worden door verandering in het gebruik van denkbeelden door leerlingen en aldus in verband gebracht worden met de waargenomen begripsontwikkeling tijdens het onderwijs?*

In het vervolg van dit hoofdstuk beschrijven we de opzet van het onderzoek (§6.2), de operationalisatie van de onderzoeksvariabelen in een vragenlijst (§6.3), relevante gegevens over de deelnemende klassen (§6.4) en gegevens over de kwaliteit van de vragenlijst (§6.5). In §6.6 geven we de resultaten van het onderzoek naar kwalitatieve wendbaarheid voor het themaonderwijs (hypothese 2a) en het blokonderwijs (hypothese 2b) en vergelijken we de eerste en tweede ronde resultaten met elkaar (hypothese 2c). In §6.7 geven we de resultaten van het onderzoek naar het denkbeeldgebruik en leggen we de relatie tussen de resultaten van beide deelonderzoeken. In §6.8 discussiëren we tenslotte over de begripsontwikkeling die we t.a.v. energie met het onderwijs aan de hand van het oorspronkelijke en het gereviseerde lesmateriaal bereikt hebben en trekken we conclusies.

6.2 Opzet van het vragenlijstonderzoek

6.2.1 de onderzoeksvariabelen

In ons onderzoek hebben we ons beperkt tot het energiebegrip en tot een aspect van wendbaarheid, de *kwalitatieve wendbaarheid* waarmee leerlingen het energiebegrip beheersen. Kwalitatieve wendbaarheid hebben we in §1.4 omschreven als 'de mate waarin leerlingen correcte kwalitatieve redeneringen over energie kunnen herkennen en produceren'.

kwalitatieve wendbaarheid in twee componenten

Met het oog op de specifieke kenmerken van zowel het oorspronkelijke als het gereviseerde thema en blok hebben we twee componenten in de kwalitatieve wendbaarheid van het energiebegrip onderscheiden: die t.a.v. taaksituaties en die t.a.v. valsituaties (zie § 2.7).

De eerste component betreft de kwalitatieve wendbaarheid waarmee leerlingen het energiebegrip kunnen gebruiken in probleemsituaties rond het uitvoeren van een energievragende taak door apparaten ('taaksituaties'). 'Taaksituaties' komen in het thema uitgebreid aan de orde. Ze bepalen mede het praktijkgerichte karakter van het thema en ze worden in het blok als toepassingsituaties gebruikt. We veronderstellen

dat de kwalitatieve wendbaarheid t.a.v. 'taaksituaties' zal toenemen, het meest over de themaperiode.

Bij de tweede component gaat het om de kwalitatieve wendbaarheid waarmee leerlingen het energiebegrip kunnen gebruiken in meer algemeen fysieke probleemsituaties waarin de bruikbaarheid van energie geen rol hoeft te spelen. Dit soort situaties wordt vooral in het blok behandeld. We hebben ons beperkt tot de meest kenmerkende van deze probleemsituaties in het blok, namelijk 'valsituaties'. Ook in het thema komen situaties met verticale bewegingen aan de orde, maar dan gaat het om situaties die als 'taaksituaties' behandeld worden. Bijvoorbeeld vallend water dat een waterrad aandrijft. We verwachten dat de toename van de kwalitatieve wendbaarheid t.a.v. valsituaties zich vooral tijdens het blokonderwijs zal voordoen.

denkbeelden

In §1.1 hebben we *denkbeelden* over energie omschreven als 'ideeën en regels van leerlingen die van belang zijn voor het leren van het energiebegrip en die hun wortels (lijken te) hebben in het leefwerelddenken'. Er kan pas sprake zijn van een kwalitatief wendbaar energiebegrip als leerlingen afzien van niet-natuurkundige denkbeelden ten gunste van fysisch geëigende redeneringen²⁾.

In de literatuur (zie §2.5) vonden we als belangrijkste aanvankelijk denkbeeld voor taaksituaties de gedachte dat energie bij het uitvoeren van de taak 'verbruikt' wordt en daarna 'op' is ('verbruik-denkbeeld'). We beschouwen dit als het belangrijkste leefwerelddenken voor taaksituaties. Op grond van de nadruk die het begrip 'energieverlies' in het eerste ronde lesmateriaal kreeg, werd dit denkbeeld door een aanzienlijk aantal leerlingen ongewenst 'aangepast' tot een evenmin adequaat 'verbruik-en-verlies-denkbeeld'. Het lesmateriaal van de tweede ronde is erop gericht de vorming van dit verbruik-en-verlies-denkbeeld te voorkomen.

Voor valsituaties hebben we in de literatuur aanwijzingen gevonden voor twee niet-natuurkundige denkbeelden:

- vallen heeft niets met energie te maken;
- vallen heeft alléén met energie te maken vanwege de snelheid die het vallend voorwerp krijgt (het 'activity' framework van Watts).

We zullen het laatste aanduiden als het 'snelheidsdenken'. Het eerst genoemde denkbeeld hebben we beschouwd als het 'leefwereld-denkbeeld' voor valsituaties. In het eerste ronde protocolonderzoek merkten we op dat leerlingen dit denkbeeld weliswaar tijdens het onderwijs verlaten, maar andere ongewenste denkbeelden vormen: 'energie als werkingsvoorwaarde voor vallen' of 'energie als de activiteit bewegen'. Beide leggen de relatie tussen vallen en energie via de snelheid. Ze zijn in het vragenlijstonderzoek samengenomen in het 'snelheidsdenken'. Met het tweede ron-

2. We spreken van 'fysisch geëigende' en niet van 'correcte' redeneringen omdat we in het onderzoek naar denkbeelden gelet hebben op de globale redenering en afgezien hebben van eventuele kleine fouten in de redenering. Bij het bepalen van de wendbaarheidsscore is met die kleine redenerfouten wel rekening gehouden.

de lesmateriaal hebben we de vorming van deze denkbeelden proberen te voorkomen. In het vragenlijstonderzoek zijn we nagegaan in welke mate leerlingen de genoemde 'leefwereld-denkbelden' bij aanvang van het onderwijs gebruiken, of ze ervan gaan afzien gedurende het onderwijs en of ze in plaats daarvan een fysisch geeigende redenering gaan geven dan wel het ongewenste 'verlies-en-verbruik-denkbeeld', en/of het evenmin gewenste 'snelheidsdenkbeeld' gaan gebruiken.

6.2.2 keuze van instrument, onderzoeksgroepen en meetmomenten

Als instrument om 'kwalitatieve wendbaarheid van het energiebegrip' te meten hebben we een vragenlijst geconstrueerd. Deze bestaat uit een open deellijst (nodig om leerlingen kwalitatieve redeneringen over energie te laten produceren) en een gesloten deellijst (nodig om het herkennen van correcte kwalitatieve redeneringen over energie te meten).

De twee componenten van kwalitatieve wendbaarheid, die t.a.v. taaksituaties en die t.a.v. valsituaties, komen tot hun recht door in beide deellijsten items over taak- en valsituaties op te nemen. Uit de geproduceerde redeneringen over energie in de open deellijst is tevens het denkbeeldgebruik afgeleid.

Het vragenlijstonderzoek heeft betrekking op het thema- en het blokonderwijs. Dit onderwijs vond aan de meeste deelnemende scholen voor een deel in het vierde leerjaar VWO en voor een deel in het vijfde leerjaar plaats. Daarom omvatten de onderzoeksgroepen alleen de leerlingen die zowel het thema- als het blokonderwijs volgden. Dat zijn zij die van 4VWO naar 5VWO overgingen en natuurkunde in hun vakkenpakket kozen.

Het ontwerp van het vragenlijstonderzoek betreft twee opeenvolgende voortest-natest designs met alleen een experimentele groep.

Dit ontwerp kent vier meetmomenten; schematisch:

4VWO/5VWO		5VWO			
afname I	afname II	afname III		afname IV	
<i>voortest</i>	<i>natest</i>	<i>voortest</i>	<i>voortest</i>	<i>blok</i>	<i>natest</i>
thema	thema	blok	blok	periode	blok
	$\pm 1\frac{1}{2}$			$\pm 1\frac{1}{2}$	
	maand			maand	

- *afname I* bij aanvang van het thema-onderwijs. Deze valt ca. 2 maanden voor het eind van het vierde leerjaar of aan het begin van het vijfde leerjaar;
- *afname II* na de *themaperiode*: aan het einde van het thema-onderwijs, dat ca. anderhalve maand in beslag neemt;
- *afname III* aan het begin van het blokonderwijs, na de *tussenperiode* van anderhalve maand of meer, waarin geen energieonderwijs wordt gegeven. Dit meetmoment valt aan het einde van het eerste of het begin van het tweede trimester in 5VWO;

- *afname IV* na de 'blokperiode': aan het eind van het blokonderwijs dat ook ongeveer anderhalve maand duurt.

6.2.3 analyses m.b.t. de onderzoeksvragen

Om na te gaan of er een verband bestaat tussen de mate van kwalitatieve wendbaarheid en de meetmomenten hebben we een 'repeated measures analysis' (SPSS INC, 1986) uitgevoerd. Voor toetsing van de hypothesen over verschillen tussen voor- en nametingen hebben we gepaarde t-toetsen gebruikt. Gezien de omvang van de onderzoeksgroep is de 'power' van de gebruikte toetsen bij een significantieniveau van 0,05 voldoende (meer dan 0,80) om een effect van middelmatige grootte zichtbaar te maken (Cohen, 1977).

Ter bepaling van de samenhang tussen verschillende variabelen op één afnamemoment en van gelijksoortige variabelen op verschillende afnamemomenten hebben we productmoment-correlatiecoëfficiënten berekend.

De verschillen tussen de eerste en tweede ronde resultaten hebben we onderzocht met t-toetsen. Wat betreft denkbeelden beperken we ons tot het 'actieve' gebruik ervan. Dat wil zeggen de mate waarin leerlingen in eigen formuleringen blijf geven van het gebruik van denkbeelden. We zijn nagegaan welk deel van de leerlingen een denkbeeld bij een afname tenminste één maal gebruikte. Daarmee kregen we ook gegevens over de mate waarin leerlingen verschillende denkbeelden naast elkaar gebruikten.

6.2.4 analyses m.b.t. de kwaliteit van de gegevens en van de onderzoeksopzet

Om de inhoudelijke kwaliteit van het instrument te bepalen is de vragenlijst voorgelegd aan drie mensen die betrokken zijn bij het Project Bovenbouw Natuurkunde (PBN): een onderzoeker, een lesmateriaalontwikkelaar en een leraar. Zij kregen de vraag voorgelegd of het instrument 'kwalitatieve wendbaarheid waarmee leerlingen het energiebegrip beheersen' meet. Om een indruk te krijgen van de inhoudelijke kwaliteit van de verkregen gegevens hebben we enkele verwachtingen geformuleerd en getoetst. Op grond van de overweging dat een grote kwalitatieve wendbaarheid een gunstige invloed zal hebben op de leerprestaties tijdens het thema- en het blokonderwijs verwachtten we een samenhang tussen de gemeten kwalitatieve wendbaarheid en de gemiddelde thema- en blok-proefwerk cijfers. Deze samenhang zou dan van dezelfde orde van grootte moeten zijn als de samenhang tussen de genoemde gemiddelde cijfers onderling. Deze verwachting hebben we getoetst door de betreffende productmoment-correlatiecoëfficiënten te berekenen.

In de literatuur worden verschillen in leereffect tussen jongens en meisjes t.a.v. het schoolvak natuurkunde gesignaleerd. Meisjes behalen wat minder goede school- en examenresultaten voor natuurkunde dan jongens (Hondebrink, 1990). Als er verschillen in schoolresultaten tussen de meisjes en jongens van onze onderzoeksgroep zijn, blijkend uit verschillen in proefwerk cijfers die tijdens het onderzochte onderwijs behaald worden, mogen we gelijksoortige verschillen verwachten voor kwalitatieve wendbaarheid. Deze verwachting hebben we met t-toetsen onderzocht.

De factoren die de interne validiteit van het onderzoek, dat wil zeggen het uitsluiten van alternatieve verklaringen voor gemeten effecten (Swanborn, 1987), kunnen bedreigen zullen we kort bespreken. Daarbij beschrijven we de maatregelen die we hebben genomen om deze validiteit te bewaken.

- *testeffect*: een door herhaalde afname van een vragenlijst gemeten effect kan gedeeltelijk verklaard worden door te veronderstellen dat leerlingen zich de vragen nog kunnen herinneren of omdat zij gewend zijn geraakt aan de wijze van toetsing. In onze onderzoeksopzet is het optreden van een testeffect niet denkbeeldig. Als maatregel om het eventuele effect te verkleinen hebben we twee versies van één instrument om en om afgenomen. Bovendien is er een controle op het optreden van zo'n effect in het onderzoek uitgevoerd (zie blz.169).
- *omstandigheden*: een gemeten effect zou ook verklaard kunnen worden door bijzondere omstandigheden zoals 'meer lessen dan bedoeld' of het houden van een projectweek met als thema 'energie'. Om zulke bijzondere gebeurtenissen tijdens het onderwijs op te sporen hebben we de deelnemende leraren gevraagd een logboek van het onderwijs over het thema en het blok bij te houden.
- *autonome rijping*: een gemeten effect kan verklaard worden als een rijpingseffect dat ook zou plaatsvinden zonder het onderzochte onderwijs. Als indicatie voor het optreden van dit effect hebben we genomen een eventuele verandering in kwalitatieve wendbaarheid (vastgesteld met een gepaarde t-toets) over de periode (> 1½ maand) tussen het thema- en het blokonderwijs.
- *instrumentatie*: gevonden effecten zijn te verklaren door het gebruik van verschillende versies van het instrument. Om na te gaan of de twee instrumentversies die wij in het tweede ronde onderzoek gebruikt hebben, equivalent zijn, werden de versies vrij kort na elkaar aan dezelfde leerlingen voorgelegd. Aan de hand van kruistabellen hebben we nagegaan in welke mate de leerlingen bij equivalente items hetzelfde alternatief aankruisen.
- *uitval*: gemeten effecten kunnen verklaard worden door aan te nemen dat juist de groep die slecht presteert bij de metingen is uitgevallen. Wij hebben als onderzoeksgroep genomen de leerlingen die van 4VWO naar 5VWO overgaan en natuurkunde in hun vakkenpakket kiezen. Leerlingen uit deze groep die niet op alle vier de meetmomenten aanwezig waren, vormen de 'uitvalgroep'. Door met een t-toets de wendbaarheidsscore van deze uitvalgroep te vergelijken met die van de andere leerlingen hebben vastgesteld of er in dit onderzoek van een uitvaleffect sprake is.
- *selectie-effecten*: vergeleken groepen verschillen van elkaar op relevante achtergrondkenmerken. Selectie-effecten kunnen een rol spelen als we de resultaten van de eerste ronde met die van de tweede ronde vergelijken. Het vergelijken van de resultaten bij de aanvang van het energieonderwijs met een t-toets geeft ons inzicht in een eventueel verschil in beginsituatie. Verder hebben we deze onderzoeksgroepen met elkaar vergeleken wat betreft samenstelling naar sexe en wat betreft het rapportcijfer voor het vak natuurkunde, behaald voorafgaande aan het onderzochte onderwijs. Om een generalisatie van de onderzoeksresultaten te rechtvaardigen hebben we de leraren gevraagd naar hun oordeel over het niveau van de proefklassen ten opzichte van dat van andere jaargroepen.

6.3 Operationalisatie van de onderzoeksvariabelen

6.3.1 constructie van de vragenlijst

In het schooljaar 1986/1987 is een proef-vragenlijst geconstrueerd en voorgelegd aan twee groepen van drie leerlingen van school 1 die deze in discussie met elkaar hebben ingevuld. Deze discussie is op audioband opgenomen. De aldus geregistreerde leerlingantwoorden zijn geprotocolleerd. Na analyse van de protocollen is de vorm van de vragenlijst aangescherpt en is de omvang ingekort, zodat de vragenlijst binnen een lesuur ingevuld kan worden. Verder zijn formuleringen bijgesteld. De herziene vragenlijst is op school 1 afgenomen en aan deskundigen voorgelegd. Analyse van de antwoorden en commentaar van de deskundigen gaven opnieuw aanleiding tot bijstellingen. Het instrument dat aldus ontstond is opgebouwd uit twee deellijsten: een deellijst met half-open items ('open deellijst') en een deellijst met gesloten items ('gesloten deellijst'). Beide deellijsten bevatten items over taaksituaties en over valsituaties. Omdat het onderzoek zich aanvankelijk ook op het begrip arbeid richtte, zijn ook items over arbeid opgenomen. De omvang van het onderzoek dwong ons na verloop van tijd tot een beperking tot het energiebegrip. De items over arbeid laten we daarom in de verdere beschrijvingen buiten beschouwing.

Van de open deellijst werden twee equivalent veronderstelde versies geconstrueerd: items met dezelfde fysische kern en gelijksoortige afleiders, die geplaatst zijn in een andere, verwante praktijkcontext.

De resultaten van het eerste ronde onderzoek, verkregen aan school 2, leerden ons dat sommige gelijkwaardig veronderstelde half-open items door leerlingen niet als zodanig werden opgevat. Dit resultaat gaf aanleiding om de tweede ronde vragenlijsten op enkele punten bij te stellen. De vragenlijsten uit de eerste ronde zijn opgenomen in ons interimrapport aan SVO (Van der Valk e.a., 1988). De tweede ronde vragenlijsten zijn in dit proefschrift als bijlage 5 opgenomen.

Vier items³⁾ uit de vragenlijst bleken een negatief effect te hebben op de interne consistentie en zijn in de analyse buiten beschouwing gelaten. De analyses hebben daarom betrekking op 17 items. Tabel 6-1 geeft een overzicht van de variabelen en de aantallen open en gesloten items die daarop betrekking hebben.

De zes open items gebruikten we ook om het 'actieve' gebruik van denkbeelden te bepalen. Bij de constructie van de gesloten items zijn we weliswaar uitgegaan van denkbeelden die leerlingen kunnen gebruiken, maar de aangekruiste alternatieven geven geen uitsluitsel over het denkbeeld dat de leerlingen feitelijk gebruikt hebben. Daarom betrekken we de gesloten items niet in het onderzoek naar het denkbeeldgebruik.

3. Dit betrof de items 7, 11B, 13A en 14B (zie bijlage 5 voor de vragenlijst). Het feit dat deze items een negatief effect hebben op de interne consistentie kunnen we achteraf begrijpen op grond van hun inhoud. Leerlingen kunnen bijvoorbeeld onafhankelijk van hun energiebegrip het idee hebben 'er is altijd wrijving' (item 11B).

Tabel 6-1: Overzicht van de variabelen en de aantallen open en gesloten items die daarop betrekking hebben

variabele	aantal items		totaal
	open	gesloten	
kwalitatieve wendbaarheid	6	11	17
opgesplitst in:			
kwal. wendbaarheid t.a.v. taaksituaties	3	7	
kwal. wendbaarheid t.a.v. valsituaties	3	4	

6.3.2 beschrijving van de vragenlijst

de open deellijst

De open deellijst (A-lijst genoemd) meet het aspect van de kwalitatieve wendbaarheid dat betrekking heeft op het produceren van een redenering met het energiebegrip. Elk open item bestaat uit een stam met de beschrijving van de probleemsituatie, een vraagstelling, drie alternatieven en een ruimte om de keuze van het alternatief te motiveren. In figuur 6-1 is één van A-items weergegeven.

6. Vallend stukje kalk

Op een bovenéage zet iemand een zwaar voorwerp hardhandig neer. Hierdoor raakt uit het plafond van de kamer eronder een stukje kalk los. De snelheid van het stukje kalk is na één meter vallen constant geworden.

Gedurende welk deel van zijn val krijgt het stukje kalk energie?

a. *Kruis aan:*

- [1] Gedurende de eerste meter van zijn val;
- [2] Gedurende zijn gehele val;
- [3] Het stukje kalk krijgt er geen energie bij.

b. *Motiveer je antwoord onder a.*

Figuur 6-1: Het open item 6 uit de vragenlijst. Het equivalente item betreft een vrijwel identieke formulering van vraagstelling en alternatieven waarbij het stukje kalk is vervangen door een stukje roest dat uit een spoorbrug losraakt als er een trein over rijdt.

De alternatieven van een open item spelen in op mogelijke denkbeelden van leerlingen over de betreffende situatie. In het afgebeelde item 6 bijvoorbeeld is alternatief [1] een afleider waarin het denkbeeld is verwerkt dat een vallend voorwerp energie krijgt als het meer snelheid krijgt. Alternatief [2] is een afleider waarin een denkbeeld verwerkt zit dat een vallend voorwerp energie krijgt voor het op snelheid houden.

Voor (het correcte) alternatief [3] moet een leerling weten dat bij vallen de kinetische energie van een voorwerp wel toeneemt, maar dat de potentiële energie (minstens) evenveel afneemt. Na het aankruisen van een alternatief moet de leerlingen een tweede antwoord geven: een motivering bij het aangekruiste alternatief.

het toekennen van waarden m.b.t. wendbaarheid

Op grond van het aangekruiste alternatief en de daarbij gegeven motivering is een A-itemscore toegekend, die de waarde 1, 2 of 3 kan hebben. A-itemscore 3 is toegekend aan antwoorden die fysisch juist zijn: het juiste alternatief en een correcte motivering. A-itemscore 2 is toegekend aan antwoorden die bestaan uit een motivering die, gezien het aangekruiste (al dan niet correcte) alternatief, naast incorrecte ook fysisch correcte elementen bevat. In de andere gevallen, waarbij één of meer alternatieven zijn aangekruist of de motivering ontbreekt, is de waarde van de A-itemscore 1. Als er geen alternatief is aangekruist en geen motivering is gegeven is het antwoord als 'ontbrekend' gecodeerd. Het toekennen van waarden is uitgevoerd door twee beoordelaars onafhankelijk van elkaar. Waar de oordelen van elkaar afweken overlegden de beoordelaars met elkaar tot consensus werd bereikt.

het coderen van door leerlingen gebruikte denkbeelden

De gegeven motivering werd, in combinatie met het aangekruiste alternatief, door twee beoordelaars, volgens de procedure zoals bij het toekennen van een waarde voor de wendbaarheid is gevolgd, beoordeeld op de vraag in hoeverre de leerlingen gebruik maakten van een denkbeeld. Daartoe zijn categorieën opgesteld die we hier kort aangeven.

Algemene categorieën voor zowel de taak-items als de val-items zijn:

- een fysisch geëigende redenering die al dan niet correct wordt toegepast ('fysisch');
- het antwoord is niet categoriseerbaar;
- het antwoord of de motivering ontbreekt.

Verder werden voor de taak-items de categorieën 'verbruik' en 'verbruik/verlies'⁴⁾ gebruikt, overeenkomend met de gelijknamige denkbeelden. Deze waren toereikend om de antwoorden op de items in onder te brengen. Ook voor de val-items waren twee categorieën voldoende: 'geen energie' en 'snelheid'. Behalve de (schaarse) gevallen waarin leerlingen expliciet zeggen dat vallen niets met energie te maken heeft, zijn in de categorie 'geen energie' ook antwoorden ondergebracht waarin het verband tussen vallen en energie eenvoudig niet wordt gelegd. In plaats daarvan kan er een relatie zijn gelegd met andere grootheden, bijvoorbeeld met 'zwaartekracht'.

4. Op grond van de eerste ronde resultaten hebben we geprobeerd onderscheid te maken tussen 'verlies' waarbij sprake is van het afgeven van energie aan de omgeving en 'verlies' waarbij de verloren gegane energie 'op gaat' of 'verdwijnt'. Het bleek niet mogelijk criteria op te stellen waarover de twee beoordelaars het eens konden worden voor deze indeling.

In de categorie 'snelheid' vallen antwoorden waarin de relatie tussen vallen en energie via snelheid wordt gelegd⁵⁾.

Voorbeelden van de toekening van een waarde voor de kwalitatieve wendbaarheid en van de codering van denkbeelden bij item 6 (zie figuur 6-2):

- categorie 'fysisch':

alternatief [3] aangekruist met motivering "Hij had al zwaarte-energie": A-itemscore 3 toegekend;

alternatief [1] aangekruist met motivering " $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}m \cdot v^2$, v neemt toe": A-itemscore 2 toegekend;

- categorie 'snelheid':

alternatief [2] aangekruist met motivering "hij krijgt gedurende zijn hele val energie want als het beweegt krijgt het bewegingsenergie en dus niet alleen tijdens het versnellen": A-itemscore 1 toegekend;

alternatief [1] aangekruist met motivering "daar wordt de snelheid en dus de energie die daarvoor nodig is groter": A-itemscore 1 toegekend;

- categorie 'geen energie':

alternatief [3] aangekruist met motivering "het stukje kalk krijgt energie om los te komen, verder zorgt de zwaartekracht voor de snelheid": A-itemscore 1 toegekend.

alternatief [1] aangekruist met de motivering "het stukje kalk krijgt energie van het neerzetten": A-itemscore 1 toegekend.

de gesloten deellijst

De gesloten deellijst meet het aspect van de kwalitatieve wendbaarheid dat betrekking heeft op het beoordelen van de fysische correctheid van aangeboden redeneringen. De gesloten items hebben alle dezelfde vorm: bij een stam waarin de probleemsituatie beschreven wordt staan twee natuurkundige (of natuurkundig getinte) uitspraken die op hun juistheid beoordeeld moeten worden. Als voorbeeld hebben we twee items opgenomen: de items 17a en 17b.

De leerlingen moeten van deze uitspraken aangeven of ze die (on)juist vinden en ook hoe zeker ze van hun oordeel zijn. Door 'zeker/onzeker' op te nemen kan uit vier alternatieven gekozen worden. Dat heeft de bedoeling om in elk geval een antwoord te ontlocken, ook al zijn de leerlingen niet zeker van de juistheid ervan. Om tegemoet te komen aan leerlingen die de uitspraak om één of andere reden niet kunnen beoordelen hebben we nog een vijfde antwoordmogelijkheid opgenomen: het alternatief 'weet ik niet'. Naar verwacht zal dit alternatief hoofdzakelijk worden gekozen op het meetmoment voorafgaande aan het onderwijs en wel door leerlingen die de uitspraak niet begrijpen, bijvoorbeeld omdat ze gebruikte termen nog niet kennen.

5. Naar aanleiding van de denkbeelden die we in het eerste ronde onderzoek vonden, hebben we binnen deze categorie onderscheid proberen te maken tussen de denkbeelden 'energie als werkingsvoorwaarde voor vallen' en 'energie als de activiteit bewegen'. We slaagden er onvoldoende in scherpe criteria te vinden waarover de beoordelaars het eens konden worden voor dit onderscheid.

17. Water opwarmen

De volgende uitspraken gaan over 1 kg water die van een temperatuur van 20°C naar 21°C wordt opgewarmd. Hiervoor moet 4180J warmte worden toegevoerd.

- a. 1 kg water van 21°C heeft 4180 J thermische energie meer dan 1 kg water van 20°C. [1] [2] [3] [4] [5]
- b. 1 kg water van 21°C kan 4180 J warmte leveren als het wordt afgekoeld tot 20°C [1] [2] [3] [4] [5]

zeker juist
juist, denk ik
weet ik niet
onjuist, denk ik
zeker onjuist

Figuur 6-2: Twee items uit de gesloten deellijst. Ze hebben de stam gemeenschappelijk.

Verondersteld wordt dat de uitspraken van de gesloten items incorrect worden beoordeeld door leerlingen die van een niet-natuurkundig denkbeeld gebruik maken. Bij de (juiste) uitspraak 17a kan het denkbeeld dat warmte 'verbruikt' wordt en dus verdwijnt als het water wordt opgewarmd, tot de (incorrecte) beoordeling leiden dat de uitspraak onjuist is. Bij de (juiste) uitspraak 17b kan het idee dat er altijd energie op gaat aan 'verlies' tot een onjuiste beoordeling leiden.

het toekennen van waarden m.b.t. wendbaarheid

Aan het antwoord op een gesloten item ('B-item') is een B-itemscore toegekend.

- de B-itemscore is 2 als met kleine (alternatief 2 danwel 4 in figuur 6-2) of grote (alternatief 1 danwel 5) zekerheid de uitspraak correct wordt beoordeeld;
- de B-itemscore is 1 als de uitspraak incorrect wordt beoordeeld of als het alternatief 3 ('ik weet het niet') wordt aangekruist.

Als er geen alternatief is aangekruist, is het antwoord als ontbrekend gecodeerd.

Voorbeeld: scoring van item 17a.

Uitspraak 17a is fysisch juist. De B-itemscore is dus 2 als de alternatieven 1 of 2 aangekruist worden. De B-itemscore is 1 als de alternatieven 3, 4 of 5 aangekruist worden.

6.3.3 berekening van waarden voor de variabelen

De waarde voor de kwalitatieve wendbaarheid (WEND) van een leerling op een afnamemoment hebben we vastgesteld aan de hand van de gemiddelde A- en B-itemscores.

De gemiddelde waarde van de A-itemscores (AWEND)⁶⁾ van een leerling op één afnamemoment kan lopen van 1 tot en met 3. De gemiddelde waarde van de B-item-

6. In formulevorm: $AWEND = \text{som A-itemscore} / \text{aantal A-items}$.

scores (BWEND)⁷⁾ van een leerling op één afnamemoment kan lopen van 1 tot en met 2. We hebben deze waarde omgerekend naar een waarde die van 1 tot en met 3 loopt, zoals ook bij AWEND het geval is.

Bij het bepalen van AWEND en BWEND hebben we de ontbrekende antwoorden niet meegenomen. Ontbreekt de helft of meer van de antwoorden, dan is aan AWEND respectievelijk BWEND de code voor ontbrekend toegekend.

De waarde voor de kwalitatieve wendbaarheid (WEND)⁸⁾ hebben we vastgesteld als de helft van de som van AWEND en BWEND. We hebben de code voor ontbrekend toegekend als de waarde van tenminste één van beide ontbreekt.

De waarde voor de kwalitatieve wendbaarheid t.a.v. taaksituaties TAAKWEND is de bijdrage aan WEND van de taakitems, omgerekend naar de schaal van 1 tot en met 3. Evenzo is de waarde van VALWEND de bijdrage van de valitemen aan WEND.

6.4 Gegevens van de deelnemende klassen

De vragenlijst is in nagenoeg alle klassen afgenomen die in het schooljaar 1987/1988 met het gereviseerde thema en/of in 1988/1989 met het gereviseerde lesmateriaal werkten. Tabel 6-2 geeft een overzicht van deze klassen.

De scholen 1, 2, 3, 4 en 6 werkten in de bovenbouw VWO overwegend met PLON-materiaal, school 5 deed dat incidenteel. De scholen 1, 2 en 6 werkten bovendien ook in de onderbouw met PLON-materiaal. De andere scholen gebruikten in de onderbouw andere methoden.

De vragenlijsten die aan de leerlingen werden uitgereikt bestonden uit twee losse delen, de open deellijst (de A-lijst) en de gesloten deellijst (de B-lijst). De vragenlijsten werden onder leiding van de leraar op naam afgenomen tijdens de natuurkundeles op de vier in tabel 6-2 vermelde tijdstippen. Elke afname nam één lesuur in beslag. Eerst werd de A-lijst uitgereikt. Na inleveren bij de leraar kregen de leerlingen de B-lijst ter invulling overhandigd. De leerlingen werd gevraagd de vragenlijsten individueel in te vullen, hetgeen, zo meldden de leraren, in grote lijnen gebeurde.

Naast de vragenlijstgegevens werden gegevens verzameld over sexe, rapportcijfers voor het vak natuurkunde en de resultaten van de leerlingen bij de proefwerken die betrekking hebben op het bedoelde onderwijs.

Totaal hebben 123 leerlingen van de scholen 1, 3 en 4 op één of meer afnamemomenten een vragenlijst ingevuld. 71 leerlingen uit die groep vulden zowel in 4VWO als in 5VWO de vragenlijsten in: zij kozen natuurkunde in hun vakkenpakket. Deze groep zullen we de *onderzoeksgroep* noemen. Daarvan hebben 55 leerlingen op alle vier afnamemomenten een vragenlijst ingevuld. De andere 16 leerlingen, die tenminste één afnamemoment gemist hebben, vormen de 'uitvalgroep'. De analyses m.b.t.

7. In formulevorm: $BWEND = 2 \cdot (\text{som B-itemscores} / \text{aantal B-items}) - 1$.

8. In formulevorm: $WEND = \frac{1}{2}(AWEND + BWEND)$.

de onderzoeksvragen werden uitgevoerd op de gegevens van de onderzoeksgroep van 71 leerlingen.

Tabel 6-2: Gegevens over de afnamemomenten en de klassen waarin de vragenlijst in de tweede ronde werd afgenomen

school ⁹⁾	aantal en soort klassen	<i>tijdstip van afname:</i>			
		voortest thema	natest thema	voortest blok	natest blok
1	3 4VWO; 2 5VWO	mei'88	sept'88	nov'88	dec'88
3	3 4VWO; 2 5VWO	mei'88	sept'88	nov'88	dec'88
4	2 4VWO; 2 5VWO	mei'88	juni'88	okt'88	nov'88
5 ¹⁰⁾	1 5VWO	jan'89	feb'89	--	--
6 ¹¹⁾	1 4VWO	maart'89	mei'89	--	--
6	2 4VWO	--	mei'89	--	--

Daarnaast verzamelden we op twee afnamemomenten gegevens van 81 leerlingen van de scholen 5 en 6. Die gegevens gebruikten we voor de analyses m.b.t. de kwaliteit van de vragenlijst en van de onderzoeksopzet.

6.5 De kwaliteit van de vragenlijst

6.5.1 kwaliteit van de vragenlijstgegevens

De drie beoordelaars van de inhoudelijke kwaliteit van het instrument oordeelden dat deze vragenlijst 'de kwalitatieve wendbaarheid van het energiebegrip bij leerlingen' meet.

De twee onderzoekers die de A-itemscores vaststelden, bleken het in 83% van de gevallen met elkaar eens. Na overleg was de overeenstemming 100%.

Voor de B-lijst is het aantal ontbrekende of niet-bruikbare (bijvoorbeeld door dubbele aankruising) antwoorden gering: slechts 2% van het totaal. Een ongeveer even groot percentage van de leerlingen laat het aankruisen van één van de alternatieven in de A-lijst na. Bij de eerste afname was het percentage aankruisingen

-
9. School 2 kon, om de reden die in §5.2 genoemd is, in de tweede ronde niet aan het onderzoek deelnemen.
 10. School 5 kon het blok niet in het curriculum inpassen. De leerlingen zijn daarom niet in de tweede ronde onderzoeksgroep opgenomen. Er zijn wel leerlingen van deze school in hun begripsontwikkeling gevolgd (groep 5-13, zie hoofdstuk 5).
 11. In de vragenlijsten die in school 6 zijn ingevuld zijn enige veranderingen aangebracht ten behoeve van het onderzoek naar de kwaliteit van het instrument. De leerlingen van deze klassen zijn niet in de onderzoeksgroep opgenomen.

van het alternatief 'ik weet het niet' relatief klein (7% van het totaal). Bij de volgende afnamen was dat, zoals verwacht, aanzienlijk afgenomen (tot 3 à 4%).

Om na te gaan in hoeverre de vragenlijst reproduceerbaar werd ingevuld werd in twee klassen een vragenlijst afgenomen waarin hetzelfde gesloten item twee maal was opgenomen. Een bevredigend deel van een groep van 42 leerlingen (79%) bleek in beide gevallen hetzelfde van de vijf alternatieven aan te kruisen.

Voor de verschillende afnamemomenten is de interne consistentie (Cronbach's α) van de WEND-, TAAKWEND- en VALWEND-scores berekend. In tabel 6-3 zijn de gevonden waarden gegeven.

Tabel 6-3: Waarden voor de interne consistentie (Cronbach's α) van de wendbaarheidsscores op de verschillende afnamemomenten

afname- moment	α voor WEND	α voor TAAKWEND	α voor VALWEND
I	0,44	0,37	0,64
II	0,75	0,70	0,74
III	0,87	0,79	0,76
IV	0,82	0,75	0,64

Het is niet verwonderlijk dat de waarden voor α bij aanvang van het onderwijs laag zijn. De leerlingen hebben dan nog geen bovenbouw-onderwijs over energie gehad. Ze kennen een aantal vaktermen niet die in de items gebruikt worden en kunnen de vragenlijst dan ook moeilijk consistent invullen. De waarden voor α op de andere afnamemomenten zijn redelijk groot¹²⁾.

De productmoment-correlatiecoëfficiënt van de WEND-score bij de afname na het thema en het gemiddeld thema-proefwerkcijfer is 0,49 ($n=68$; $p < 0,001$). De productmoment-correlatiecoëfficiënt van de WEND-score na het blok en het gemiddeld blok-proefwerkcijfer is 0,51 ($n=64$; $p < 0,001$). Deze waarden zijn in dezelfde orde van grootte als de verwachte waarde, te weten de productmoment-correlatiecoëfficiënt van de gemiddelde thema- en blok-proefwerkcijfers. Die is 0,59 ($n=53$; $p < 0,001$).

De onderzoeksgroep bestond voor een derde deel uit meisjes. De meisjes hebben wat lagere gemiddelde proefwerkcijfers behaald dan de jongens, zowel tijdens het thema (6,7 tegen 6,9) als tijdens het blok (6,2 tegenover 6,3). Deze verschillen zijn echter niet significant (t ; $\alpha=0,05$).

De WEND-score na het thema is voor meisjes wat lager dan voor jongens (1,80 tegenover 1,95), maar dat verschil is niet significant (t ; $\alpha=0,05$). Datzelfde geldt voor de WEND-score na het blokonderwijs (2,12 tegenover 2,29).

12. Voor researchdoeleinden is volgens Nunnally (1967) een betrouwbaarheid van 0,50 à 0,60 voldoende.

We komen tot de slotsom dat de onderzoeksgegevens een redelijke tot grote interne consistentie tonen en dat zij aan inhoudelijke verwachtingen voldoen. Er is dus sprake van een redelijke kwaliteit van de vragenlijstgegevens.

6.5.2 kwaliteit van de onderzoeksopzet

Om het optreden van een testeffect na te gaan hebben we in één klas een voor- en natest bij het thema afgenomen en bij een andere klas aan dezelfde school met dezelfde leraar alleen de natest bij het thema. Deze klassen verschilden niet significant ($t; \alpha=0,05$) wat betreft de cijfers bij het proefwerk dat na het themaonderwijs werd afgenomen. Vergelijking van de WEND-scores op de natest toonde geen verschillen tussen beide groepen ($t; \alpha=0,05$).

Om het optreden van een instrumentatie-effect vanwege het gebruik van twee versies van de A-lijst te onderzoeken is in twee klassen een licht gewijzigde vragenlijst afgenomen. De wijziging bestond uit het opnemen van beide equivalente versies van één van de A-items, waarbij één van de andere A-items werd weggelaten. 94% van de leerlingen koos in beide items hetzelfde alternatief. De open antwoorden werden in 85% van de gevallen in dezelfde denkbeeldcategorie ingedeeld.

In de aantekeningen die de leraren in hun logboek hebben gemaakt, vinden we de volgende informatie over omstandigheden. Alle betrokken klassen genoten in de onderbouw energieonderwijs zoals de ontwikkelaars van het lesmateriaal verondersteld hadden. Aan één van de drie scholen is de relatie tussen energie en de valbeweging in de onderbouw reeds aan de orde geweest. Aan alle drie scholen is de relatie tussen energie en beweging in reeds 4VWO aan de orde geweest bij de behandeling van het PLON-thema 'Verkeer'.

In twee van de drie scholen ontbrak de tijd in 4VWO om het thema vóór het einde van het schooljaar af te maken. De leraren aan die scholen sloten het schooljaar af met een eerste themaproefwerk en behandelden de rest van het thema aan het begin van het daarop volgende schooljaar in 5VWO. Ze ronden het vervolgens af met een tweede themaproefwerk. Zij besteedden enkele lessen (ca. 5) meer aan het thema dan de derde school, die het thema in 20 lessen afrondde vóór het einde van het schooljaar.

Met het oog op een eventueel rijpingseffect hebben we de WEND-score van het tweede afnamemoment vergeleken met dat van het derde afnamemoment. We vonden geen significant ($t; \alpha=0,05$) verschil. Met andere woorden: er is geen verandering in de WEND-score over de tussenperiode opgetreden.

Om het optreden van een eventueel uitvaleffect vast te stellen hebben we zowel de WEND-resultaten als de gemiddelde thema- en blok-proefwerk cijfers voor de groep die de vier vragenlijsten heeft ingevuld ($n=55$) vergeleken met die voor de uitvalgroep ($n=16$). Voor geen van de afnamemomenten levert dat een significant ($t; \alpha=0,05$) verschil op.

De leraren die aan het onderzoek deelnamen vonden dat hun klassen niet uitzonderlijk goed of slecht presteerden vergeleken met groepen uit voorafgaande jaren. Instrumentatie- en selectie-effecten die van belang zijn bij het vergelijken van de eerste en

tweede ronde resultaten vermelden we op blz.175 waar de resultaten van die vergelijking gegeven worden.

Op basis van de analyses concluderen we dat er geen aanwijzingen zijn voor het optreden van test- en uitvaleffecten. Ook vinden we geen aanwijzingen voor bijzondere omstandigheden die bij de interpretatie van de onderzoeksresultaten van belang kunnen zijn.

6.6 Resultaten van het vragenlijstonderzoek: wendbaarheid

In deze paragraaf geven we eerst de globale resultaten van de metingen die vóór en na het onderwijs aan de hand van het gereviseerde lesmateriaal zijn uitgevoerd. Daarna worden de uitkomsten beschreven van de analyses betreffende de twee vooraf geformuleerde deelhypothesen. De derde deelhypothese betreft het vergelijken van de resultaten van het eerste en het tweede ronde vragenlijstonderzoek. We nemen de eerste ronde slechts in beschouwing voor zover dat voor die vergelijking van belang is.

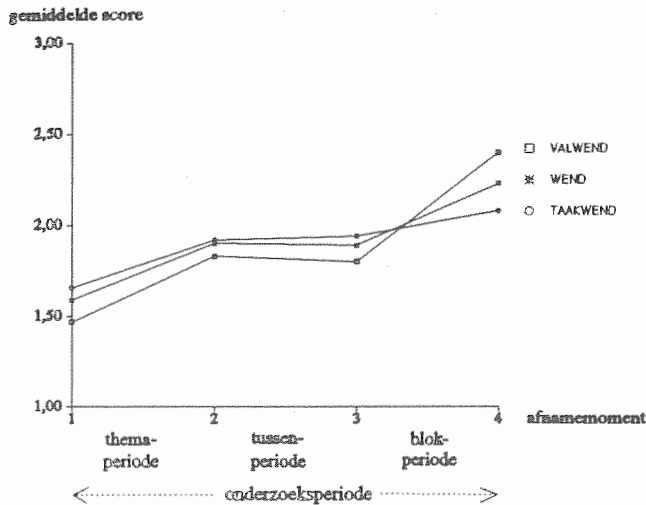
6.6.1 globale resultaten voor de tweede ronde

De globale resultaten van het vragenlijstonderzoek naar wendbaarheid, die we in deze subparagraaf presenteren, hebben betrekking op de 55 leerlingen die de vragenlijsten op alle vier de afnamemomenten ingevuld hebben. De gemiddelde waarden van hun wendbaarheidsscores worden in tabel 6-4 gegeven.

Tabel 6-4: Gemiddelde waarden voor de wendbaarheden (n=55): afnamemoment (afname), gemiddelde waarde (gemidd.) van de WEND-, TAAKWEND- en VALWEND-scores; standaardafwijking (st.afw.)

af- name	gemidd. WEND	st.afw	gemidd. TAAKWEND	st.afw VALWEND	gemidd.	st.afw
I	1,59	0,23	1,66	0,28	1,47	0,42
II	1,90	0,31	1,92	0,32	1,83	0,52
III	1,89	0,29	1,94	0,29	1,80	0,43
IV	2,23	0,36	2,08	0,39	2,40	0,44

De gemiddelde WEND-score toont een stijging over de thema- en de blokperiode. Er is geen stijging over tussenperiode. De gemiddelde TAAKWEND- en VALWEND-scores vertonen eenzelfde patroon als WEND, met dien verstande dat de stijging van de gemiddelde VALWEND-score groter is dan die van de gemiddelde TAAKWEND-score.



Figuur 6-3: De verandering in de gemiddelde scores voor WEND, TAAKWEND en VALWEND over de drie perioden. De scores variëren van 1 tot en met 3. De verbindingslijn tussen de meetpunten is slechts getrokken om de stijging of daling van de gemiddelde scores te illustreren; zij mag niet worden gelezen als het verloop van de variabelen *gedurende* de verschillende perioden.

Het verloop van de gemiddelde WEND-score komt (zie figuur 6-3) globaal overeen met wat we op grond van het protocolonderzoek (zie hoofdstuk 5) verwachtten. Daar vonden we immers dat de leerlingen zowel tijdens het thema- als tijdens het blokonderwijs begripsproblemen ontmoeten die voor een deel opgelost worden omdat er een begripsontwikkeling plaatsvindt. Ook de grote stijging van de gemiddelde VALWEND-score en de veel kleinere stijging van de gemiddelde TAAKWEND-score over de blokperiode komt overeen met wat we in het protocolonderzoek vonden. Maar de stijging van de VALWEND-score over de themaperiode is groter dan we op grond van het protocolonderzoek verwachtten. Immers, er is tijdens het themaonderwijs relatief weinig tijd aan valsituaties besteed. En waar er aandacht aan is besteed (bij 'opslag' van energie met een spaarbekken) deden zich vergelijkbare begripsproblemen voor als bij taaksituaties (zie §5.7).

6.6.2 toetsing van hypothesen 2a en 2b

In hypothesen 2a en 2b (zie blz.155) hebben we geformuleerd welke veranderingen we verwachten in de kwalitatieve wendbaarheid van leerlingen, wanneer ze thema- en blokonderwijs volgen.

Alvorens deze deelhypothesen te toetsen hebben we geverifieerd ($t; \alpha=0,05$) dat er over de tussenperiode inderdaad geen verandering optreedt in de WEND-, de TAAK-

WEND- en de VALWEND-scores. Met een 'repeated measures analysis' is nagegaan of de overige veranderingen significant zijn. De scores van afnamemoment III zijn weggelaten¹³⁾. Om de hypothese te toetsen dat er geen verschil is tussen de scores op de afnamemomenten vóór en na het themaonderwijs en na het blokonderwijs, kiezen we voor lineaire combinaties van de verschillen. De analyses zijn alleen uitgevoerd op de gegevens van leerlingen van wie een complete dataset voor de drie relevante afnamemomenten beschikbaar was. De resultaten van de drie 'repeated measures analyses' zijn opgenomen in tabel 6-5.

Tabel 6-5: Resultaten van de 'repeated measures analysis' voor de WEND-scores, de TAAKWEND-scores en de VALWEND-scores vóór en na het themaonderwijs en na het blokonderwijs (n=56): Wilks' lambda, F-benadering, aantal vrijheidsgraden (df) en overschrijdingskans (p).

variabele	Wilks' lambda	F-benadering	df	p
WEND	0,216	97,894	2/54	0,000
TAAKWEND	0,364	47,106	2/54	0,000
VALWEND	0,253	79,607	2/54	0,000

Uit tabel 6-5 blijkt dat er een significant ($\alpha=0,05$) verband bestaat tussen elk van de drie wendbaarheidsscores en het moment van afname van de vragenlijst. Om een idee te geven van de grootte van de verschillen is in tabel 6-6 het gemiddelde verschil tussen de scores op twee afnamemomenten vergeleken met de standaardafwijking in die verschillen ('effectgrootte', Cohen, 1977). Met TAAKWEND_n resp. VALWEND_n worden de gemiddelde TAAKWEND-score resp. VALWEND-score op het n^{de} afnamemoment aangeduid.

Tabel 6-6: Grootte van de verschillen tussen de WEND-, TAAKWEND en VALWEND-scores op twee afnamemomenten: gemiddeld verschil (gem.ver.); standaardafwijking (st.afw.) en effectgrootte (d).

	gem.ver.	st.afw.	d
WEND2-WEND1	0,33	0,30	1,10
TAAKWEND2-TAAKWEND1	0,27	0,30	0,91
VALWEND2-VALWEND1	0,39	0,49	0,78
WEND4-WEND3	0,38	0,32	1,19
TAAKWEND4-TAAKWEND3	0,14	0,28	0,51
VALWEND4-VALWEND3	0,62	0,46	1,35

13. Omdat er geen verschil is voor de afnamemomenten II en III, is de keuze voor de gegevens van het tweede afnamemoment willekeurig.

Ten aanzien van de grootte van de verschillen concluderen we dat het hier gaat om middelmatig tot grote effecten (Cohen, 1977). Dat stemt redelijk overeen met de verwachting dat we grote effecten zouden vinden.

In de hypothesen 2a en 2b hebben we ten aanzien van de stijging van de gemiddelde TAAKWEND- en VALWEND-scores verschillende verwachtingen geformuleerd die we kwantificeren als:

hypothese 2a (TAAKWEND2 - TAAKWEND1) >> (VALWEND2 - VALWEND1)

2b (TAAKWEND4 - TAAKWEND3) << (VALWEND4 - VALWEND3)

waarbij de bedoelde verschillen niet nul of kleiner dan nul zijn.

We hebben deze hypothesen getoetst met behulp van gepaarde t-toetsen. In tabel 6-7 zijn de resultaten hiervan opgenomen. Voor hypothese 2a is gebruik gemaakt van de gegevens van de leerlingen die zowel op het eerste als op het tweede afnamemoment aanwezig waren (n=67) en voor hypothese 2b van gegevens van de leerlingen die zowel op het derde als op het vierde afnamemoment aanwezig waren (n=58).

Uit tabel 6-7 blijkt dat in het geval van hypothese 2b de nulhypothese verworpen moet worden ($\alpha=0,05$). De vooraf geformuleerde alternatieve hypothese wordt wel ondersteund door de resultaten. De stijging in de VALWEND-scores tijdens het blokonderwijs is significant groter dan de stijging in de TAAKWEND-scores en er is sprake van een groot effect (groter dan de standaardafwijking).

Hypothese 2a wordt niet door de gegevens ondersteund. Het gevonden verschil wijst op een stijging van de VALWEND-scores tijdens het themaonderwijs die groter is dan die van de TAAKWEND-scores. Het gevonden verschil is echter niet significant.

Tabel 6-7: Resultaten van de gepaarde t-toetsen, uitgevoerd ter toetsing van hypothese 2a en 2b: gemiddeld verschil tussen de betreffende variabelen, standaardafwijking (st.afw.), t-waarde (t), aantal vrijheidsgraden (df) en tweezijdige overschrijdingskans (p).

hypothese	variabelen	gemiddeld verschil	st.afw.	t	df	p
2a verschil:	TAAKWEND2-TAAKWEND1	-0,08	0,53	-1,24	66	0,110
	VALWEND2-VALWEND1					
2b verschil:	VALWEND4-VALWEND3	0,47	0,41	8,72	57	0,000
	TAAKWEND4-TAAKWEND3					

6.6.3 toetsing van hypothese 2c

aard van de vergelijking

Er is slechts een voorzichtige vergelijking mogelijk tussen de resultaten van de eerste en tweede ronde van het onderzoek. Daarvoor is een aantal redenen. De vragenlijst van de eerste ronde is niet geheel gelijk geweest aan die van de tweede ronde.

Verandering van de vragenlijst in de tweede ronde was nodig om de equivalentie van twee versies van de A-lijsten te verbeteren. Ook bleken de formuleringen van enkele B-items hier en daar aanpassing te vereisen. Naar onze inschatting kan dit geringe verschil tussen vragenlijsten slechts voor een klein deel verantwoordelijk gesteld worden voor eventuele verschillen in resultaat.

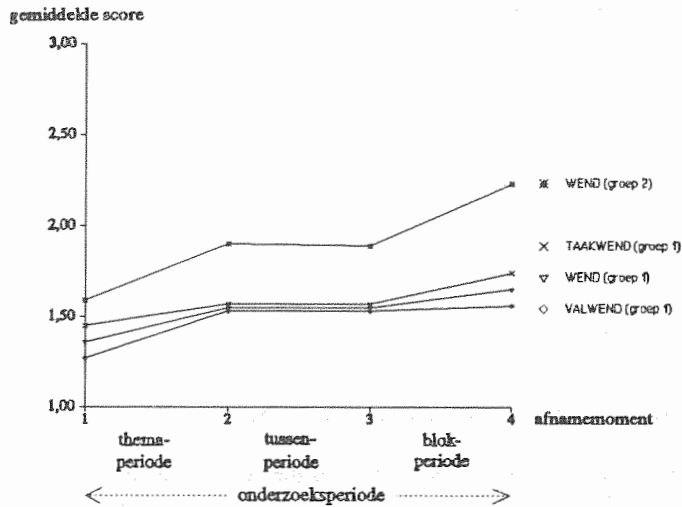
Een andere reden voor voorzichtigheid vormt het verschil in aanvangsniveau tussen de onderzoeksgroepen van de eerste en tweede ronde: de onderzoeksgroep van de tweede ronde vertoont een aanvangswaarde voor de WEND-score die significant (t ; $\alpha=0,05$) hoger is dan die van de eerste ronde onderzoeksgroep. We kunnen dit niet toeschrijven aan een verschil in talenten: de rapportcijfers van de twee groepen voor het vak natuurkunde die direct voorafgaand aan het onderzochte onderwijs werden gegeven, wijken niet significant (t ; $\alpha=0,05$) van elkaar af. We kunnen het verschil wel toeschrijven aan de onvoorziene omstandigheid dat de eerste ronde-onderzoeksgroep minder vooronderwijs over energie heeft gehad dan gebruikelijk. Dat kwam pas in de loop van het onderzoek aan het licht, namelijk in een discussie met de leraar van de betreffende klas over de redenen waarom deze klas meer begripsproblemen had dan we verwacht hadden. Vanwege dit verschil in aanvangsniveau vergelijken we de resultaten van beide onderzoeksgroepen niet wat betreft de WEND-scores zelf, maar alleen betreft de *verandering* van de WEND-scores.

In de wijze waarop het onderwijs werd gegeven verschillen beide ronden niet veel van elkaar. In beide ronden wisselen de leraren perioden waarin leerlingen in groepen werken af met perioden van klassikale uitleg en discussie. Het aantal lessen dat aan de thema/blok-combinatie besteed werd loopt wel uiteen. In de tweede ronde was het aantal lessen anderhalf maal zo groot als in de eerste ronde. Op grond van 'time on task' overwegingen (Creemers en Scheerens, 1991) in de tweede ronde een effect verwacht worden dat groter is dan dat van de eerste ronde is. Wij verwachten een effect dat veel groter is dan dat.

globale vergelijking

Voor een globale vergelijking beschouwen we de gemiddelde waarden van de WEND-scores van groep 1 (de onderzoeksgroep van de eerste ronde) en groep 2 (van de tweede ronde), die in figuur 6-4 grafisch zijn weergegeven. De gemiddelde waarden van de TAAKWEND- en VALWEND-scores, die in hetzelfde diagram zijn weergegeven, verschaffen enige achtergrondinformatie bij het verloop van de gemiddelde WEND-score van de eerste ronde.

Uit fig.6-4 lezen we af dat de gemiddelde WEND-score van onderzoeksgroep 1 niet alleen bij aanvang van het onderwijs, maar bij alle afnamen lager is dan die van groep 2. Bovendien stijgt de gemiddelde WEND-score van groep 1 minder dan die van groep 2. Over het blok is er voor groep 1 zelfs nauwelijks sprake van een stijging van de gemiddelde WEND-score. Dat is vooral toe te schrijven aan het ontbreken van een stijging voor de VALWEND-score over het blok.



Figuur 6-4: De gemiddelde WEND-scores van de onderzoeksgroepen van de eerste en de tweede ronde en de gemiddelde TAAKWEND- en VALWEND-scores van de eerste ronde. Zie voor een toelichting hoe dit diagram gelezen moet worden het onderschrift bij figuur 6-3.

Het verloop van de WEND-score komt globaal overeen met de resultaten van het protocolonderzoek van de eerste ronde. In hoofdstuk 3 constateerden we bij de meeste leerlingen een zekere begripsontwikkeling tijdens het themaonderwijs en overwegend blokkerende begripsproblemen tijdens het blokonderwijs.

resultaten van de toetsing

De waarden voor WEND van beide groepen verschillen significant (t ; $\alpha=0,05$) van elkaar op alle vier afnamemomenten. Dat is niet verwonderlijk gezien het significante verschil bij aanvang van het onderwijs.

Om hypothese 2c te toetsen hebben we de gemiddelde verandering in WEND-scores voor groep 1 en groep 2 met behulp van een t-toets met elkaar vergeleken. De resultaten daarvan staan vermeld in tabel 6-8.

Over de themaperiode vinden we geen significant (t ; $\alpha=0,05$) verschil voor de toename van de WEND-score. Over de blokperiode is er wel een significant verschil, evenals over de onderzoeksperiode als geheel. Over de blokperiode is het verschil zo groot dat niet louter het verschil in het aantal lessen of het verschil in instrument hiervoor verantwoordelijk kunnen zijn.

We concluderen dat hypothese 2c niet door onze gegevens wordt ondersteund wat betreft de themaperiode. Er is wel sprake van ondersteuning wat betreft de blokperiode en de onderzoeksperiode als geheel.

Tabel 6-8: Vergelijking van de verandering in WEND-scores voor de onderzoeksgroepen van de eerste en tweede ronde: gemiddelde verandering van WEND-score (gem. ver. WEND), standaard afwijking (st. afw.), t-waarde (t), aantal vrijheidsgraden (df), tweezijdige overschrijdingskans (p).

	<i>groep I</i>		<i>groep II</i>		<i>vergelijking</i>		
	gem. ver. WEND	st. afw.	gem. ver. WEND	st. afw.	t	df	p
themaperiode	0,19	0,24	0,31	0,27	1,53	67	0,13
blokperiode	0,05	0,17	0,34	0,31	5,36	61,59	0,000
onderzoekperiode	0,23	0,18	0,64	0,35	5,98	35,32	0,000

6.7 Resultaten van het vragenlijstonderzoek: denkbeelden

Tegelijk met de kwalitatieve wendbaarheid is het 'actieve' denkbeeldgebruik van leerlingen onderzocht. Dat is gebeurd aan de hand van de open items uit de vragenlijst. Het onderzoek naar het denkbeeldgebruik is bedoeld om de resultaten van het vragenlijstonderzoek naar wendbaarheid en het protocolonderzoek naar begripsontwikkeling inhoudelijk met elkaar in verband te brengen (onderzoeksvraag 3).

6.7.1 denkbeeldgebruik

Voor elk denkbeeld is nagegaan welk deel van de leerlingen het tenminste één maal bij een bepaalde afname gebruikt. Omdat de meeste leerlingen op één afnamemoment verschillende denkbeelden naast elkaar gebruiken, is bovendien nagegaan met welke frequentie een denkbeeld als het 'meest gevorderde' denkbeeld op een bepaald afnamemoment wordt gebruikt. Een leerling die bij de taakitems de 'verbruik/verlies'-redenering als 'meest gevorderde' denkbeeld gebruikt kan daarnaast bij een ander taakitem het verbruik-denkbeeld gebruikt hebben, maar heeft bij geen van de drie open taakitems van een fysisch geëigende redenering blijk gegeven. Bijvoorbeeld: op het eerste afnamemoment gebruikte 47% van de groep van 55 leerlingen tenminste bij één taakitem de 'verbruik-en-verlies'-redenering (zie tabel 6-9). 9% van deze leerlingen gebruikte daarnaast bij een taakitem een fysisch geëigende redenering. De overige 40% gebruikte dus geen meer gevorderde redenering. Dat percentage staat in tabel 6-9 tussen haakjes vermeld.

In tabel 6-9 staan totaal-percentages voor het denkbeeldgebruik die hoger zijn dan 100%. Daaruit blijkt dat leerlingen bij verschillende taakitems of valitems vaak niet één denkbeeld, maar meerdere soorten redeneringen gebruiken. Wat de taakitems betreft gebruikte ongeveer de helft van de leerlingen bij aanvang van het thema uitsluitend een 'verbruik'-redenering. Slechts 13% van de leerlingen kon dan een fysisch adequate redenering geven. Het aantal leerlingen dat bij de taakitems het verbruik-denkbeeld gebruikte toonde in de loop van het onderwijs een dalende tendens. Het aantal leerlingen dat een adequate fysische redenering gaf steeg

weliswaar, maar toch kwam 49% van de groep na het onderwijs niet verder dan het geven van een 'verbruik/verlies'-redenering.

Tabel 6-9: Het percentage leerlingen (n=55) dat een bepaald denkbeeld tenminste één maal op een afnamemoment gebruikt.¹⁴ Het getal tussen haakjes is het percentage leerlingen dat het betreffende denkbeeld als 'meest gevorderde' denkbeeld gebruikt.

afnamemoment	I	II	III	IV				
	%	%	%	%				
<i>taak-items</i>								
verbruik	87	(47)	65	(14)	68	(11)	49	(8)
verbruik/verlies	49	(40)	56	(53)	58	(52)	61	(41)
fysisch	<u>13</u>	<u>(13)</u>	<u>33</u>	<u>(33)</u>	<u>37</u>	<u>(37)</u>	<u>51</u>	<u>(51)</u>
totaal%	149	(100)	154	(100)	153	(100)	161	(100)
<i>val-items</i>								
geen energie	84	(27)	59	(18)	64	(21)	28	(0)
snelheid	65	(48)	71	(32)	66	(36)	42	(5)
fysisch	<u>25</u>	<u>(25)</u>	<u>50</u>	<u>(50)</u>	<u>43</u>	<u>(43)</u>	<u>95</u>	<u>(95)</u>
totaal%	174	(100)	180	(100)	173	(100)	165	(100)

Wat het gebruik van fysisch geëigende redeneringen betreft is de aanvangssituatie voor de valitems iets gunstiger dan voor de taakitems¹⁵. Ongeveer een kwart van de leerlingen legde geen verband tussen valsituaties en energie. Van de driekwart die deze relatie wel legt, doet een kwart dat meteen op een fysisch geëigende wijze.

De veranderingen bij de valitems tijdens het onderwijs zijn aanzienlijk groter dan die bij de taakitems. Het gebruik van redeneringen zonder energie neemt sterk af. Na het onderwijs brengen alle leerlingen bij tenminste één van de valitems vallen in verband met energie. Het aantal leerlingen dat vallen alléén via snelheid met energie in verband brengt stijgt enigszins tijdens het thema, maar daalt vervolgens aanzienlijk tijdens het blok. Na het blokonderwijs gebruiken bijna alle leerlingen (95%) tenminste één keer een fysisch geëigende redenering.

Uit het feit dat naast het 'meest gevorderde' denkbeeld ook minder gevorderde denkbeelden gebruikt worden blijkt, dat leerlingen een 'nieuw' ontwikkeld denkbeeld

14. Zie voor de betekenis van de categorieën blz. 163 en 164.

15. Desondanks is de gemiddelde TAAKWEND-score op het eerste afnamemoment groter dan de VALWEND-score. Dat wordt veroorzaakt door het feit dat er in veel verbruik-en-verlies-redeneringen correcte elementen aanwezig zijn waarvoor we de itemscore 2 hebben toegekend.

minder gebruiken dan mogelijk zou zijn. Maar met de toename van het aantal leerlingen dat bij valitem een fysisch geëigende redenering geeft, neemt het aantal leerlingen dat een andere redenering geeft sterk af. Na het blok geeft 30% van de leerlingen uitsluitend fysieke redeneringen bij de valitem.

6.7.2 vergelijking met de resultaten van het protocolonderzoek

voor taaksituaties

1. In het protocolonderzoek hebben we gevonden dat er leerlingen zijn die aanvankelijk de conceptualisatie 'energie als werkingsvoorwaarde voor apparaten' gebruiken. Vanuit die conceptualisatie heeft 'energieverlies' geen betekenis. Daarom maken die leerlingen waarschijnlijk deel uit van de groep leerlingen (47%) die bij de eerste afname bij het beantwoorden van de taakitem uit de vragenlijst alleen het verbruik-denkbeeld gebruiken.

In het protocolonderzoek hebben we gevonden dat de meeste van hen tijdens het thema of tijdens het blok een andere conceptualisatie en andere denkbeelden leerden gebruiken. Dat komt overeen met het resultaat van het vragenlijstonderzoek dat nog slechts 8% van de leerlingen na het blokonderwijs uitsluitend het verbruikdenkbeeld gebruikt.

2. Uit het protocolonderzoek bleek dat een aantal leerlingen reeds bij aanvang van het onderwijs de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets' bij taaksituaties gebruiken. Zij konden het begrip 'energieverlies' betekenis geven. Daarom betreft het waarschijnlijk de leerlingen die aanvankelijk het verbruik-en-verliesdenkbeeld als meest gevorderde denkbeeld gebruiken (40%).

In het protocolonderzoek hebben we gezien dat een aanzienlijk deel van de leerlingen die de conceptualisatie 'energie als een bruikbaar iets' gebruiken in zijn begripsontwikkeling t.a.v. taaksituaties geblokkeerd wordt ('groep B', zie § 5.10) omdat deze groep blijft vasthouden aan het denkbeeld dat energie verbruikt wordt. Op grond van antwoorden op proefwerkvragen schatten we dat het ongeveer de helft van een groep van 44 leerlingen¹⁶ betreft (zie §5.5 en 5.7). Dat komt overeen met het resultaat van het vragenlijstonderzoek dat ongeveer de helft van de leerlingen (49%) na het blokonderwijs bij geen enkel taakitem een fysisch geëigende antwoord gaf.

3. In het protocolonderzoek hebben we geen leerlingen gevonden die de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' bij aanvang van het onderwijs reeds gebruiken. Uit het vragenlijstonderzoek vinden we dat weinig leerlingen (13%) bij aanvang van het onderwijs reeds fysisch geëigende redeneringen houden voor taaksituaties. Dat aantal neemt in de loop van de onderwijsperiode toe. Dit zijn de leerlingen van 'groep A' (zie §5.10).

16. Deze groep van 44 leerlingen omvat 60% van de onderzoeksgroep van het vragenlijstonderzoek.

voor valsituaties

1. In het protocolonderzoek hebben we gevonden dat er leerlingen zijn die vallen aanvankelijk niet met energie in verband brengen. In het vragenlijstonderzoek vinden we dat dat ongeveer een kwart van de onderzoeksgroep (27%) betreft. Bij sommigen van hen vinden we een eerste aanzet tot die relatie: ze brengen het 'loslaten' van iets dat gaat vallen met energie in verband. Zowel uit het protocol als uit het vragenlijstonderzoek blijkt dat leerlingen in de loop van het onderwijs leren dat vallen met energie in verband gebracht moet worden.
2. In het protocolonderzoek hebben we twee manieren gevonden waarop leerlingen dat verband kunnen leggen: via het denkbeeld 'energie als werkingsvoorwaarde voor vallen' en via 'energie als de activiteit bewegen'. Bij aanvang van het onderwijs vonden we vooral leerlingen met het eerstgenoemde denkbeeld. In het vragenlijstonderzoek hebben we deze twee denkbeelden in de antwoorden op de valitem niet van elkaar onderscheiden, maar samengenomen in het 'snelheid-denkbeeld'. 48% van de onderzoeksgroep gebruikt dat aanvankelijk als 'meest gevorderde' denkbeeld. In het protocolonderzoek zagen we dat veel leerlingen in de loop van het onderwijs, vooral tijdens het blok, fysisch geëigende redeneringen leren gebruiken. Datzelfde komt naar voren uit het onderzoek naar denkbeelden. Na het onderwijs is het gebruik van het 'snelheid-denkbeeld' als 'meest gevorderde' denkbeeld sterk gedaald. Dan betreft dat nog slechts 5% van de leerlingen. Deze daling doet zich vooral tijdens het blokonderwijs.
3. In het protocolonderzoek hebben we geen leerlingen gevonden die voor valsituaties aanvankelijk reeds fysisch geëigende redeneringen kunnen geven. Uit het vragenlijstonderzoek komt naar voren dat niettemin een kwart van de onderzoeksgroep daartoe reeds in staat is bij aanvang van het onderwijs. Na het onderwijs kunnen bijna alle leerlingen (95%) zo'n redenering geven. De meeste leerlingen hebben tijdens het blokonderwijs geleerd zo'n redenering te geven.

6.8 Conclusies van het vragenlijstonderzoek

Op *onderzoeksvraag 2* (en bijbehorende hypothese 2) hebben we de volgende antwoorden gekregen:

1. De kwalitatieve wendbaarheid op het eerste afnamemoment was voor de onderzoeksgroep van de tweede ronde zoals verwacht laag, maar (onverwacht) wat groter dan voor die van de eerste ronde onderzoeksgroep. We kunnen het laatste toeschrijven aan een verschil in vooronderwijs.
2. Na afloop van het themaonderwijs was de kwalitatieve wendbaarheid waarmee de leerlingen het energiebegrip konden hanteren in beide onderzoeksronden toegenomen, zij het weinig. Voor hypothese 2a die voor de tweede ronde een verschil in kwalitatieve wendbaarheid tussen taak- en valsituaties voorspelt ten gunste van de taaksituaties hebben we geen ondersteuning gevonden.

3. Een aanzienlijk deel van beide onderzoeksgroepen hanteerde het energiebegrip na het blokonderwijs nog steeds met een kleine kwalitatieve wendbaarheid t.a.v. taaksituaties. Dat deel bleef vasthouden aan het denkbeeld dat energie in taaksituaties 'verbruikt' wordt. In de tweede ronde betrof het ongeveer de helft van de onderzoeksgroep. Het andere deel van de onderzoeksgroepen beheerste het energiebegrip na het blokonderwijs met een grote kwalitatieve wendbaarheid t.a.v. taaksituaties.
4. In de eerste ronde nam de kwalitatieve wendbaarheid van het energiebegrip tijdens het blokonderwijs niet toe. In de tweede ronde was er een aanzienlijke toename, vooral met betrekking tot valsituaties. Daarmee hebben we ondersteuning gevonden voor hypothese 2b.
5. Vrijwel alle leerlingen van de tweede ronde onderzoeksgroep konden na het blokonderwijs een fysisch geëigende redenering voor valsituaties geven.
6. De toename van de kwalitatieve wendbaarheid over de blokperiode was in de tweede ronde groter dan in de eerste ronde. Voor de themaperiode was dat niet het geval. Daarmee hebben we slechts wat het blokonderwijs betreft ondersteuning gevonden voor hypothese 2c.
7. Het verschil in toename van kwalitatieve wendbaarheid tussen de eerste en de tweede ronde kunnen we toeschrijven aan het falen van het onderwijs over het energiebegrip in valsituaties in de blokperiode van de eerste ronde resp. het slagen van dat onderwijs in de tweede ronde. Wat taaksituaties betreft is het onderwijs in de tweede ronde nauwelijks beter geslaagd dan het onderwijs van de eerste ronde.

In antwoord op *onderzoeksvraag 3* concluderen we:

8. De resultaten van het vragenlijst- en protocolonderzoek ondersteunen elkaar in grote lijnen. De groep die de gewenste begripsontwikkeling t.a.v. taaksituaties doormaakt ('groep A') omvat ongeveer de helft van de onderzoeksgroep. De andere helft ('groep B') betreft leerlingen die door het verbruikdenkbeeld worden geblokkeerd.

7 Slotbeschouwing

7.1 Discussie over de opbouw van het energiebegrip

7.1.1 de op energie toegespitste probleemstelling

We kunnen nu een antwoord geven op de op het energiebegrip toegespitste algemene probleemstelling die we in §1.4 geformuleerd hebben:

In welke mate en op welke wijze slaagt een thema/blok-combinatie er in zowel een praktijkgerichte als een vakstructuurgerichte ontwikkeling van het energiebegrip bij leerlingen te realiseren?

In §2.6 hebben we de *praktijkgerichte ontwikkeling* van het energiebegrip omschreven als het ontwikkelen en correct gebruiken van de conceptualisatie 'energie als een behouden en bruikbaar iets' in situaties uit het contextgebied 'energiegebruik en energievoorziening'. Onder de *vakstructuurgerichte begripsontwikkeling* hebben we verstaan het ontwikkelen en correct gebruiken van de conceptualisatie 'energie als een behouden entiteit' in veel gevarieerde situaties.

7.1.2 de mate waarin en de wijze waarop het curriculum geslaagd is

Het onderwijs met de oorspronkelijke thema/blok-combinatie 'Energie/Arbeid en Energie' is er slechts in beperkte mate in geslaagd de bedoelde begripsontwikkeling bij leerlingen te realiseren. Dat blijkt uit de geringe toename van de kwalitatieve wendbaarheid waarmee leerlingen het energiebegrip hanteren. Het onderwijs met de thema/blok-combinatie 'Energievoorziening/Arbeid en Energie' is in dat opzicht beter geslaagd. Dat geldt vooral voor de vakstructuurgerichte begripsontwikkeling in het blok en veel minder voor de praktijkgerichte begripsontwikkeling in het thema. Dit laatste ondanks de veranderingen in de begripsopbouw die bij de revisie van het thema zijn aangebracht. De veranderingen in de begripsopbouw in het blok zijn dus wél succesvol geweest.

groep A en groep B

In §5.10 hebben we geconcludeerd dat er in het tweede ronde onderwijs twee kernproblemen optreden. Het onderwijs met het gereviseerde lesmateriaal slaagt er, behalve voor valsituaties, onvoldoende in te bereiken dat leerlingen een relatie leggen tussen 'natuurlijke' processen en energie, met het gevolg dat een aanzienlijke groep leerlingen ('groep B') geblokkeerd wordt (kernprobleem 1). Wel slaagt het onderwijs erin te bereiken dat leerlingen die niet geblokkeerd worden ('groep A') de toestand van een voorwerp in verband gaan brengen met energie, zij het op een later moment

in de begripsopbouw dan verwacht (kernprobleem 2). In §6.8 hebben we geconcludeerd dat ongeveer de helft van de leerlingen van de tweede ronde behoort tot 'groep B'.

Achteraf vinden we bij de leerlingen van de eerste ronde ook een groep van A-leerlingen die in het themaonderwijs geen blokkade ondervindt (bijvoorbeeld Job, Hein) en een groep van B-leerlingen waarvoor dat wel het geval is (bijvoorbeeld Elie, Piet). Tijdens het blokonderwijs in de eerste ronde worden beide groepen evenwel geblokkeerd. Dat hebben we toegeschreven aan het gebruik van complexe praktijkcontexten.

In het resterende deel van deze subparagraaf beperken we ons tot de leerlingen van groep B en stellen wij ons de vraag waarom zij in het themaonderwijs van de tweede ronde geblokkeerd worden terwijl het blokonderwijs uit deze ronde hen wel productieve situaties biedt.

groep B en de begripsopbouw in het gereviseerde thema

In het thema wordt gebruik gemaakt van de voorstelling van energie als een 'bruikbaar iets'. Dat spoort met het contextgebonden karakter van het thema. Maar er wordt ook een fysisch correct energiebegrip nagestreefd. Daarom is het energiebegrip dat in het thema behandeld wordt toch abstract.

De leerlingen van 'groep B' hanteren tijdens het themaonderwijs een energiebegrip dat bepaald wordt door de gedachte dat energie uitsluitend te maken heeft met 'gedwongen' processen. We herkennen dat als een leefwereldgezichtspunt. Doordat het thema beperkt is tot 'taaksituaties' sluit het nauw aan bij dit gezichtspunt. Met behulp van gegevens van het tweede ronde protocolonderzoek (en achteraf bevestigd door die van het eerste onderzoek) hebben we voor groep B het volgende stelsel van samenhangende, maar met de natuurkunde strijdige, denkbeelden met betrekking tot energie kunnen reconstrueren.

- Bij 'gedwongen' processen wordt energie 'verbruikt'; die energie is na afloop van het proces verdwenen.
- Afkoelen, tot stilstand komen en vallen zijn 'natuurlijke' processen. Ze gaan niet gepaard met het ontstaan van energie(soorten) of met het afgeven van energie aan de omgeving. Slechts het mogelijk maken van deze processen ('loslaten' bij vallen) en het bevorderen ervan (koelen, remmen) wordt met energie in verband gebracht en wel met *energieverbruik*.
- Het leveren van energie door een energiebron betreft een proces dat niet in verband wordt gebracht met het veranderen van de toestand van de betreffende energiebron. Het gebruik van de voorstelling van energie als een 'bruikbaar iets' kan leiden tot het denkbeeld dat de in de energiebron aanwezige ('opgeslagen') energie 'vrijkomt' zonder toestandsverandering van de energiebron zoals het ook zonder toestandsverandering is 'opgeslagen'.
- Het 'gereed maken' van een opslagmedium (verwarmen of omhoog brengen van water, in beweging zetten van een vliegwiel), dat 'vooraf gaat aan het opslaan zelf', gaat gepaard met energieverbruik. De 'verbruikte' energie moet als 'verloren' worden beschouwd omdat het proces waarmee het vrijkomen van de

- 'opgeslagen' energie gepaard gaat (afkoelen, vallen, tot stilstand komen) 'vanzelf' plaatsvindt.
- Het 'warm worden' (en blijven) van werkende apparaten gaat (volgens sommige leerlingen) 'vanzelf'. Volgens andere leerlingen gaat dat gepaard met 'verbruik' van een deel van de toegevoerde energie zonder dat er warmte/energie aan de omgeving wordt afgegeven.

De praktijkgerichte behandeling van het energiebegrip in het thema, met name de beperking tot 'taaksituaties' en de voorstelling van energie als een 'bruikbaar iets', leidt ertoe dat leerlingen van 'groep B' hun met de natuurkunde strijdige denkbeelden in essentie kunnen handhaven door nieuw aangeboden begrippen en relaties binnen dit coherente en complexe stelsel van denkbeelden een (ongewenste) betekenis te geven. Dit stelsel kan zelfs vaak met succes gebruikt worden voor het oplossen van vraagstukken. Dat brengt met zich mee dat de gevormde begrippen moeilijk onderscheidbaar zijn van de begrippen die in de schoolnatuurkunde bedoeld worden. Ook in ons onderzoek zijn we er pas in de tweede ronde in geslaagd zicht te krijgen op dit stelsel. Daardoor was het niet mogelijk in het gereviseerde lesmateriaal een begripsopbouw uit te werken die ermee rekening houdt.

Wat is de reden dat dit stelsel van denkbeelden zich tijdens het thema 'Energievoorziening' bij veel leerlingen heeft kunnen vormen? Daarover kunnen we het volgende zeggen. Ten eerste geven praktijksituaties uit het thema door hun complexiteit onverwachte mogelijkheden voor alternatieve interpretaties. Ten tweede gebruiken we in de begripsopbouw in het lesmateriaal het idee dat energie 'opgeslagen' kan worden op grond van de verwachting dat dat idee productief zou kunnen werken. Dat blijkt niet zonder meer het geval te zijn. Ten derde wezen we op grond van het eerste ronde onderzoek het denkbeeld 'activiteit is energie' af als een niet productief denkbeeld. Maar uit het tweede ronde onderzoek is gebleken dat dit denkbeeld wel productief kan zijn, namelijk in situaties waarin sprake is van verandering van een bewegingstoestand. Ten vierde hebben we in het thema (te) weinig gebruik gemaakt van het fysisch/mathematische karakter van het energiebegrip. We gebruikten formules slechts om hoeveelheden energie uit te rekenen en niet om te reflecteren op de relaties tussen energie en de andere grootheden die in de formules optreden. Daarmee begonnen we pas in het blok.

groep B en de begripsopbouw in het gereviseerde blok

In het blok is een opbouw uitgewerkt van eenvoudige schoolcontexten naar complexe praktijkcontexten. Dat betekent dat, anders dan in het thema, ook situaties aan de orde komen waarin alléén 'natuurlijke' processen optreden, zoals het vallen van een voorwerp. Daarmee is het voor leerlingen onontkoombaar om die processen met energie in verband te brengen. Verder is de voorstelling van energie als een 'iets' door het gebruik van de abstracte conceptualisatie 'energie als een behouden entiteit' in het blok veel minder nadrukkelijk aanwezig dan in het thema. Dat geeft leerlingen de mogelijkheid ook andere voorstellingen van energie te gebruiken, met name 'activiteit'. Ten derde ligt veel nadruk op het gebruik van formules en regels (de energievergelijking) voor relaties tussen verschillende grootheden, waardoor gestimu-

leerd wordt dat energie in verband gebracht wordt met de toestand van een voorwerp (hoogte, temperatuur, snelheid) in een bepaalde situatie.

Dat we vooral een vooruitgang in begripsontwikkeling t.a.v. valsituaties vinden terwijl toch ook veel taaksituaties in het blok aan de orde komen, schrijven we toe aan het verschil tussen die twee soorten situaties. Valsituaties zijn eenvoudiger dan taaksituaties. In valsituaties treedt het 'gedwongen' proces (de beweging omhoog) niet tegelijk op met het 'natuurlijke' proces (de beweging omlaag). Bij taaksituaties is er daarentegen bij het 'gedwongen' proces (versnellen, opwarmen) tegelijkertijd sprake van 'natuurlijke' processen: het optreden van wrijving en het afgeven van warmte aan de omgeving. Het effect van het 'natuurlijke' proces, het opwarmen van de omgeving, kan door leerlingen makkelijk over het hoofd gezien worden: het is meestal klein en het is geen 'gewenst' proces zodat de aandacht er niet op gericht is.

7.1.3 aanbevelingen t.a.v. de opbouw van het energiebegrip

Een nieuw te ontwikkelen opbouw van het energiebegrip dient veelzijdig te zijn in het gebruik van contexten en conceptualisaties van energie. Hij dient rekening te houden met het gebruik van het leefwereldgezichtspunt door leerlingen en niet onmiddellijk het abstracte gezichtspunt van het vak te behandelen. Eerst moet een 'tussengezichtspunt' geboden worden dat begrijpelijk is vanuit het leefwereldgezichtspunt en dat vanuit het vakgezichtspunt weliswaar zeer onvolledig, maar niet onjuist is. Bijvoorbeeld als volgt.

1. *Het leefwereldgezichtspunt: energie is nodig voor 'gedwongen' processen; 'natuurlijke' processen hebben niets met energie te maken*
Onderwijs dient te stimuleren dat leerlingen, als voorbereiding op een nieuw gezichtspunt, naast bekende ook nieuwe conceptualisaties van energie leren gebruiken: energie als een bruikbaar iets, energie als activiteit, energie als iets dat met formules berekend kan worden. Daarbij dient de aandacht te worden gericht op de relatie tussen het verbruiken en produceren van energie(soorten). Die relatie komt het duidelijkst naar voren in eenvoudige situaties zoals het afkoelen van water (waarbij de omgeving opgewarmd wordt) en het vallen van een voorwerp (afname van hoogte, toename van snelheid).
2. *Het 'tussengezichtspunt': 'natuurlijke' processen hebben ook met energie te maken*
Vanuit dit gezichtspunt is het mogelijk de hoeveelheid energie die 'verbruikt' wordt bij het gedwongen proces te vergelijken met de hoeveelheid die ontstaat bij het natuurlijke proces. Dat vormt de basis voor de ontwikkeling van de conceptualisaties 'energie als een behouden en bruikbaar iets' en 'energie als behouden oorzaak/werking'. Vervolgens dient de aandacht gericht te worden op de relatie tussen energie en de toestand van een voorwerp. Bewegingen omhoog en omlaag (bijvoorbeeld de worp) vormen daarvoor geschikte eenvoudige situaties waarbij de conceptualisatie 'energie als behouden mechanische grootheid' van dienst kan zijn. Zo kan de stap gemaakt worden naar een nieuw gezichtspunt.
3. *Het 'abstracte' gezichtspunt: energie is een behouden abstracte grootheid*
Binnen dit gezichtspunt zijn de conceptualisaties 'bruikbaar iets' en 'oor-

zaak/werking' slechts hulpmiddelen die het mogelijk maken over het abstracte begrip te spreken. Die conceptualisaties zijn niet meer bepalend voor het energiebegrip. De fysisch/mathematische voorstelling is de meest geschikte om met het energiebegrip om te gaan, maar is moeilijk in woorden te vatten. Daarom wordt de voorstelling van energie als een abstract 'iets' gebruikt: in de conceptualisatie 'energie als een behouden entiteit'. Als het accent ligt op de formeel-mathematische voorstelling is er sprake van de academische conceptualisatie. Deze begripsopbouw lijkt niet alleen geschikt voor VWO, maar zou ook in het HAVO en MAVO gebruikt kunnen worden. De uitwerking van het abstracte gezichtspunt zal in die schoolsoorten minder uitgebreid kunnen zijn dan in het VWO. Wat de MAVO betreft zou de uitwerking bijvoorbeeld beperkt kunnen blijven tot het gebruik van de conceptualisatie 'energie als een behouden mechanische grootheid' bij valsituaties.

7.2 Terugblik op realiteitsgericht onderwijs

7.2.1 de algemene probleemstelling

Realiteitsgericht onderwijs is door het PLON-VWO-bovenbouw project ontwikkeld uit ongenoegen met het gangbare academisch gerichte natuurkundeonderwijs. Naar de mening van de PLON-ontwikkelaars en leraren leidt academisch gericht onderwijs in het Voortgezet Onderwijs niet voldoende tot de vorming van wendbaar te gebruiken vakbegrippen (zie hoofdstuk 1). Die opvatting heeft ertoe geleid dat er thema/blok-combinaties zijn ontwikkeld, waarin zo veel mogelijk gebruik wordt gemaakt van situaties uit de realiteit. Met deze *realiteitsgerichte* lessenseries wordt een dubbele doelstelling nagestreefd: begripsontwikkeling en de STS-doelstelling (inzicht geven in de rol die natuurkundige kennis in het betreffende contextgebied speelt). Verondersteld werd dat deze twee doelstellingen elkaar ondersteunen. In ons onderzoek hebben we ons met name gericht op de begripsontwikkelingsdoelstelling van het curriculum. Dat komt tot uiting in de algemene probleemstelling die we in §1.4 geformuleerd hebben:

In welke mate en op welke wijze slaagt een realiteitsgericht natuurkundecurriculum, ingericht volgens het thema/blokmodel, er in zowel een praktijkgerichte als een vakstructuregerichte begripsontwikkeling bij leerlingen te realiseren?

In de rest van deze paragraaf gaan we in op de vraag wat we t.a.v. deze algemene probleemstelling uit het onderzoek geleerd hebben: over het realiteitsgerichte karakter van lesmateriaal, over het thema/blok-model en over de relatie tussen STS-doelstellingen en begripsontwikkeling.

7.2.2 realiteitsgerichtheid

We hebben te gemakkelijk aangenomen dat realiteitsgericht onderwijs goed is voor het *leren van kernbegrippen* uit een natuurwetenschappelijk vakgebied. Er blijken aan het gebruik van aan de realiteit ontleende situaties bezwaren te kleven vanwege

- de complexiteit van de meerderheid van die situaties: veel begrippen en relaties spelen tegelijkertijd een rol;
- de leefwerelddenkbeelden die door dergelijke situaties bij leerlingen kunnen worden opgeroepen.

Leefwerelddenkbeelden kunnen zowel een productieve als een blokkerende rol spelen bij de ontwikkeling van kernbegrippen. Maar als ze in complexe situaties worden opgeroepen is de kans op een blokkerende uitwerking groot. Dan blijft het voor leerlingen vaak onduidelijk welke de belangrijke vakrelaties zijn en bestaan er allerlei mogelijkheden om andere dan de bedoelde relaties te leggen. Bovendien is het, vanwege diezelfde complexiteit, voor het onderwijs vaak moeilijk te ontdekken dat zich begripsproblemen bij leerlingen voordoen en vooral om welke problemen het dan precies gaat.

Het gebruik van situaties uit de realiteit in de opbouw van kernbegrippen is verantwoord als het om situaties gaat die vanuit het vakgebied gezien eenvoudig zijn. In dergelijke situaties kan meestal productief gebruikt gemaakt worden van denkbeelden die opgeroepen worden. Meer complexe praktijkcontexten zullen in het algemeen een zekere idealisering behoeven, waardoor ze tot 'schoolcontexten' worden (Van Genderen, 1989). Het gebruik van schoolcontexten kan tot gevolg hebben dat een begrip voor leerlingen niet gebonden blijft aan leefwereldkenmerken van de context maar verbonden wordt aan de structuur die de situatie vanuit het vak gezien heeft.

Voor het vergroten van de wendbaarheid van begrippen is een opbouw nodig van eenvoudige (school)situaties naar complexe (praktijk)situaties. Daarbij zullen de leerlingen ook in complexe praktijksituaties moeten leren afzien van ongewenste denkbeelden. In plaats van het gebruik van die denkbeelden moeten leerlingen leren realistische situaties te vereenvoudigen tot geïdealiseerde situaties, althans voor zover dat nodig is. Vervolgens moeten ze de gestelde vragen vakmatig beantwoorden en de resultaten daarvan terugvertalen naar de oorspronkelijke realistische situatie. Ze moeten dus vaardig worden in het 'heen en weer denken' tussen realiteit en vak, zoals ook Solomon (1983b) bepleit.

Het bijdragen aan herkenbaarheid en aan motivatie zijn belangrijke functies van contexten in onderwijs. Die functies pleiten vóór het gebruik van 'betekenisvolle' (dat komt vaak neer op complexe) realistische situaties, niet alleen als toepassing, na begripsontwikkelen onderwijs, maar meteen bij aanvang van het onderwijs. Er bestaat dus t.a.v. de keuze van contexten een spanningsveld tussen enerzijds het aantrekkelijk maken van het onderwijs en anderzijds de begripsontwikkeling. Dat betekent dat het gebruik van schoolcontexten en het gebruik van aan de realiteit ontleende situaties bij het ontwerpen van een begripsopbouw in relatie tot elkaar doordacht dienen te worden.

7.2.3 STS-doelstellingen en begripsontwikkeling

De thematische opzet van een lessenserie biedt een geschikte vorm om STS-doelstellingen na te streven. In de onderzochte energithema's hebben STS-doelstellingen te nadrukkelijk gedomineerd. Dat is ten koste gegaan van de begripsontwikkeling die

voor leerlingen in de bovenbouw van het VWO vereist is. STS-doelstellingen en begripsontwikkeling ondersteunen elkaar niet zonder meer, maar er bestaat een zekere spanning tussen beide.

Voor het realiseren van STS-doelstellingen zijn naast kernbegrippen uit het vakgebied ook meer contextgebonden vakbegrippen nodig. Wat het natuurkundeonderwijs betreft denke men aan begrippen als rendement en 'energieverlies' in de context 'energiegebruik en energievoorziening', aan begrippen als stralingsdosis of stralingsnormen in de context 'de risico's van ioniserende straling' of aan begrippen als rol- en luchtweerstand of remweg in de context 'verkeersveiligheid'. Ook voor het ontwikkelen van deze begrippen zijn in eerste instantie eenvoudige situaties nodig. Die zullen binnen de genoemde contextgebieden gevonden moeten (en kunnen) worden.

7.2.4 het thema/blok-model: praktijkgericht en vakstructuurgericht

Met betrekking tot begripsontwikkeling was de gedachte achter het thema/blok-model dat een kernbegrip contextgebonden, maar niettemin vakmatig correct ('praktijkgericht') ontwikkeld zou kunnen worden in het thema om daarna, in het vakstructuurgerichte blok, de ontwikkelde relaties fysisch/mathematisch te 'verdiepen' en wendbaar te maken (te 'verbreden'). Ons onderzoek heeft opgeleverd dat deze gedachte in zijn algemeenheid onjuist is. Dat hangt samen met het feit dat de contexten in het thema uit één contextgebied gekozen worden. Die eenzijdigheid vergroot de kans op een blokkade van de begripsontwikkeling.

Het is de vraag of de hierboven genoemde manier om een blokkade te voorkomen, namelijk het opbouwen van een kernbegrip aan de hand van eenvoudige schoolsituaties, wel binnen het thema/blok-model gerealiseerd kan worden. Levert het idealiseren van praktijksituaties uit het contextgebied van het thema wel voldoende geschikte en vooral afwisselende situaties op? En als die gevonden zijn, gaat het effect van een gevarieerde begripsopbouw dan niet gedeeltelijk verloren als de toepassingsituaties eenzijdig gekozen worden?

Ons onderzoek heeft geen argumenten opgeleverd voor een thema/blok-structuur van het curriculum die betrekking hebben op de ontwikkeling van kernbegrippen uit een vakgebied. Als de thema/blok-structuur gekozen wordt moet die keuze vanuit andere doelstellingen gemotiveerd worden en moet ermee rekening gehouden worden dat er aan de begripsontwikkeling van leerlingen wellicht geen al te hoge eisen gesteld kunnen worden.

We merken hier nog op dat de afweging tussen praktijkgericht en vakstructuurgericht moet worden toegesneden op de capaciteiten van de leerlingen en de nagestreefde doelstellingen in de betreffende schoolsoort. Er zijn schoolsoorten waarin het ontwikkelen van wendbare kernbegrippen (in eerste instantie) minder nadruk hoeft te krijgen dan in de bovenbouw van het VWO. In die schoolsoorten kan het gebruik van thema's (al dan niet in combinatie met blokken) mogelijk en zelfs wenselijk zijn.

7.2.5 conclusie

Het thema/blok-model is niet zonder meer een goede structuur voor een realiteitsgericht curriculum dat de ontwikkeling van wendbaar te gebruiken kernbegrippen bij leerlingen nastreeft. De opbouw in zo'n curriculum dient in ieder geval voor een belangrijk deel vakstructuurgericht te zijn: een stapsgewijze toename van de abstractie van begrippen (bijvoorbeeld in de vorm van het gebruik van steeds abstracter conceptualisaties van een begrip) gecombineerd met een opbouw van eenvoudige (school)contexten naar complexe (praktijk)contexten in elk van de opeenvolgende stappen. Daarbij is het gebruik van afwisselende contexten vereist. In hoeverre zo'n opbouw aangevuld moet worden met een praktijkgericht deelcurriculum hangt af van andere overwegingen dan het bereiken van begripsontwikkeling, met name motivatie en herkenbaarheid voor leerlingen en het nastreven van STS-doelstellingen.

7.3 Tot slot

In deze slotparagraaf geven we puntsgewijs een aantal conclusies en aanbevelingen die aan dit onderzoek ontleend zijn en die uit gaan boven het specifieke terrein van het onderzoek, het natuurkundige energiebegrip en de thema/blok-structuur van het curriculum.

1. We hebben gevonden dat leerlingen vaak een gedachtengang volgen die afwijkt van die welke in lesmateriaal is voorzien en die ook voor ervaren leraren verrassend is. Ze kunnen zo'n gedachtengang flexibel gebruiken en er nieuwe begrippen in opnemen. Leerlingen doen vaak niet "zo maar wat". Hun gedachtengang vertoont niet zelden veel meer samenhang en consistentie dan leraren en andere onderwijsdeskundigen denken. Dat kan verklaren waarom veel met het schoolvak strijdige denkbeelden hardnekkig zijn en tegen onderwijs bestand zijn.
2. Inzicht in de gedachtengang van leerlingen kan slechts verkregen worden door intensieve bestudering van protocollen van (tenminste de verbale uitingen) van leerlingen en leraren in discussie met elkaar. Om zicht te krijgen op de samenhang in denkbeelden dienen enkele leerlingen gedurende langere tijd, bijvoorbeeld een lessenserie, gevolgd te worden. De analyse van schriftelijke uitingen tijdens het onderwijs (aantekeningen, experimentverslagen, proefwerkantwoorden) vormen een goede aanvulling op dergelijke protocollen en geven mogelijkheden tot verbreding van de resultaten tot een grotere groep leerlingen.
3. De resultaten van zo'n protocolonderzoek kunnen aangevuld en verbreed worden met een 'vragenlijstonderzoek' waarin grotere groepen leerlingen betrokken worden. Hoewel zo'n onderzoek reeds in een oriënterende fase zinvol kan zijn, verdient het aanbeveling het pas te entameren als er zicht is op samenhang tussen leerlingdenkbeelden. Een goede afstemming op het protocolonderzoek is dan verzekerd.
4. We hebben voorbeelden gevonden dat leraren en leerlingen elkaar kunnen misverstaan, terwijl zij toch beiden hun best doen om elkaar te begrijpen. Ze

- gebruiken vaak dezelfde termen, terwijl ze er iets anders mee bedoelen. Dergelijke misverstanden kunnen in het onderwijs slechts opgelost worden als leraren bekend zijn met mogelijke gedachtengangen van leerlingen rond het betreffende begrip.
5. Voor leraren vereist zowel het verkrijgen van inzicht in mogelijke gedachtengangen van leerlingen als van vaardigheid in het scheppen van productieve discussiesituaties een specifiek op begripsontwikkeling toegesneden scholing. Dat geldt niet alleen voor docenten in de opleiding maar ook voor ervaren leraren.
 6. Het is waarschijnlijk mogelijk aan de hand van bij leerlingen gevonden gedachtengangen in lesmateriaal een zodanige begripsopbouw uit te werken dat een groot deel van de leerlingen de aangeboden begrippen parallel aan de begripsopbouw ontwikkelen. Het kan in zo'n begripsopbouw wenselijk zijn in eerste instantie 'aangepaste', vanuit het vak gezien onvolledige, formuleringen te gebruiken omdat de gebruikelijke formuleringen die uit de vakgebied voortkomen bij leerlingen in een vroeg ontwikkelingsstadium ongewenste betekenissen kunnen krijgen die de begripsontwikkeling blokkeren.
 7. Voor het ontwikkelen van abstracte kernbegrippen uit een vakgebied is het gebruik van eenvoudige, op het verhelderen van het begrip toegesneden (en eventueel 'geïdealiseerde') situaties van groot belang. Het nastreven van STS-doelen tegelijk met het opbouwen van een abstract kernbegrip ondersteunt de begripsontwikkeling niet zonder meer en is er zelfs mee in strijd als dat leidt tot het gebruik van complexe praktijksituaties in de begripsvormende fase van het onderwijs.
 8. Het verdient aanbeveling het onderzoek naar realiteitsgericht onderwijs voort te zetten. Vooral het vergelijken van de begripsontwikkeling in zulk onderwijs met gangbaar onderwijs en het vergelijken van het gebruik van abstracte kernbegrippen als energie in verschillende schoolvakken zou een waardevolle bijdrage kunnen leveren, niet alleen aan het vermeerderen van de kennis over het leren van leerlingen, maar ook aan de verdere verbetering van de begripsopbouw in lesmateriaal en in feitelijk onderwijs.

Literatuur

- Aalst, H.F. van (1986). Waar doen we het eigenlijk voor? In H.M.C.Eijkelfhof e.a. (red.), *Op weg naar vernieuwing van het natuurkundeonderwijs* (pp. 12-15). 's Gravenhage: SVO.
- Aikenhead, G. (1985). Science Curricula and social responsibility. In R.Bybee (ed.), *Science, technology and society, 1985 Yearbook NSTA* (pp.3-18). Washington: NSTA.
- Andersson, B. and C.Kärrqvist (1983). How Swedish pupils, aged 12-15 years, understand light and its properties. *European Journal of Science Education*, 5, 4, 387-402.
- Arons, A.B. (1989). Developing the energy concepts in introductory physics. *The Physics Teacher*, 506-517.
- ASE (1981). *Education through Science*. Hatfield (UK): ASE.
- Bergen, H. van (1986). PLON in VWO-bovenbouw: een (gewaagde) stap (vooruit)? In H.M.C. Eijkelfhof e.a. (red.), *Op weg naar vernieuwing van het natuurkundeonderwijs* (pp.235-241). 's Gravenhage: SVO.
- Biezeveld, H. en L.Mathot (1987). *Scoop, natuurkunde voor de bovenbouw 5/6VWO*. Groningen: Wolters Noordhoff.
- BINAS (1986). *BINAS Informatieboek VWO-HAVO voor het onderwijs in de natuurwetenschappen* (G.Verkerk e.a., red.). Groningen: Wolters-Noordhoff.
- Bliss, J. and J.Ogborn (1985). Children's choices of use of energy. *European Journal of Science Education*, 7, 2, 195-203.
- BMD (1983). *Verslag van de Brede Maatschappelijke Discussie over Energie*. Den Haag: BMD.
- Boersma, K.Th., P.Licht, P.L.Lijne en W. de Vos (red.)(1990). *Begripsontwikkeling in het vak natuur- en scheikunde in de basisvorming*. Enschede: SLO.
- Brinke, J.S. ten en H.P.Hooymayers (1986). Over de stand van de ontwikkeling van vakdidactisch onderzoek. In J.S.ten Brinke, H.P.Hooymayers en G.Kanselaar (red.), *Vakdidactiek en informatietechnologie in curriculumontwikkeling* (pp.3-18). Lisse: Swets & Zeitlinger.
- Brook, A. and R.Driver (1984). *Aspects of secondary student's understanding of energy: full report*. Leeds: University of Leeds.
- Buck, P. (1984). Kontextanalyse des Energiebegriffs. *Physica Didactica*, 11, 175-195.
- Carey, S. (1985). *Conceptual change in childhood*. Cambridge (Mass.): MIT Press.
- CLIS (Children's Learning in Science Project) (1987). *Approaches to Teaching Energy*. Leeds: University of Leeds.

- Cohen, J. (1977). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. New York: Academic Press.
- Corte, E. de (1990). Ontwerpen van krachtige leeromgevingen. In M.J.Ippel en J.J.Elshout (red.), *Training van hogere-orde denkprocessen, Bijdragen aan de onderwijsresearch no.32* (pp.133-147). Amsterdam/Lisse: Swets & Zeitlinger.
- Creemers, B.P.M. (1991). *Effectieve instructie: een empirische bijdrage aan de verbetering van het onderwijs in de klas*. Den Haag: SVO.
- Van Dale (1985). *Groot Woordenboek der Nederlandse Taal*, elfde herziene druk. Utrecht/Antwerpen: Van Dale Lexicografie.
- DBK-na (1985). *Natuurkunde voor de tweede klas MAVO, HAVO, VWO*. Den Bosch: Malmberg.
- Dekker, J.A. and A.E.van der Valk (1986). Pre-university physics presented in a thematic and systematic way. *European Journal of Science Education*, 8, 2, 145-153.
- Dijksterhuis (1950). *De mechanisering van het Wereldbeeld*. Amsterdam: Meulenhoff.
- Driel, J. van (1990). *Betrokken bij evenwicht* (diss.). Utrecht: CD-β Press.
- Driver, R. (1988). Changing conceptions. *Tijdschrift voor Didactiek der β-wetenschappen*, 6, 3, 161-198.
- Driver, R., E.Guesne and A.Tiberghien (eds.)(1985). *Children's ideas in science*. Milton Keynes: Open University Press.
- Driver, R. and R.Millar (1986). *Energy Matters*. Leeds: University of Leeds.
- Duit, R. (1984a). *Der Energiebegriff im Physikunterricht*. Kiel: IPN.
- Duit, R. (1984b). Learning the energy concept in school – empirical results from the Philippines and West Germany. *Physics Education*, 19, 59-66.
- Duit, R., W.Jung und C. von Rhöneck (1985). *Aspects of understanding electricity*. Kiel: IPN (IPN-Arbeitsberichte 59).
- Eijkelhof, H.M.C. (1990). *Radiation and risk in physics education* (diss.). Utrecht: CD-β Press.
- Eijkelhof, H.M.C., E.Boeker, J.H.Raat and N.J.Wijnbeek (1978). *Natuurkunde in de samenleving*. Amsterdam: VU-uitgeverij.
- Eijkelhof, H.M.C., E.Holl, B.Pelupessy, A.E.van der Valk, P.A.J.Verhagen en R.F.A.Wierstra (red.)(1986). *Op weg naar vernieuwing van het natuurkunde-onderwijs*. 's Gravenhage: SVO.
- Elkana, Y. (1974). *The discovery of the conservation of energy*. Cambridge: Harvard University Press.
- Feynman, R.P., R.B.Leighton and M.Sands (1963). *The Feynman Lectures on Physics*, Volume I. Reading, USA: Addison-Wesley.
- Freudenthal, H. (1990). Mijmeringen over mechanica-onderwijs. *Tijdschrift voor Didactiek der β-wetenschappen*, 8, 4, 222-248.
- Genderen, D. van (1989). *Mechanica - Onderwijs in Beweging* (diss.). Utrecht: WCC.
- Gilbert, J.K., R.J.Osborne and P.J.Fensham (1982). Children's science and its consequences for teaching. *Science Education*, 66, 4, 623-633.

- Gravenberch, F.L. (1986). Examenconstructie in HAVO-bovenbouw. In H.M.C. Eijkelhof e.a. (red.), *Op weg naar vernieuwing van het natuurkundeonderwijs* (pp.348-356). Den Haag: SVO.
- Gravenberch, F.L. en Th.Wubbels (1980). Voorschoolse beelden en kernvoorstellingen in het natuurkundeonderwijs. *Faraday* 49, 3, 187-192.
- Gravenberch, F.L., P.Licht en A.E.van der Valk (red.)(1990). *Het Project Bovenbouw Natuurkunde*. Enschede: SLO.
- Hiele, P.M. van (1973). *Begrip en Inzicht*. Purmerend: Muusses.
- Hondebrink, J. (1990). Exacte keuze examen 1988, *NVON Maanblad* 15, 1, 10.
- Hooymayers, H.P. (1986). Verwachtingen van leraren en PLON-opbrengsten. In H.M.C.Eijkelhof e.a. (red.), *Op weg naar vernieuwing van het natuurkundeonderwijs* (pp.23-36). Den Haag: SVO.
- Hooymayers, H.P., P.L.Lijnse en W. de Vos (1989). *Basisvorming Natuur/scheikunde*. Leiden: Stenfert Kroese/Martinus Nijhoff.
- International Journal of Science Education (1989). Special Issue: students' conceptions in science. *International Journal of Science Education*, 11, 5.
- Jager, H.de, J.Koole en F. van der Loo (1987). *Interviews met leerlingen*. Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, NME-VO.
- Jardine, J. (1964). *Natuurkunde ... Doen!* deel 1HV. Nederlandse vertaling door D.van Genderen en A.Polman. Kampen: Kok.
- Jaspers, M.A.M. (1977). Acupunctuur. *Natuur en Techniek*, 45, 632-645.
- Jong, O. de. (1990). *Rekenen aan reacties* (diss.). Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, Vakgroep Chemie Didactiek.
- Kanselaar, G. (1989). *Leren en onderwijzen in context*, inaugurele rede. Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, ISOR.
- Kanselaar, G. (1990). Appels, peren, fruit. In P.L.Lijnse and W. de Vos (red.), *Didactiek in perspectief* (pp.31-39). Utrecht: CD-β Press.
- Koole, J., F.van der Loo en G.van Gerner (1988). *Onderzoeksverslag 'Energiehuishouding'*. Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, NME-VO.
- Kortland, J. en F.van der Loo (1968). Natuurkunde als gereedschap bij besluitvorming. In H.M.C.Eijkelhof e.a. (red.), *Op weg naar vernieuwing van het natuurkundeonderwijs* (pp.66-77). Den Haag: SVO.
- Lange, J. de (1987). *Mathematics: Insight and Meaning* (diss.). Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, vakgroep OW&OC.
- Lehrman, R.L. (1973). Energy Is Not The Ability To Do Work. *The Physics Teacher* 11, 15-18.
- Lewis, J.L. (1981). *Science in society, teacher's guide and readers*. Londen/Hatfield: Heinemann/Association for Science Education.
- Licht, P. (1988). De ontwikkeling van een diagnostisch instrument voor de vaststelling van specifieke intuïtieve ideeën over spanning en stroom. *Tijdschrift voor Didactiek der β-wetenschappen*, 6, 99-115.

- Licht, P. (1990). De beproeving van een onderwijsstrategie voor de ontwikkeling van kernbegrippen in de elektriciteitsleer. In F.L.Gravenberch, P. Licht en A.E.van der Valk (red.), *Het Project Bovenbouw Natuurkunde* (pp.42-53). Enschede: SLO.
- Lijnse, P.L. (1981). Schoolbeeld of straatbeeld: over onderzoek naar begripsmoeilikheden van leerlingen bij het leren van mechanica. In *Zoeklicht op de mechanica, verslag van de Woudschotenconferentie 1981* (pp.56-80). Utrecht: Werkgroep Natuurkunde Didactiek.
- Lijnse, P.L. (1986a). Onderzoekt alle dingen en behoud het goede. In H.M.C.Eijkkelhof e.a. (red.), *Op weg naar vernieuwing van het natuurkundeonderwijs* (pp.308-321). Den Haag: SVO.
- Lijnse, P.L. (1986b). Energie tussen leefwereld en vakstructuur, In J.S.ten Brinke, H.P.Hooymayers en G.Kanselaar *Vakdidactiek en informatietechnologie in curriculumontwikkeling* (pp.75-87). Lisse: Swets & Zeitlinger.
- Lijnse, P.L. (1990). Preconcepten, begripsontwikkeling en basisvorming natuur- en scheikunde. In K.Boersma e.a. (red.), *Begripsontwikkeling in het vak natuur- en scheikunde in de basisvorming* (pp.15-38). Enschede: SLO, Studies in leerplanontwikkeling.
- Lochhead, J. (1979). On learning to balance perceptions by conceptions: a dialogue between two science students. In J.Lochhead and J.Clement (eds.), *Cognitive Process Instruction*. Philadelphia: The Franklin Institute.
- Mantei, U. und P.Täubert (1981). Zustandsgröße und Prozeßgröße erläutert am Beispiel Energie - Arbeit, Wärme, Strahlung. *Physik in der Schule*, 20, 307-317.
- McClelland, J.A.G. (1989). Energy in school science. *Physics Education*, 24, 162-164.
- Middelink, J.W. (1978). *Systematische natuurkunde delen A, B, C en D*. Apeldoorn: Uitgeverij van Walraven bv.
- Novak, J.D. (1989). The use of metacognitive tools to facilitate meaningful learning. In: Ph.Adey e.a. *Adolescent development and school science* (pp.225-238). London: Falmer Press.
- NSTA (1982). *Science-technology-society: science education for the 1980's, position statement*. Washington: NSTA.
- Nunnally, J.C. (1967). *Psychometric theory*. New York: McGraw-Hill.
- Ogborn, J. (1981). Teaching about energy. In G.Marx (ed.), *Nuclear Physics, Nuclear Power, the Girep Conference 1981* (pp.321-336). Budapest, Eötvös University.
- O&W (1976). *Examenprogramma Natuurkunde voor het vwo*, Besluit AVO/I 612.931 d.d. 25 mei 1977. Den Haag: Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen.
- O&W (1989a). Eindexamenprogramma's en staatsexamenprogramma's voor het vak natuurkunde voor vwo en HAVO, *Uitleg, O&W-regelingen*, 21, 3-48.
- O&W (1989b). *Advies over de voorlopige eindtermen basisvorming in het voortgezet onderwijs*. Zoetermeer: Ministerie van O&W.

- Parreren, C.F. van (1974). Het functioneren van leerresultaten. In C.F. van Parreren en J. Peek, *Informatie over leren en onderwijzen* (pp.114-133). Groningen: Tjeenk Willink.
- Pelupessy, B. (1986). Leren met en van elkaar. In H.M.C.Eijkelhof e.a. (red.), *Op weg naar vernieuwing van het natuurkundeonderwijs* (pp.103-110). 's-Gravenhage: SVO.
- PLON (1981). *Thema Energie thuis*. Zeist: NIB.
- PLON (1983). *Voorstel tot een Experimenteel PLON Examen Programma VWO*. Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, PLON.
- PLON (1983). *Thema Energie en Kwaliteit*, Zeist: NIB
- PLON (1983). *Thema Verkeer*, Zeist: NIB
- PLON (1984). *VWO-voortgangskonferentie 'op weg naar samenhang'*. Utrecht: PLON
- PLON (1985a). *Blok Arbeid en Energie*. Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, PLON
- PLON (1985b). *Lerarenhandleiding bij blok Arbeid en Energie*. Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, PLON.
- PLON (1986). *Energie, een thema voor 4/5 VWO*. Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, PLON.
- Poorthuis, H., E.Payens en A.E. van der Valk (1988a). *Thema Energievoorziening*. Enschede: SLO.
- Poorthuis, H., E.Payens en A.E. van der Valk (1988b). *Blok Arbeid en Energie*. Enschede: SLO.
- Posner, G.J., K.A.Strike, P.W.Hewson and W.A.Gertzog (1982). Accomodation of a scientific conception: Towards a theory of conceptual change. *Science Education*, 66, 2, 211-227.
- Resnick, L. (1988). Learning in school and out. *Educational Researcher*, 16, 9, 13-20.
- Richmond, P.E. (1982). Teaching about energy. *Physics Education*, 17, 193-194.
- Richmond, P.E. (1983). Teaching about energy. *Physics Education*, 18, 56.
- Roest, J.F. (1968). *Algemene Scheikunde*. Utrecht: Het Spectrum, Aula reeks.
- Russelman, G.H.E. (1983). *Van James Watt tot Sigmund Freud*. Deventer: Van Loghum Slaterus.
- Schutz, A. and Th.Luckmann (1974). *The structures of the life-world*. Londen: Heinemann.
- Schweers, J. en P. van Vianen (1981). *Natuurkunde op corpusculaire grondslag deel 3v*. 's Hertogenbosch: Malmberg.
- Sexl, R.U. (1981). Some observations concerning the teaching of the energy concept. *European Journal of Science Education*, 3, 285-289.
- Sherwood, B.A. (1983). Pseudowork and real work. *American Journal of Physics*, 51, 7, 597-602.
- Solomon, J. (1983a). *Science in a Social Context*, Oxford/Hatfield: Basil Blackwell/Association for Science Education.
- Solomon, J. (1983b). Learning about energy. How pupils think in two domains. *European Journal of Science Education*, 5, 49-59.

- Solomon, J. (1983c). Messy, contradictory and obstinately persistent: a study of childrens' out of school ideas about energy. *School Science Review*, 65, 225-233.
- Solomon, J. (1984). Alternative views on energy. *Physics Education*, 19, 56.
- Solomon, J. (1986). Energy for the citizen. In R.Driver and R.Millar, *Energy Matters* (pp.25-31). Leeds: University of Leeds.
- SPSS INC. (1986). *SPSSx, 2nd Edition*. New York, McGraw-Hill.
- Stead, B. (1980). *Energy, Learning in Science Project*, Working paper 17. Hamilton (N.Z.): University of Waikato .
- Streefland, L. (1988). *Realistisch breukenonderwijs* (diss.). Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, vakgroep OW&OC.
- Strike, K.A. and G.J.Posner (1985). A conceptual change view of learning and understanding. In L.H.T.West and A.L.Pines (eds.), *Cognitive structure and conceptual change* (pp.211-231). Orlando (Flor.): Academic Press.
- Swanborn, P.G. (1987). *Methoden van sociaal-wetenschappelijk onderzoek*. Meppel: Boom.
- Treffers, A. (1986). *Three dimensions*. Dordrecht: Reidel.
- Treffers, A. (1990a). Wiskunde-onderwijstheorie of β -onderwijstheorie. In P.L.Lijnse en W. de Vos (red.), *Didactiek in perspectief* (pp.156-172). Utrecht: CD- β Press.
- Treffers, A. (1990b). *Het voorkomen van ongecijferdheid op de basisschool* (oratie). Utrecht: Universiteit Utrecht, vakgroep OW&OC.
- Valk, A.E. van der (1986a). Naar een VWO-curriculum met blokken tussen de thema's. In H.M.C. Eijkelhof e.a. (red.), *Op weg naar vernieuwing van het natuurkundeonderwijs* (pp.173-182). Den Haag: SVO.
- Valk, A.E. van der (1986b). Regels en instrumenten voor thema-ontwikkeling. In H.M.C.Eijkelhof e.a. (red.), *Op weg naar vernieuwing van het natuurkundeonderwijs* (pp.183-199). Den Haag, SVO.
- Valk, A.E. van der, H.Poorthuis en E.Payens (1987). *Blauwdruk thema Energievoorziening*, Enschede: SLO (intern stuk Project Bovenbouw Natuurkunde, kenmerk 24/3639/10/87-949).
- Valk, A.E. van der, H.Poorthuis en E.Payens (1988). *Blauwdruk blok Arbeid en Energie*, Enschede: SLO (intern stuk Project Bovenbouw Natuurkunde, kenmerk AVO/324/10/88-468).
- Valk, A.E.van der en P.L.Lijnse (1986). *Aanvraag voor subsidie aan SVO: Begripsontwikkeling bij leerlingen in realiteitsgericht natuurkundeonderwijs*. Utrecht, Rijkuniversiteit Utrecht, Vakgroep Natuurkunde Didactiek.
- Valk, A.E. van der en P.L.Lijnse (1988). *Vervolgaanvraag voor subsidie aan SVO: Begripsontwikkeling bij leerlingen in realiteitsgericht natuurkundeonderwijs*. Utrecht, Rijkuniversiteit Utrecht, Vakgroep Natuurkunde Didactiek.
- Valk, A.E. van der, H.M.J.Bruijns, P.L.Lijnse en R.Taconis (1988). *Begripsontwikkeling bij leerlingen in realiteitsgericht natuurkundeonderwijs, eerste ronde, interimverslag van SVO-project 6085 deel A*. Utrecht. Rijksuniversiteit Utrecht, Vakgroep Natuurkunde Didactiek.

- Valk, A.E. van der, R.Taconis en P.L.Lijnse (1989). *Begripsontwikkeling bij leerlingen in realiteitsgericht natuurkundeonderwijs, eerste ronde, interimverslag van SVO-project 6085 deel B*. Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, Vakgroep Natuurkunde Didactiek.
- Valk, A.E. van der, H.F.H.Bormans, P.L.Lijnse en P.Licht (1990). Ontwikkeling van het energiebegrip bij leerlingen in een thema/blok-curriculum. In F.L.Gravenberch e.a. (red.), *Het Project Bovenbouw Natuurkunde* (pp.23-41). Enschede: SLO.
- Valk, A.E. van der, P.L.Lijnse, H.F.H.Bormans and R.Taconis (1990). The need for a particulate description of macroscopic energy phenomena. In P.L.Lijnse e.a. (eds.), *Relating Macroscopic Phenomena to Microscopic Particles* (pp.294-303). Utrecht: CD-β Press.
- Verhagen, P. (1986). Curriculumconstructie - schrijfgroep of ontwikkelteam?. In H.M.C. Eijkelhof e.a. (red.), *Op weg naar vernieuwing van het natuurkundeonderwijs* (pp.205-221). Den Haag: SVO.
- Viennot, L. (1979). Spontaneous reasoning in elementary mechanics. *European Journal of Science Education*, 1, 205-221.
- Vogelezang, M.J. (1990). *Een onverdeelbare eenheid* (diss.). Utrecht: CD-β Press.
- Voorde, H.H. ten (1977). *Verwoorden en verstaan* (diss.). Den Haag: SVO.
- Vos, W. de (1985). *Corpuscula delicti* (diss.). Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, Vakgroep Scheikunde Didactiek.
- Vos, W. de en A.H.Verdonk (1991). Vakstructuur, steunpilaar of sta-in-de-weg?. *Tijdschrift voor didactiek der β-wetenschappen*, 9, 2, 97-108.
- Warren, J. (1982). The nature of energy. *European Journal of Science Education*, 4, 295-297.
- Warren, J. (1983). Energy and its carriers: a critical analysis. *Physics Education*, 18, 209-212.
- Watts, D.M. (1983). Some alternative views of energy. *Physics Education*, 18, 213-217.
- Watts, D.M. and J.K.Gilbert (1983). Enigmas in school science: students' conceptions for scientific associated words. *Research in Science and Technology Education*, 1, 161-171.
- Wester, F. (1987). *Strategieën voor kwalitatief onderzoek*. Muiderberg: Coutinho.
- Westerhout, R. (1990). Nieuwe inhoud en examenprogramma. *Bulletin voor het onderwijs in de biologie*, 21, 127, 134-139.
- WEN (1985). *Examenprogramma natuurkunde MAVO, advies*. Enschede: Werkgroep Examenprogramma's Natuurkunde.
- WEN (1988). *Examenprogramma natuurkunde VWO en HAVO, advies*. Enschede: Werkgroep Examenprogramma's Natuurkunde.
- Wierstra, R.F.A. (1990). *Natuurkunde tussen leefwereld en vakstructuur* (diss.). Utrecht: CD-β Press.

-
- Wubbels, Th. (1986). Elementaire begrippen in de geometrische optica: leerlingen-
voorstellingen en schoolboekteksten. *Tijdschrift voor didactiek der β -wetenschap-
pen*, 4, 1, 19-37.
- Yager, R.E. and H.Hofstein (1985). Defining enlarged boundaries for school science.
European Journal of Science Education, 7, 345-352.

Bijlagen

Bijlage 1: De inhoudsopgave van het thema 'Energie'

Oriëntatiedeel	E1 ¹⁾ Oriëntatie	1
	E1.1 Energie in ons dagelijks leven	1
	E1.2 Energiegebruik in Nederland	1
	E1.3 Scenario's	1
	E1.4 Verschil van mening	1
	E1.5 Energieverlies bestaat niet	1
	E1.6 Het thema 'Energie'	1
Basisdeel	E2 Rendement	1
	E2.1 Inleiding	1
	E2.2 Energiesoorten	1
	E2.3 Arbeid	1
	E2.4 Experimenten met energieomzeters	1
	E2.5 Oefenopgaven	1
	E2.6 Model en werkelijkheid	1
	E3 Degradatie van energie	1
	E3.1 Wet van behoud van energie	1
	E3.2 De kwaliteit van energie	1
	E3.3 Warmtemachines	1
	E3.4 Warmte en thermische energie: de Eerste Hoofdwet	1
	E3.5 Nogmaals de Tweede Hoofdwet	1
Keuzedeel	E4 Energievoorziening	1
	E5 Electriciteitscentrales (kolen- tegenover kern-)	1
	E6 Warmte-kraft-koppeling	1
	E7 Windenergie	1
	E8 Zonne-energie	1
	E9 Isolatie	1
Afrondingsdeel	E10 Het jaar 2000	1

1. We zullen de hoofdstukken en paragrafen van het thema 'Energie' (PLON 1986) steeds aanduiden met hun nummer en een E ervoor.

Bijlage 2: De inhoudsopgave van het blok 'Arbeid en Energie' (1985)

A1²⁾ Oriëntatie

- A1.1 Het begrip systeem
- A1.2 Energiesoorten en energieoverdracht
- A1.3 Wat is arbeid?
- A1.4 De energievergelijking van een systeem
- A1.5 Een formule voor arbeid
- A1.6 Samenvatting

A2 Arbeid uitrekenen

- A2.1 Rekening houden met richtingen
- A2.2 Kracht als vektor
- A2.3 Arbeid en vektorrekening
- A2.4 Arbeid door een veranderlijke kracht
- A2.5 Arbeid langs een kromme weg
- A2.6 Samenvatting
- A2.7 Problemen

A3 Arbeid gebruiken

- A3.1 Een energievergelijking opstellen
- A3.2 Verandering van kinetische energie
- A3.3 Netto kracht en netto arbeid
- A3.4 De schuifwrijvingskracht als een zich aanpassende kracht
- A3.5 Zwaarte-energie
- A3.6 Conservatieve krachtvelden
- A3.7 Potentiële energie
- A3.8 De veerkracht als conservatieve kracht
- A3.9 Arbeid door actie- en reactiekracht
- A3.10 Problemen

2. We zullen de hoofdstukken en paragrafen van het blok 'Arbeid en Energie' (PLON 1986) steeds aanduiden met hun nummer en een A ervoor.

Bijlage 3: De inhoudsopgave van het thema 'Energievoorziening'

- Oriëntatiedeel** EV1 Oriëntatie
- EV1.1 Energie in ons dagelijks leven
 - EV1.2 Energieverbruik in Nederland
 - EV1.3 Betrokkenen bij energievoorziening
 - EV1.4 Wat weet je (al/nog) van energie?
 - EV1.5 De opzet van het thema
- Basisdeel**
- EV2 Energie verbruiken
 - EV2.1 Energieverbruik in een huishouden
 - EV2.2 Verwarmen en isoleren
 - EV2.3 Bewegen en stroomlijnen
 - EV2.4 Verlichten, reflecteren en absorberen
 - EV2.5 Samenvatting en eindopgaven
 - EV3 Energie bruikbaar maken
 - EV3.1 Apparaten als energieverbruikers en -producenten
 - EV3.2 Experimenten:
 - EV3.3 Rendement verbeteren
 - EV3.4 Samenvatting en eindopgaven
 - EV4 Elektriciteitsproductie
 - EV4.1 Bijzondere plaats van elektriciteit
 - EV4.2 Transport van elektrische energie
 - EV4.3 De kolencentrale
 - EV4.4 Andere produktiemethoden
 - EV4.5 Samenvatting en eindopgaven
 - EV5 Energie opslaan en terugwinnen
 - EV5.1 Opslagsystemen voor elektriciteitsvoorziening
 - EV5.2 Opslagsystemen voor voertuigen
 - EV5.3 Opslagsystemen voor huisverwarming
 - EV5.4 Systeemkeuze, rendement en behoud
 - EV5.5 Experimenten met opslag-energiesoorten
 - EV5.6 Samenvatting en eindopgaven
 - EV6 Energie opnieuw gebruiken
 - EV6.1 Afvalwarmte gebruiken
 - EV6.2 Grenzen voor het opnieuw gebruiken
 - EV6.3 Samenvatting en eindopgaven
- Afrondingsdeel** EV7 Van energie voorzien
- EV7.1 Energieverbruik: problemen en oplossingen
 - EV7.2 Energievoorziening: problemen en oplossingen
 - EV7.3 Terugblik op energie

Bijlage 4: De inhoudsopgave van het blok 'Arbeid en Energie' (1988)

AE1³⁾ Oriëntatie

- AE1.1 Mens en machine als arbeidsbron
- AE1.2 Wat weet je van arbeid en energie?
- AE1.3 Waarover gaat dit blok?
- AE1.4 Opzet van dit blok

AE2 Arbeid en bewegingsenergie

- AE2.1 Translatie-energie
- AE2.2 Wrijving
- AE2.3 Kracht en energie
- AE2.4 Rotatie-energie
- AE2.5 Samenvatting en eindopgaven

AE3 Arbeid en potentiële energie

- AE3.1 Zwaarte-energie en arbeid
- AE3.2 Zwaarte-energie en translatie-energie
- AE3.3 Veerenergie
- AE3.4 Onveerkrachtig vervormen
- AE3.5 Samenvatting en eindopgaven

AE4 Arbeid, warmte en moleculaire energie

- AE4.1 Moleculaire beschrijving
- AE4.2 Arbeid en temperatuurverandering
- AE4.3 Arbeid en faseverandering
- AE4.4 Samenvatting en eindopgaven

AE5 Interne arbeid en afzetkrachten

- AE5.1 Interne arbeid
- AE5.2 Afzetkrachten
- AE5.3 Samenvatting en eindopgaven

AE6 Arbeid en energie

- AE6.1 Algemene energievergelijking
- AE6.2 Probleem oplossen
- AE6.3 Probleemstellingen met deelopdrachten
- AE6.4 Problemen met één centrale vraagstelling

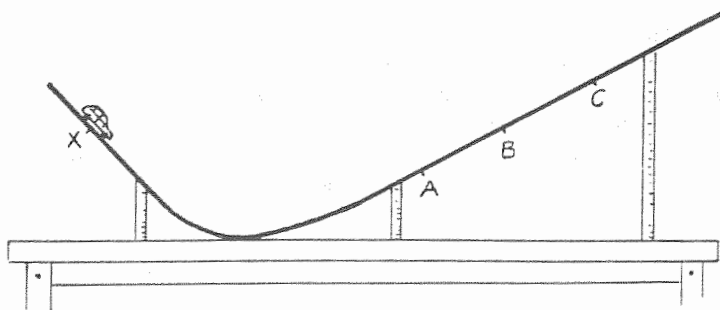
3. We zullen de hoofdstukken en paragrafen van het blok 'Arbeid en Energie' (Poorthuis e.a. 1988) steeds aanduiden met hun nummer en AE ervoor.

Bijlage 5: Vragenlijst 'Energie en Arbeid'**De A-lijst**

Je vindt hieronder situaties beschreven, waarover een vraag gesteld wordt. Je antwoord moet je kiezen uit drie keuzemogelijkheden. Bovendien vragen we je een motivering te geven. Voor ons is jouw motivering bij je antwoord het belangrijkste. Gebruik daarin zo mogelijk de begrippen kracht, energie, arbeid, of warmte.

versie 1**1. Speelgoedauto**

Een leerling zet een licht lopend, goed gestroomlijnd speelgoedautootje op een gladde baan, met het midden bij punt X, zoals getekend staat. Hier laat hij het autootje los.



Welk punt ligt het dichtst bij het uiterste punt, dat het autootje op de rechter helling bereikt?

a. *Kruis aan:*

- [1] Punt A;
- [2] Punt B;
- [3] Punt C.

b. *Motiveer je antwoord onder a.*⁴⁾

1. De drie regels antwoordruimte die in de vragenlijst aangegeven waren, zijn in deze bijlage bij alle vragen weggelaten.

2. Pan met soep

Een gesloten pan met een halve liter soep erin staat op een elektrisch verwarmingselement. Hierdoor wordt de soep op een constante temperatuur van 90°C gehouden. Dat kost per uur een bepaalde hoeveelheid elektriciteit. Iemand doet nog een halve liter soep in de pan. Na enige tijd is de temperatuur van de soep weer 90°C geworden.

Kost het per uur meer elektriciteit om (in plaats van een halve liter) een hele liter soep in de pan op 90°C te houden?

a. *Kruis aan:*

- [1] Ja, ongeveer twee maal zoveel;
- [2] Ja, iets meer;
- [3] Nee, precies evenveel.

b. *Motiveer je antwoord onder a.*

3. Haardroogkap

Haar kun je drogen door met het hoofd onder een elektrische haardroogkap te gaan zitten. Dit apparaat is voorzien van een verwarmingsspiraal en een ventilator, die de warme lucht onder de kap blaast. De volgende vraag gaat over een haardroogkap met een vermogen van 300W, die al geruime tijd aan staat. Er gaat 260W van het vermogen naar de verwarmingsspiraal en 40W is nodig om de ventilator te laten draaien.

Hoeveel van het verbruikte vermogen gaat dan in het opwarmen van de lucht zitten?

a. *Kruis aan:*

- [1] Meer dan 260W;
- [2] 260W;
- [3] Minder dan 260W.

b. *Motiveer je antwoord onder a.*

4. Kogel

Een schutter schiet met een geweer een kogel recht omhoog af. Het is windstil weer. Na het verlaten van de loop stijgt de kogel tot een bepaalde hoogte en valt dan weer naar beneden.

Wat gebeurt er met de energie, die de kogel bij het afschieten krijgt?

a. *Kruis aan:*

- [1] Die neemt af tot nul in het hoogste punt;
- [2] Die gaat op aan het op snelheid brengen van de kogel;
- [3] Die is nauwelijks afgenomen in het hoogste punt.

b. *Motiveer je antwoord onder a.*

5. Kaarsvet smelten

In een vuurvaste schaal wil iemand een stuk vast kaarsvet smelten. Hiertoe verwarmt hij de schaal met een gasvlam. Bij een temperatuur van 69°C , het smeltpunt van kaarsvet, begint het vet te smelten. Bij 69°C kunnen vast en vloeibaar kaarsvet naast elkaar bestaan.

Wanneer heeft het kaarsvet de meeste energie?

a. *Kruis aan:*

- [1] Tijdens het smelten;
- [2] Als al het kaarsvet net gesmolten is;
- [3] Het kaarsvet heeft steeds evenveel energie.

b. *Motiveer je antwoord onder a.*

6. Vallend stukje kalk

Op een bovenétage zet iemand een zwaar voorwerp hardhandig neer. Hierdoor raakt uit het plafond van de kamer eronder een stukje kalk los. De snelheid van het stukje kalk is na één meter vallen constant geworden.

Gedurende welk deel van zijn val krijgt het stukje kalk energie?

a. *Kruis aan:*

- [1] Gedurende de eerste meter van zijn val;
- [2] Gedurende zijn gehele val;
- [3] Het stukje kalk krijgt er geen energie bij.

b. *Motiveer je antwoord onder a.*

7. Boiler

Nadat iemand gedouched heeft, wordt een elektrische boiler opnieuw gevuld met 80 liter water, waarvan de temperatuur 10°C is. De boiler warmt het water op tot 90°C . Dit kost 8kWh energie.

Hoeveel van deze 8kWh blijft in het water zitten?

a. *Kruis aan:*

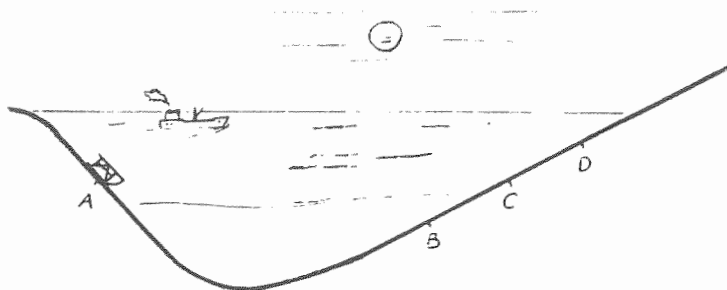
- [1] Iets minder dan 8kWh .
- [2] Niets;
- [3] Alles;

b. *Motiveer je antwoord onder a.*

versie 2

1. Slee

Een slee met zeer gladde ijzers wordt door een leerling vastgehouden op een eveneens zeer gladde sneeuwbaan tussen twee duintoppen. Het midden van de slee bevindt zich bij punt A, zoals getekend staat.



Welk punt ligt het dichtst bij het uiterste punt, dat de slee op de rechter helling bereikt?

a. *Kruis aan:*

- [1] Punt B;
- [2] Punt C;
- [3] Punt D.

b. *Motiveer je antwoord onder a.*

2. Frituurpan

In een afgesloten elektrische frituurpan wordt één liter frituurvet op een temperatuur van 170°C gehouden. Dat kost per uur een bepaalde hoeveelheid elektriciteit. Iemand doet nog één liter frituurvet in de pan. Na enige tijd is de temperatuur van het vet weer 170°C geworden.

Kost het per uur meer elektriciteit om (in plaats van één) twee liter frituurvet in de frituurpan op 170°C te houden?

a. *Kruis aan:*

- [1] Ja, ongeveer tweemaal zoveel;
- [2] Ja, iets meer;
- [3] Nee, precies evenveel.

b. *Motiveer je antwoord onder a.*

3. Ventilatorkachel

De lucht in een kamer kun je verwarmen met een elektrische ventilatorkachel. Deze is voorzien van een verwarmingsspiraal en een ventilator, die de warme lucht de kamer in blaast. De volgende vraag gaat over een ventilatorkachel met een vermogen van 1500W, die al geruime tijd aanstaat. Er gaat 1450W van het vermogen naar de verwarmingsspiraal en 50W is nodig om de ventilator te laten draaien.

Hoeveel van het verbruikte vermogen gaat dan in het opwarmen van de lucht zitten?

a. *Kruis aan:*

- [1] Meer dan 1450W;
- [2] 1450W;
- [3] Minder dan 1450W.

b. *Motiveer je antwoord onder a.*

4. Pijl

Bij windstil weer schiet een boogschutter een pijl recht omhoog af. Na het loskomen van de boog stijgt de pijl tot een bepaalde hoogte en valt dan weer naar beneden.

Wat gebeurt er met de energie, die de pijl bij het afschieten krijgt?

a. *Kruis aan:*

- [1] Die neemt af tot nul in het hoogste punt;
- [2] Die gaat op aan het op snelheid brengen van de pijl;
- [3] Die is nauwelijks afgenomen in het hoogste punt.

b. *Motiveer je antwoord onder a.*

5. Bijenwas smelten

Iemand wil een stuk vast bijenwas smelten in een vuurvaste schaal. Hiertoe verwarmt hij de schaal met een gasvlam. Bij een temperatuur van 59°C , het smelpunt van bijenwas, begint de was te smelten. Bij 59°C kunnen vast en vloeibaar bijenwas naast elkaar bestaan.

Wanneer heeft de bijenwas de meeste energie?

a. *Kruis aan:*

- [1] Tijdens het smelten;
- [2] Als al de bijenwas net gesmolten is;
- [3] De bijenwas heeft steeds evenveel energie.

b. *Motiveer je antwoord onder a.*

6. Vallend stukje roest

Een trein dendert over een ijzeren spoorbrug. Hierdoor raakt uit de onderkant van de brug een stukje roest los. De snelheid van het stukje roest is na één meter vallen constant geworden.

Gedurende welk deel van zijn val krijgt het stukje roest energie?

a. *Kruis aan:*

- [1] Gedurende de eerste meter van zijn val;
- [2] Gedurende zijn gehele val;
- [3] Het stukje roest krijgt er geen energie bij.

b. *Motiveer je antwoord onder a.*

7. Elektrische ketel

Om thee te zetten vult iemand een elektrische ketel met 1,5 liter water, waarvan de temperatuur 10°C is. De ketel brengt het water aan de kook. Dit kost $0,2\text{kWh}$ energie.

Hoeveel van deze $0,2\text{kWh}$ blijft in het water zitten?

a. *Kruis aan:*

- [1] Iets minder dan $0,2\text{kWh}$;
- [2] Niets;
- [3] Alles.

b. *Motiveer je antwoord onder a.*

De B-lijst

Je vindt hieronder situaties beschreven, waarover steeds twee uitspraken worden gedaan. Kruis achter elke uitspraak één hokje aan, waarmee je aangeeft, wat jij vanuit jouw kennis van de natuurkunde van een uitspraak vindt.

11. Metalen bol

De volgende uitspraken gaan over een metalen bol, die door een kromme vertikaal opgestelde goot kan rollen. De bol wordt bij punt A losgelaten. Hij rolt langs de ene helling omlaag, passeert punt P en komt in punt B, op dezelfde hoogte als A, tot stilstand.

a. *In punt P is de totale energie van de bol groter dan in de andere punten tussen A en B.*

zeker juist
juist, denk ik
weest ik niet
onjuist, denk ik
zeker onjuist

[1] [2] [3] [4] [5]

b. *Tijdens de beweging van A naar B ondervindt de bol geen wrijvingskracht.*

[1] [2] [3] [4] [5]

12. Op temperatuur komen

De volgende uitspraken gaan over een hoeveelheid water die op constante temperatuur van 40°C gehouden wordt, terwijl de omgevingstemperatuur 10°C is. Daartoe wordt voortdurend warmte toegevoerd.

- a. *Per seconde wordt er minder warmte door het water aan de omgeving afgestaan dan er aan het water wordt toegevoerd.*

zeke~~r~~ juist
juist, dank ik
weet ik niet
onjuist, dank ik
zeke~~r~~ onjuist

[1] [2] [3] [4] [5]

- b. *De thermische energie van het water blijft gelijk.*

[1] [2] [3] [4] [5]

13. Ventilator

De volgende uitspraken gaan over een ventilator die met constante snelheid draait. De temperatuur van de ventilatormotor is constant.

- a. *Er wordt elektrische energie omgezet in bewegings-energie van de ventilator.*

[1] [2] [3] [4] [5]

- b. *Alle aan de ventilator toegevoerde energie wordt aan de omringende lucht afgestaan.*

[1] [2] [3] [4] [5]

14. Omhoog bewegen

Een hard voorwerp heeft op een zeker moment een snelheid recht omhoog. Even later bereikt het voorwerp het hoogste punt en daarna valt het.

- a. *Tijdens de beweging omhoog wordt er bewegings-energie van het voorwerp omgezet in zwaarte-energie.*

[1] [2] [3] [4] [5]

- b. *Tijdens de beweging omhoog werkt er ook een kracht omhoog op de kogel.*

[1] [2] [3] [4] [5]

15. Ijs smelten

De volgende uitspraken gaan over een hoeveelheid ijs van 0°C . Er wordt warmte aan het ijs toegevoerd, waardoor het ijs geheel smelt tot water van 0°C .

zeker juist
juist, denk ik
weet ik niet
cijferloos, denk ik
zeker onjuist

a. *Het water van 0°C heeft meer thermische energie dan het ijs van 0°C .*

[1] [2] [3] [4] [5]

b. *Niet alle warmte die aan het ijs toegevoerd moet worden om het te smelten, wordt weer afgestaan als het water bevriest.*

[1] [2] [3] [4] [5]

16. Vallen

De volgende uitspraken gaan over een licht voorwerp dat valt en daarbij wrijving ondervindt.

a. *Tijdens het vallen neemt de totale energie van het voorwerp af.*

[1] [2] [3] [4] [5]

b. *Het voorwerp krijgt zwaarteenergie.*

[1] [2] [3] [4] [5]

17. Water opwarmen

De volgende uitspraken gaan over 1 kg water die van een temperatuur van 20°C naar 21°C wordt opgewarmd. Hiervoor moet 4180 J warmte aan het water worden toegevoerd.

a. *1 kg water van 21°C heeft 4180 J thermische energie meer dan 1 kg water van 20°C .*

[1] [2] [3] [4] [5]

b. *1 kg water van 21°C kan 4180 J warmte leveren als het wordt afgekoeld tot 20°C .*

[1] [2] [3] [4] [5]

Summary

Developments in energy education

a study of the concept development of pre-university physics students in realistic settings

This thesis reports a study of the development of physics concepts of students in realistic settings, in particular of a curriculum based upon the so-called 'thematic/disciplinary' model. It focuses on a curriculum on the energy concept for 16-year old pre-university students (VWO senior level) that has been developed by the Dutch Physics Curriculum Development Project (PLON). A thematic unit is 'practice oriented': structured around a practical theme. Thus in the thematic unit about energy the theme is 'energy savings and energy supply'. A disciplinary unit is 'discipline oriented': it focuses on the relations between concepts in the discipline and on versatility in application of these concepts in a variety of contexts.

In the first chapter ('Introduction and central question') two trends in science education are described: Science, Technology and Society (STS) education which aims at linking school learning with relevant issues in society, and education that takes into account 'alternative frameworks' of students. 'Alternative frameworks' are views on scientific concepts that originate from every-day experience and language and that are relevant to education. They may be in accordance with scientific concepts but often they are not. The thematic/disciplinary model for pre-university education has been developed from the point of view that every-day knowledge should be the starting point of science education and that relevant every-day concepts of students gradually can be turned into scientific concepts using suitable and meaningful contexts. However, it can be argued that this education tends to strengthen 'alternative frameworks' because of its link with daily life. Thus the central question of the investigation is:

to what extent and in what way does a thematic/disciplinary physics curriculum lead to practice - oriented and discipline - oriented concept development of students?

The research plan consists of two phases. In phase I concept development of students working with the PLON energy curriculum is studied. In phase II the study is repeated using a revised curriculum. In both phases two kinds of investigation are carried out: analysis of transcripts of audiotaped student discussions ('protocol research') and analysis of data collected with a questionnaire ('questionnaire research').

The energy concept in modern science, in every-day experience and in secondary education curricula is briefly described in chapter 2 ('Reflections on the energy concept and on energy education'). Four main aspects of the energy concept (Duit, 1984) are formulated: transport, transformation, conservation and degradation. In the history of science three roots of the energy concept are found:

- the tradition of mathematic mechanics ('vis viva', the potential function);
- the tradition of heat as an indestructible 'something' that is useful for craftsmen;
- the tradition of physiology seeking for the relation between 'living forces' and mechanics leading to 'energy chains' of cause and effect (the conserved 'Kraft' of Mayer).

These three roots are recognized in the 'conceptualizations' of energy that are used in secondary education. Conceptualizations of energy are basic ideas of what energy is like, for instance 'energy as a conserved "something" that is useful'. Examples of the use of these conceptualizations in Dutch physics curricula are given and the educational advantages and disadvantages are discussed. A review of literature on alternative frameworks on energy is given resulting in the formulation of every-day conceptualizations of energy. Furthermore a distinction is made between contexts that have to do with energy related to living beings, contexts concerning technical devices and contexts that have nothing to do with energy. By means of the aspects, conceptualizations and contexts of energy the conceptual framework of the PLON energy curriculum is described.

Chapter 3 ('Protocol research, phase I') reports the results of the protocol analysis. The transcripts of three groups of 3 to 4 students from two schools were analyzed. Most of the students had conceptual problems. From these problems and the solutions students found in some cases we derived a sequence in conceptualizations with respect to technical devices: from every-day experience to physics.

- 'Energy as a condition for the functioning of devices'. Some students say energy is 'produced' from fuel or current and 'consumed' immediately to perform the task for which the device is designed. In this view heat, work or light themselves are not energy but energy is needed and used up for heating, moving and lighting.
- 'Energy as a useful something'. Students develop the idea that heat and light are kinds of energy and energy can be transported as a 'something'. They can distinguish between the 'source' that supplies energy and the energy flowing from the source to a 'consumer' that uses up the energy. After some teaching they add 'transformers', devices that transform energy of one kind into another. They may also learn that 'always' a part of the energy is 'lost'. However, in their view no energy is produced by the undesired heating of devices because the heat is not useful. Often these students name energy after its origin or its use. They may think for example: solar energy is electrical energy generated with sunlight; kinetic energy is the energy consumed for movement (often movement at a constant speed). 'Solar energy is transformed into kinetic energy' may be interpreted by students as 'energy from the sun is used for movement'.
- 'Energy as a conserved useful something'. This is the conceptualization the thematic unit aims at. It is developed by students when they realise that the 'lost' energy can still be used for some purposes, in most cases for heating. They also develop the view that all devices transform the energy supplied into other forms, the total amount being the same. Reasoning that energy can be put into an object and can be got out again they understand that objects can 'have' or 'contain' (potential, kinetic, chemical) energy.

- 'Energy as an abstract entity'. This is the conceptualization the disciplinary unit aims at. It is developed by students when they understand that 'usefulness' is not an essential feature of energy and they are going to use energy to describe a moving object or a falling body. In this conceptualization students can make clear distinction between process-related and state-related kinds of energy such as work and kinetic energy, heat and chemical energy.

With respect to falling bodies we also found a sequence.

- Initially students say energy has nothing to do with falling bodies. Things just fall 'on their own' or because of gravity. Sometimes they relate the release of the falling body to energy, e.g. a hand releasing a stone needing energy.
- Some students develop the idea of energy being a condition for falling, supplied by gravitation. Then a falling body 'gets' and immediately consumes the energy for falling. These students think a body 'gets' ('gravitational') energy when falling with constant speed.
- The next step in the development is taken by students saying that a falling body gets *more* energy because its speed increases. In the same way a body falling with constant speed does not get energy. Then students are going to attribute energy to a moving object because of its speed. To these students gravitational energy seems to be a kind of kinetic energy. At this stage students are on the verge of understanding the Conservation Law of energy.

The last step is taken when students make a distinction between kinetic and gravitational energy, the sum of the two being constant if friction can be neglected. Only some students appeared to reach this last level aimed at by the curriculum. Most were blocked at the conceptualization 'energy as a (non-conserved) useful something'. The reason seemed to be that the curriculum requires understanding of the Conservation Law instead of introducing this Law step by step. The conclusion was drawn that the curriculum on energy needed a thorough revision towards a step-by-step construction of the energy concept, using the results of this protocol research.

Chapter 4 ('Revision of teaching materials') describes the revision process and the revised curriculum. A conceptual sequence is designed constructing the conceptualization of 'energy as a conserved useful something' in the thematic unit and the development of 'energy as an abstract entity' in the disciplinary unit. The sequence of the thematic unit consists of five 'teaching frameworks' on energy. The fact that many students think in terms of 'energy consumption' and 'energy production' is taken as a starting point. For each conceptual step one or more foreseeable conceptual problems of students are analyzed and possible solutions are devised. To teach the energy concept correctly (be it incompletely), the teaching frameworks refer to 'kinds of energy' where the every-day frameworks say 'energy' is consumed or produced. Because of the fact that to many students energy only is connected with processes (production, consumption, flow) initially only process-related kinds of energy are used: heat, electrical energy, radiation and work. In a later stage the state-related kinds of energy are introduced. The resulting sequence is as follows.

1. 'Energy of a sort goes from its source to the place where it is consumed'. Examples of sources are a battery, burning fuel and hot water in a central heating system.
2. 'Energy leakage'. Energy of some kind leaks away from a heated house or from a moving car to the environment. If temperature and speed are constant, the energy consumption equals the energy leakage. Main contexts: insulated room, moving car.
3. 'Devices as energy transformers'. In devices the incoming kind of energy is consumed while some outgoing kinds of energy are generated. The incoming quantity equals to the outgoing quantity. Main contexts: electric bulb, solar cell, drilling machine, dynamo.
4. 'Energy storage'. All energy that is used 'net' for increasing temperature, height or speed of an object can be generated again by decreasing the same. As energy is conserved it follows that energy is stored in the heated, lifted or moving object. Main contexts: energy storage in hot water, in lakes for hydro-electricity, in flywheels.
5. 'The energy equation'. The change in quantity of energy of an object or system equals the sum of incoming and outgoing quantity of energy (flows like heat and work). This equation is built up in simple 'school contexts' and then applied to 'practical contexts' with increasing complexity.

In *chapter 5* of the thesis ('Protocol research, phase II') the results of the new 'protocol research' are reported. It was found that some students ('group A') met and solved conceptual problems roughly speaking as expected. Their main problem, the development from energy as a process-bound quantity to energy as a state-bound quantity, was solved eventually. The other students ('group B') did not notice some of the planned conceptual problems or found unexpected solutions. Students of this group thought in an unexpected way of heat in the context of a central heating system as being stored in hot water. On the one hand they said that the hot water in the system can take up and give off 'useful' heat without a change in temperature. On the other hand they told that some of the heat is 'consumed' for raising the temperature and is not useful any more for the heating of the house. The cooling down of the water takes place 'on its own', that is to say without giving off heat to the surroundings. Thus to them, heat-energy is 'used up' for heating.

The idea of things happening on their own is found also with respect to other 'natural processes' like falling and slowing down and appears to be the central idea underlying the 'energy consumption' alternative framework. The students of group B failed to relate energy to 'natural processes'. To them energy is exclusively related to 'forced processes'. They appeared to construct a coherent and rather consistent framework into which physics words like 'energy efficiency', 'specific heat', 'kinetic energy' and even 'energy conservation' are incorporated. However, on important points students attached meanings to these words which are quite different from the physics concepts. In the disciplinary unit this problem was partly overcome. With respect to falling bodies the students of group B developed the correct energy concept. The increase in complexity in the disciplinary unit is accounted for. It is

concluded that the teaching frameworks of the thematic unit failed in constructing relations between 'natural processes' and energy to an important group of students.

Chapter 6 reports on the questionnaire research on versatility. The research is confined to the 'qualitative versatility' of the energy concept of students: the extent to which students can use the energy concept correctly in qualitative problems. Two aspects of qualitative versatility are distinguished: versatility in contexts of technical devices (connected to practice-oriented aims) and in contexts of falling bodies (connected to discipline-oriented aims). The questionnaire contains a part with closed answers and a part with open answers. The open-answer part measures the active use of (alternative) frameworks which limit versatility. It is designed to relate the results of the questionnaire research to the protocol research. The questionnaires were completed before and after the thematic period and before and after the disciplinary period in classes using the PLON curriculum or the revised curriculum. The quality of data and research tools has been investigated. The results appeared to be satisfactory.

In phase II three hypotheses were tested: qualitative versatility will increase (a) mainly due to the 'technical-devices' contexts in the thematic period, (b) mainly due to the 'falling-bodies' contexts in the disciplinary period, (c) to a larger extent than in phase I.

Phase I only showed an increase in versatility during the thematic period and no increase during the disciplinary period. In phase II versatility showed a greater increase during the disciplinary period than during the thematic period. Hypothesis (a) was not supported by the results, hypothesis (b) was met. Hypothesis (c) was only met with regard to the disciplinary period.

From the analysis of the open answers with respect to frameworks it was concluded that half the research group of students met the characteristics of the 'B-group' found in the protocol research: in that they are blocked in their concept development with respect to 'technical devices contexts' throughout the teaching period. However, they did develop the energy concept for 'falling bodies contexts' during the disciplinary period. The other half of the research group met the characteristics of the 'A-group'.

In *chapter 7* ('Final reflection') the results are discussed with respect to the energy concept in particular and with respect to the curriculum model in general. Two central problems in energy education are found. The first concerns the relation between 'natural' processes and energy, necessary as a first step to the Conservation Law. The second is passing from energy as a process-bound quantity to energy as a state-bound quantity as a second step to this Law. The results show that the revised thematic unit does not succeed better in solving the first problem than the original thematic unit as far as cooling down and slowing down are concerned. But with respect to 'falling bodies contexts' the results are much better. These results are attributed to the structure of the thematic/disciplinary model.

- The 'practical contexts' of the thematic unit are too complex to clarify the relation between 'natural' processes and energy. This problem does not occur with the more or less idealized 'school contexts' of the disciplinary unit.

- In the thematic unit we confined ourselves to one area of practical contexts, stressing a single conceptualization, 'energy as a (conserved) useful something'. In the disciplinary unit students are made to use other conceptualizations as well. Thus it becomes clear to students that some underlying abstract concept is meant, rather than the conceptualizations themselves.

With respect to the curriculum model it is concluded that the thematic/disciplinary model cannot in all respects be regarded as a satisfactory basis for a curriculum which aims at the development of basic concepts of students. Such a curriculum requires a discipline-oriented component, using a variety of conceptualizations and a carefully graded sequence of contexts. Whether or not a curriculum requires a practice-oriented component as well depends on other educational aims such as student motivation, recognizability and STS aims.

Curriculum vitae

Ton van der Valk werd op 10 april 1949 te Zoeterwoude geboren. Hij behaalde in 1967 het gymnasium-B diploma aan het R.K. Lyceum St. Bonaventura te Leiden. In 1972 slaagde hij voor het doctoraal examen theoretische natuurkunde aan de Rijksuniversiteit Leiden.

Vanaf 1971 t/m 1980 was hij leraar natuurkunde in het Voortgezet Onderwijs, in Wassenaar, Rotterdam en Den Haag. In 1980 trad hij in dienst bij de Rijksuniversiteit Utrecht om te gaan werken aan het Project Leerpakket Ontwikkeling Natuurkunde (PLON). Hij was betrokken bij de ontwikkeling van PLON-lesmateriaal, onder andere voor VWO-bovenbouw. Daarbij schreef hij lerarenhandleidingen en begeleidde hij proefschoolleraars. Tevens had hij coördinerende taken in het project.

Na beëindiging van het PLON-project deed hij onderzoek naar het functioneren van PLON-lesmateriaal in de klas. Dat leidde onder meer tot dit proefschrift. Daarnaast was hij betrokken bij het uitbrengen van de methode "Natuurkunde in Thema's" van de PLON-vereniging.

Momenteel is hij als vakdidacticus verbonden aan de genoemde Vakgroep en aan het Interfacultair Instituut voor Lerarenopleiding, Onderwijsontwikkeling en Studietoelagen (IVLOS). In dat kader hernieuwt hij zijn onderwijservaring door een aantal lessen wis- en natuurkunde te geven aan het Montessori Lyceum Herman Jordan te Zeist.