

Een basis voor SONaTe

Voorbeelden van inhoudelijke samenhang tussen de natuurwetenschappelijke vakken en wiskunde in de tweede fase havo/vwo

G.E. Zegers
K.Th. Boersma
R.J. Genseberger
A.G. Jambroes-Willebrand
H. van der Kooij
A.H. Mooldijk
M. Wijers
H.M.C. Eijkelhof

Foto omslag: Bart Versteeg, Den Haag
Druk: DHV Drukkers, Nijmegen

Oktober 2003

Uitgevoerd door:

Centrum voor Didactiek van
Wiskunde en Natuurwetenschappen (CD β)
Princetonplein 5
3584 CC Utrecht

In opdracht van:

Stichting Axis
Postbus 5105
2600 GC Delft
Tel. (015) 219 14 61
www.kennisbanktechniek.nl

ISBN: 90 5861 023-3



Inhoudsopgave

Voorwoord	5
Samenvatting	6
1. Inleiding	7
2. Conceptueel kader	9
2.1 Inleiding	9
2.2 Conceptualisering SONaTe	11
3. De onderzoeksopzet	13
3.1 Onderzoeksvragen	13
3.2 Uitwerking van SONaTe	14
3.3 Uitvoering	15
4. Transport in levende systemen	17
4.1 Inleiding	17
4.2 Ontwikkeling van het begrip transport in levende systemen	18
4.3 Uitwerking van het begrippenkader	20
4.4 Knelpunten	23
4.5 Vervolgactiviteiten	24
4.6 Het proces	25
5. Energie	27
5.1 Inleiding	27
5.2 Energie in leerboeken voor de onderbouw	28
5.3 Energie in leerboeken voor de tweede fase	33
5.4 Naar meer afstemming en beter begrip van energie	37
5.5 Conclusies en aanbevelingen	48
5.6 Het proces	49
6. Verbanden tussen grootheden	51
6.1 Inleiding	51
6.2 Verbanden: begripsbepalingen	51
6.3 Verbanden in de basisvorming: een analyse van de kerndoelen	53
6.4 Verbanden in de tweede fase: analyse van eindtermen en leerboeken	54
6.5 Knelpunten in de relatie tussen de vakken	56
6.6 Conclusies en aanbevelingen	59
6.7 Het proces	60
7. Conclusies en aanbevelingen	63
Referenties	68
Bijlagen	74

Voorwoord

Axis is opgericht om de instroom in bèta/technische opleidingen en beroepen op alle niveau's te vergroten. Vanuit deze opdracht zet Axis zich in voor een versterking van de waardering voor praktische/technische vaardigheden in het primair onderwijs, betere keuzeprocessen in het beroepsonderwijs met -via herontwerp- meer nadruk op interdisciplinaire competenties in het techniekonderwijs en verbetering van de doorstroming en intake bij de arbeidsmarktintrede.

Ook in het voorgezet onderwijs is het zaak de keuzeprocessen van jongeren beter te ondersteunen. Uit onderzoek van Axis blijkt dat bij de keuze voor vervolgonderwijs veel jongeren die wél een potentieel voor bèta/techniek hebben, afhaken omdat ze een zeer beperkt beeld ervan hebben. Ze hebben met name het beeld dat bèta/techniek opleidt tot onderzoeker of voor maakberoepen. Dit terwijl bèta/techniek meer en meer verbonden is met bijvoorbeeld gezondheidszorg of handel.

Dit beeld kan gecorrigeerd worden door jongeren te laten kennismaken met samenhangende maatschappelijk relevante vraagstukken en dilemma's. Door het onderwijs op deze wijze meer aan te laten sluiten op de leerervaringen die jongeren buitenschools hebben, zijn naar onze mening meer jongeren te trekken voor bèta/techniek. Op basis van zo'n oriëntatie kunnen zij vervolgens ook een meer gefundeerde keuze maken (breed of smal) voor vervolgonderwijs en zien zij beter dat bèta/techniekcompetenties in vele contexten, en niet alleen in de traditionele 'harde' bèta/techniek, vereist zijn.

Vanuit deze visie heeft Axis gezocht naar manieren om het onderwijs in de exacte vakken anders aan te bieden. In oktober 2001 verscheen reeds "Ruimte voor SONaTe". De publicatie "SONaTe in het studiehuis" volgde in november 2002. In de publicatie van mei 2003 hebben we onze blik over de grenzen gericht: hoe wordt in het buitenland gewerkt met samenhang tussen de exacte vakken in het voortgezet onderwijs?

De onderhavige publicatie is gewijd aan voorbeelden van inhoudelijke samenhang tussen de natuurwetenschappelijke vakken en wiskunde in de tweede fase havo/vwo. Tevens zijn knelpunten en mogelijkheden om tot verdere inhoudelijke samenhang te komen geanalyseerd. Uit het onderzoek blijkt dat, mits goede kernconcepten gekozen worden, inhoudelijke samenhang zeer wel mogelijk is. Het is essentieel dat de examenprogramma's voor de betreffende vakken worden aangepast. Zoals ook in eerdere onderzoeken is geconstateerd zijn de huidige examenprogramma's niet geschreven vanuit het idee samenhang tussen de vakken te bevorderen. In vervolgactiviteiten liggen goede mogelijkheden om in samenwerking met andere initiatieven (toekomstige profielcommissies, Jet-Net, etc.) te komen tot interessante kernconcepten en contexten aan de hand waarvan door interne en externe samenhang tussen de natuurwetenschappelijke vakken en wiskunde interessant en aansprekend onderwijs gerealiseerd kan worden.

Wij hopen dat dit rapport kan dienen als een bron van inspiratie bij de discussie over hoe de exacte vakken in het algemeen vormend onderwijs aantrekkelijk kunnen worden gepositioneerd. Zonder dat daarbij de leerlingen overspoeld worden met teveel vakken (en docenten) en waarbij aan onderwijsinstellingen de ruimte wordt gelaten om hun eigen inzichten over aantrekkelijk samenhangend onderwijs te hanteren.

Willem van Oosterom
directeur Axis

Samenvatting

Met de invoering van de tweede fase is het in principe mogelijk geworden meer samenhang aan te brengen tussen de bètavakken omdat deze in de natuurprofielen gecombineerd gegeven worden. In de praktijk blijken de mogelijkheden om met name inhoudelijke samenhang aan te brengen echter nog niet optimaal benut te worden.

SONaTe (samenhangend onderwijs in natuur en techniek) beoogt grenzen tussen disciplinaire contexten te overbruggen en zo ononderbroken leerlijnen te bevorderen. Daarbij staat de transfer van beoogde disciplinaire leeropbrengsten centraal. De bedoeling is dat leerlingen inzicht krijgen in de overeenkomsten en verschillen tussen de verschillende disciplines. Zowel organisatorisch als inhoudelijk moet SONaTe vorm gegeven worden op alle niveaus.

In dit onderzoek wordt gezocht naar mogelijkheden om de inhoudelijke samenhang tussen de vakken biologie, natuurkunde, scheikunde en wiskunde in de tweede fase havo/vwo te versterken. Centraal staan de volgende twee onderzoeksvragen:

1. Hoe kan de relatie tussen biologie, natuurkunde, scheikunde en wiskunde zichtbaar worden gemaakt en nader uitgewerkt worden?
2. Welke concrete knelpunten belemmeren de inhoudelijke samenhang tussen de bètavakken en welke mogelijkheden zijn er om de inhoudelijke samenhang in lesmethoden en onderwijsprogramma's te verbeteren?

Drie manieren om inhoudelijke samenhang vorm te geven zijn aan de hand van een voorbeeld uitgewerkt: een kernconcept vanuit de biologie, 'Transport in levende systemen', een transdisciplinair onderwerp, 'Energie' en een redeneerpatroon, 'Verbanden tussen grootheden'. De inhoudelijke kaders met bijbehorende prototypen zijn ontwikkeld in samenwerking met bètadocenten van vijf scholen. Aan de hand hiervan zijn knelpunten en mogelijkheden voor inhoudelijke samenhang geanalyseerd.

Hiermee is een aanzet tot een theoretische basis gegeven van waaruit vervolgens in de praktijk bruikbare en toetsbare producten ontwikkeld kunnen worden. Aanbevelingen voor vervolgonderzoek zijn tweeledig: (1) samenhangend onderwijs ontwikkelen vanuit de huidige praktijk en (2) vanuit een lange termijn perspectief een goed theoretisch fundament leggen onder het streven naar meer samenhang. Het huidige spanningsveld tussen deze twee soorten activiteiten moet productief gemaakt worden. Beide 'sporen' zouden dan ook parallel aan elkaar moeten worden uitgevoerd.

In vervolgvactiteiten valt te denken aan handleidingen op de volgende terreinen:

1. Ontwikkelen van leerlijnen voor kernconcepten en transdisciplinaire onderwerpen: vanaf een intuïtief naar een meer wetenschappelijk begrip. Mogelijke onderwerpen voor dergelijke leerlijnen zouden kunnen zijn 'energie', 'elektriciteit' en 'deeltjes';
2. Didactisch uitwerken van het redeneerpatroon 'verbanden tussen grootheden', met speciale aandacht voor de relatie tussen wiskunde en de natuurwetenschappen.

Voor elk van deze terreinen zouden daarnaast studies moeten worden uitgevoerd die een bijdrage leveren aan het theoretisch fundament en die verworven vakdidactische kennis op het betreffende terrein toegankelijk maken voor docenten.

1. Inleiding

In de periode voor de invoering van de vernieuwde tweede fase hadden leerlingen van havo en vwo veel vrijheid in het kiezen van een vakkenpakket. Een van de nadelen daarvan was dat afstemming tussen vakken vrijwel onmogelijk was omdat leerlingen in één klas uiteenlopende vakkenpakketten hadden.

Sinds 1998 is het onderwijs in de bovenbouw van havo en vwo in Nederland ingericht volgens vier profielen: Cultuur en Maatschappij (CM), Economie en Maatschappij (EM), Natuur en Gezondheid (NG) en Natuur en Techniek (NT). Elk profiel omvat een aantal vakken die verplicht zijn voor alle leerlingen, zoals Nederlands, Engels, Culturele en Kunstzinnige Vorming (CKV) en Algemene Natuurwetenschappen (ANW). Een aantal vakken vormt samen het profieldeel. Zo vormen de vakken natuurkunde, scheikunde, biologie en wiskunde B het profieldeel NG en bestaat het profieldeel NT uit uitgebreidere vakken natuurkunde, scheikunde en wiskunde B. In principe is het dus mogelijk meer samenhang in het onderwijs te brengen dan vroeger omdat de leerlingen een profiel hebben gekozen met een verplicht vakkenpakket.

Voordelen hiervan zijn dat het onderwijs in de verschillende vakken beter op elkaar kan worden afgestemd, dat raakvlakken tussen disciplines beter tot hun recht komen en dat daardoor leerlingen een meer samenhangend kennisbestand op het gebied van wiskunde en natuurwetenschappen kunnen opbouwen. De verwachting is dat het onderwijs in de bètaprofielen daarmee interessanter wordt voor leerlingen en dat samenwerking tussen de docenten van de profielvakken wordt bevorderd.

In de praktijk blijkt deze samenhang nog niet ideaal (Tweede Fase Adviespunt, 2001). Verder constateert de Inspectie van het Onderwijs (2003) dat de leerlingen klagen over gebrek aan afstemming en samenhang in het vakkenpakket per profiel. De inspectie wijt dit onder meer aan het punt dat bij de ontwikkeling van de programma's de inhoudelijke samenhang tussen verwante vakken niet is voorzien. Zij pleit ervoor om bij de voorgenomen herziening van de examenprogramma's expliciet aandacht te besteden aan programmatische samenhang tussen vakken binnen een profiel, bijvoorbeeld door het voorstel voor herziening van de vakken op te dragen aan één 'profielprogrammagroep', waarbij het hoger onderwijs zou moeten worden betrokken voor een goede aansluiting met vervolgopleidingen.

Ook in de recente discussie over de voorgenomen herziening van de tweede fase komt de samenhang tussen de exacte vakken aan de orde. Zo pleit de KNAW (2003b) voor samenhang tussen de vakken binnen een profiel in het perspectief van de vervolgopleidingen en constateert zij dat onderwijs, onderzoek en toepassingen in wiskunde, scheikunde, natuurkunde en biologie onlosmakelijk met elkaar samenhangen. Aanbevolen wordt om spoedig permanente profielcommissies in te stellen. Ook de VSNU (2003) bepleit grotere onderlinge afstemming tussen verschillende vakken en de HBO-Raad (2003) wijst op actuele onderwijsbenaderingen om in termen van samenhangende thema's een directe relatie naar praktijkgerichte vraagstukken te leggen.

In het schooljaar 2002 is in het kader van het SONaTe-project (Zegers et al., 2002) een inventarisatie en analyse gemaakt van ervaringen ('good practices') met samenhangend onderwijs op tien scholen in Nederland. Geconstateerd wordt dat de bezochte scholen veel aandacht hebben geschonken aan aanpassing van de organisatie en aan bevordering van overleg en samenwerking tussen docenten. Dit leidt veelal tot een betere samenwerking

rond practica en profielwerkstukken, maar meestal nog niet tot een meer inhoudelijke samenhang tussen de profielvakken.

In het onderhavige vervolgproject is een van de aanbevelingen gevolgd: het zoeken naar mogelijkheden om de inhoudelijke samenhang tussen de vakken biologie, natuurkunde, scheikunde en wiskunde te versterken. Daartoe heeft een team van acht vakdidactici een aantal kernthema's bestudeerd. De resultaten zijn in vier sessies voorgelegd aan twintig docenten van vijf scholen die hadden meegewerkt aan het eerdere 'good practice' onderzoek. In dit verslag wordt eerst een conceptueel kader geschetst (hoofdstuk 2) en wordt de opzet van het onderzoek besproken (hoofdstuk 3). Vervolgens worden de resultaten gepresenteerd van drie inhoudelijke analyses: 'transport in levende systemen', 'energie' en 'verbanden tussen grootheden'. In het laatste hoofdstuk (7) worden de resultaten samengevat en besproken, en worden enkele aanbevelingen gedaan voor vervolgactiviteiten.

2. Conceptueel kader

2.1 Inleiding

In dit onderzoek staat inhoudelijk samenhangend onderwijs in natuur en techniek (SONaTe) centraal. In deze paragraaf wordt geïnventariseerd hoe dergelijk samenhangend onderwijs in algemene zin vorm kan krijgen. In paragraaf 3.2 worden deze mogelijkheden gekoppeld aan de doelstellingen van SONaTe en de onderzoeksvragen van dit onderzoek.

Inhoudelijke samenhang tussen de bètavakken kan bijvoorbeeld vorm krijgen door de volgorde van bepaalde onderdelen van de betrokken vakken op elkaar af te stemmen. Een verdergaande vorm van inhoudelijke samenhang wordt gerealiseerd middels volledig geïntegreerd bètaonderwijs¹. Hiertussen zijn diverse varianten met verschillende mate van samenhang mogelijk.

In het buitenland is al ervaring met samenhangend bètaonderwijs: ‘science’ staat in diverse landen op het lesrooster. De mate waarin de betrokken vakken daar daadwerkelijk geïntegreerd zijn is echter erg verschillend (Engelen et al., 2003a; 2003b). In geïntegreerd natuurwetenschappelijk onderwijs wordt impliciet gesuggereerd dat de mate van integratie de meest relevante variabele is op basis waarvan curriculaire beslissingen worden genomen, ongeacht de aard van de betrokken vakken en de doelen van het natuurwetenschappelijke onderwijs (Lederman & Niess, 1998). Voor een concrete uitwerking van samenhangend onderwijs is dat echter geen juiste aanname: de afzonderlijke disciplines uit de huidige schoolcontext spelen daarin wel degelijk een belangrijke rol (Geraedts et al., submitted). Ook moet niet uit het oog worden verloren dat integratie geen doel op zich is, maar een middel om bestaande knelpunten in het bètaonderwijs op te lossen. Dit middel kan naast de twee extremen, volledige integratie of gescheiden vakken, vele vormen daartussen krijgen. Voor elke vorm bestaan argumenten voor en tegen (Eijkelhof, 1999).

De vorm van samenhangend onderwijs waar SONaTe zich op richt, benadrukt de identiteit van de disciplines en bevordert tegelijkertijd de onderlinge samenhang op verschillende niveaus (Geraedts et al., submitted). Hierin verschilt SONaTe van volledig geïntegreerd natuurwetenschappelijk onderwijs.

De rol van wiskunde in het natuurwetenschappelijk onderwijs is niet eenduidig. In Nederland is wiskunde B in de bovenbouw in principe verbonden met de natuurwetenschappelijke vakken doordat het onderdeel uitmaakt van de natuurprofielen. In de praktijk blijft wiskunde toch een karakter verschillend van de natuurwetenschappelijke vakken houden, al was het maar omdat er geen wiskunde practicum wordt gegeven (Zegers et al., 2003).

¹ Een aardig overzicht van literatuur over integratie van curricula wordt gegeven door Venville (Venville et al., 2002). Het gaat daarbij om antwoorden op vragen als:

Wat is een geïntegreerd curriculum?

Waarom integreren?

Waarom is integratie moeilijk?

Wat wordt er geleerd in geïntegreerde settingen?

Kan integratie van curricula worden verzoend met de disciplines?

Daarnaast bestaat het vak wiskunde voor een deel uit leerstof die functioneel is voor de natuurwetenschappelijke vakken en deels uit leerstof die een eigenstandige betekenis heeft. In de huidige praktijk van het wiskunde B onderwijs ligt de nadruk meer op wiskunde als zelfstandige (wetenschappelijke) discipline, dan als vak met een ondersteunende functie voor de natuurwetenschappelijke vakken. Het lijkt echter wel mogelijk deze ondersteunende kant van het vak wiskunde B beter vorm te geven. De rol die het vak wiskunde speelt in het bètaonderwijs verdient daarom met name in de profielen in de bovenbouw expliciet aandacht bij de verdere uitwerking van SONaTe.

Tot nu toe is steeds gesproken over samenhang tussen vakken (extern). Daarnaast is de interne samenhang (binnen elk vak) van belang. Voor biologie wordt dit bijvoorbeeld aangegeven in een advies van de Commissie Onderwijs van de Biologische Raad (2003). In de huidige schoolpraktijk wordt de relatie tussen interne en externe samenhang vooral als spanningsveld gezien. Dit blijkt onder meer uit uitspraken van docenten waarin zij aangeven dat de volgorde binnen het vak in de knel komt wanneer er teveel wordt afgestemd met de andere vakken (Hummelen et al., 2000; Zegers et al., 2002). Interne en externe samenhang liggen echter in elkaars verlengde. Om dit te operationaliseren moet het huidige spanningsveld productief gemaakt worden. Bij een verdere uitwerking dient hiermee rekening gehouden te worden.

Doelstelling SONaTe

Inhoudelijk samenhangend onderwijs is een hulpmiddel om de problemen in de bètavakken het hoofd te bieden. SONaTe beoogt grenzen tussen disciplinaire contexten te overbruggen en zo ononderbroken leerlijnen te bevorderen (Boersma et al., 2003; Geraedts et al., submitted). Daarbij staat de transfer van beoogde disciplinaire leeropbrengsten centraal. Onder disciplines worden hier de huidige schoolvakken verstaan. Het aanbrengen van samenhang is er op gericht de leeropbrengsten voor de leerlingen te vergroten. De afgelopen jaren is de nadruk sterk op het gebruik van contexten komen te liggen om het onderwijs voor leerlingen betekenisvol te maken. Leerlingen moeten in staat zijn hun leeropbrengsten te recontextualiseren, naar dagelijkse contexten en naar andere disciplinaire contexten. Te vaak wordt aangenomen dat zij dat wel kunnen. Met name in de bovenbouw is daarvoor van belang dat leerlingen inzicht ontwikkelen in de overeenkomsten en verschillen tussen de bètavakken. Dat is nodig om de samenhang tussen de vakken te zien en om correct te kunnen recontextualiseren.

Samengevat zijn de doelstellingen van SONaTe als volgt (Boersma et al., 2003):

1. Het bevorderen van ononderbroken leerlijnen door grenzen tussen disciplinaire contexten te overbruggen;
2. Het verbeteren van de transfer van disciplinaire leeropbrengsten door middel van recontextualisering;
3. Het ontwikkelen van inzicht in de aard van de betreffende disciplines;
4. Het ontwikkelen van inzicht in samenhang tussen de betreffende disciplines.

In het onderhavige onderzoek willen we een bijdrage leveren aan het realiseren van deze doelstellingen door allereerst een theoretische basis voor SONaTe te ontwikkelen. Van daaruit kan verder gewerkt worden aan het realiseren van bovenstaande doelen in de onderwijspraktijk. Dit is echter tijdrovend en daardoor een zaak voor de lange termijn. Dit onderzoek is in eerste instantie gericht op de vakinhoud. Samen met docenten wordt de theoretische basis gelegd, van waaruit vervolgens in de praktijk bruikbare en toetsbare

producten ontwikkeld kunnen worden waarmee de leerlingen bereikt worden. De inperking van de doelstellingen tot specifieke onderzoeksvragen behorende bij dit onderzoek wordt beschreven in paragraaf 3.1.

2.2 Conceptualisering SONaTe

Om SONaTe vorm te geven zijn organisatorische en vakinhoudelijke factoren van belang, beide op macro-, meso- en microniveau. Afhankelijk van de schoolpraktijk en de knelpunten binnen de school kan samenhang in diverse vormen uitgewerkt worden. Op schoolniveau kan bijvoorbeeld gewerkt worden aan organisatorische aspecten van samenhang door de bètavaklokalen in de school bij elkaar te zetten, een bètalab in te richten, de leerlingen in de bovenbouw in profielklassen in te delen, bètaoverleg te faciliteren, etc. (Zegers et al., 2002). Afstemming van de volgorde van onderwerpen en van de gebruikte terminologie en eenheden kan een eerste stap zijn om tot meer inhoudelijke samenhang te komen. Zo kan bijvoorbeeld het onderwerp ‘bouw van het atoom’ bij verschillende vakken tegelijk of juist opeenvolgend worden behandeld, of kan worden verwezen naar lessen van verwante vakken. Het gecombineerd geven van vakken (Geraedts et al., 2001) of realiseren van projectonderwijs, bijvoorbeeld in de vorm van een themaweek voor de natuurprofielen rond het thema ‘water’, zijn andere mogelijke invullingen waarbij organisatorische en inhoudelijke samenhang op alle niveaus meer door elkaar lopen. Ook in onderzoeksvaardigheden kan samenhang gebracht worden. Dit komt met name bij de practica van de natuurwetenschappelijke vakken tot uiting.

In de praktijk echter blijken dergelijke mogelijkheden om daadwerkelijk meer inhoudelijke samenhang aan te brengen nauwelijks benut te worden. Uit inventariserende onderzoeken (Geraedts et al., 2001; Zegers et al., 2002) naar samenhang tussen de bètavakken in respectievelijk de basisvorming en de tweede fase, waarbij aandacht was voor zowel de inhoud als de organisatie en de innovatiestrategie, bleek dat inhoudelijke samenhang een witte vlek is in de huidige initiatieven van scholen. Met name bij de invoering van de tweede fase is door docenten en schoolleiders meer aandacht besteed aan de facilitering en realisatie van samenwerking tussen docenten op organisatorisch gebied dan aan de ontwikkeling van vakinhoudelijke samenhang. Een uitzondering hierop vormt de samenhang die op een aantal scholen is aangebracht op het gebied van vaardigheden en practica. Om bovenstaande redenen is de aandacht in dit onderzoek met name gericht op inhoudelijke samenhang tussen de bètavakken in de tweede fase.

Inhoudelijke samenhang

Binnen de bètavakken in de bovenbouw zijn talrijke onderdelen in de vakinhoud aan te wijzen die zich op grensgebieden van de disciplines bevinden of die bij verschillende vakken (maar met een andere insteek) aan de orde komen. Deze onderdelen zouden verbonden kunnen worden om inhoudelijke samenhang te bevorderen².

Hieronder beschrijven we kort drie manieren waarop die verbinding in SONaTe inhoudelijk vorm gegeven zou kunnen worden. Deze drie benaderingen vormen een aanknopingspunt voor het uitwerken van leerlijnen waarbij een verschillende mate van diepgang op verschillende niveaus nagestreefd kan worden.

² In het Amerikaanse Science onderwijs wordt dan vaak gesproken over *Common Themes* (AAAS, 2001).

1. Kernconcepten

We richten ons bij deze benadering op concepten die in de huidige schoolcontext bij één vak aan de orde komen maar waarvoor een netwerk van verschillende, ook uit de andere bètavakken afkomstige, begrippen nodig is. De voorbereiding op deze begrippen vindt meestal plaats bij die andere (exacte) vakken. Om deze voorbereiding te kunnen inzetten voor de ontwikkeling van inzicht in de kernconcepten is recontextualisatie en afstemming vereist. Door vanuit deze kernconcepten de aanknopingspunten met de andere vakken verder uit te werken wordt samenhang tussen de vakken bevorderd.

Met name voor biologie is deze benadering voor het uitwerken van samenhang van groot belang, omdat voorkennis uit de andere vakken voor de ontwikkeling van biologische kernconcepten in veel gevallen nodig is (Commissie Onderwijs van de Biologische Raad, 2003). Voorbeelden van dergelijke kernconcepten uit de biologie zijn ‘transport’, ‘regulatie’ en ‘vorm-functie relatie’.

2. Transdisciplinaire onderwerpen

Er zijn in de huidige schoolcontext onderwerpen die bij alle bètavakken aan de orde komen. De bijbehorende netwerken van begrippen overlappen elkaar deels. Deze overlap, maar ook de verschillen tussen de begrippennetwerken, moeten expliciet gemaakt worden. De afzonderlijke disciplines spelen bij de behandeling van deze transdisciplinaire onderwerpen ieder een eigen rol, maar de gemeenschappelijke elementen kunnen gebruikt worden om samenhang tussen de vakken te bevorderen. Door het onderwijs af te stemmen en overeenkomsten en verschillen te expliciteren wordt een ononderbroken leerlijn bevorderd. ‘Energie’ is een voorbeeld van zo’n transdisciplinair onderwerp, evenals ‘elektriciteit’ of ‘deeltjes’.

Het verschil tussen de eerste en tweede benadering is niet principieel maar gradueel; in principe zou een concept uit de eerste categorie in de tweede kunnen vallen (en dus bij alle vakken aan bod komen). Dat is echter niet het geval omdat in de huidige schoolpraktijk prioriteiten zijn gesteld en keuzes voor onderwerpen zijn gemaakt bij de verschillende vakken. Deze keuzes worden disciplinair gemaakt, er wordt dus niet gekeken of een onderwerp van belang is voor een ander vak en daarom behandeld zou moeten worden.

3. Redeneerpatronen

Behalve aan de hand van bovenstaande benaderingen via kernconcepten en transdisciplinaire onderwerpen zijn er ook verbindingen te leggen tussen de vakken aan de hand van gemeenschappelijke redeneerpatronen. Er zijn redeneerpatronen die bij alle vakken aan de orde komen, waarbij het ene vak geen voorbereidende functie voor het andere vak heeft (geen hiërarchie). De redeneerpatronen zijn in wezen inhoudsonafhankelijk (het gaat om de redenering) maar ze worden wel aan de hand van specifieke vakinhouden behandeld. Transfer- en recontextualisatieproblemen treden hier op. Het formaliseren van redeneerpatronen gebeurt bij alle vakken, maar onafhankelijk van elkaar. Dwarsverbanden worden zelden gelegd, naar aanknopingspunten binnen de vakken zelf wordt wel gezocht. Voorbeelden van dergelijke redeneerpatronen zijn ‘omgaan met verbanden tussen grootheden’ of ‘modelleren’. Hier liggen mogelijkheden om meer samenhang tussen de vakken aan te brengen.

3. De onderzoeksopzet

3.1 Onderzoeksvragen

Om de inhoudelijke samenhang tussen biologie, natuurkunde, scheikunde en wiskunde in de bovenbouw van het havo en vwo te bevorderen zijn in dit onderzoek de volgende subdoelen gesteld, als uitwerking van de in paragraaf 2.1 genoemde doelstellingen van SONaTe:

1. In kaart brengen van concrete knelpunten die het aanbrengen van samenhang tussen de bètavakken belemmeren;
2. In kaart brengen en legitimeren van concrete mogelijkheden voor het aanbrengen van samenhang, met speciale aandacht voor de ondersteunende rol die wiskunde kan hebben;
3. Een basis leggen voor een vervolgproject waarin nieuwe samenhangende lesvoorbeelden in samenwerking met experimenteerscholen worden ontwikkeld en uitgetest.

Deze doelstellingen zijn gaandeweg in samenwerking met docenten geconcretiseerd tot de volgende twee onderzoeksvragen:

1. *Hoe kan de relatie tussen biologie, natuurkunde, scheikunde en wiskunde zichtbaar worden gemaakt en nader uitgewerkt worden?*

De invoering van profielen in de tweede fase met verplichte vakkenpakketten heeft de mogelijkheden om meer samenhang in het bètaonderwijs aan te brengen vergroot. Uit eerdere onderzoeken blijkt echter dat dit in de praktijk (nog) nauwelijks van de grond is gekomen (o.a. Zegers et al., 2002). In onderzoek uitgevoerd in opdracht van het Tweede Fase Adviespunt, (Tweede Fase Adviespunt, 2002) zijn lesmethoden naast elkaar gelegd om in kaart te brengen wanneer in welke methode van welk vak welk onderwerp aan bod komt, ter ondersteuning van docenten. Hierdoor wordt het eenvoudiger om bijvoorbeeld de volgorde van onderdelen van de leerstof in de verschillende vakken beter op elkaar af te stemmen. Dit gebeurt in de praktijk slechts sporadisch (Zegers et al., 2002).

Het uitwerken van de relaties tussen de bètavakken in SONaTe gaat echter verder dan alleen de volgorde van onderdelen van de leerstof op elkaar afstemmen. Om een basis te leggen voor SONaTe is het nodig op een abstract niveau naar relatief grote onderwerpen en concepten te kijken en aan de hand daarvan inhoudelijke kaders te ontwikkelen om vervolgens vanuit deze theoretische kaders concrete onderwijsleeractiviteiten uit te werken.

De rol van wiskunde in de natuurprofielen moet specifiek aandacht krijgen om de relatie tussen wiskunde en de natuurwetenschappen zichtbaar te maken. De samenhang met de natuurwetenschappelijke vakken zoeken we voor het tweede fase onderwijs in die onderdelen van de wiskunde waarin dit vak ondersteuning kan bieden aan de natuurwetenschappen. De natuurwetenschappelijke vakken kunnen overigens ook ter ondersteuning van de wiskunde dienen, door het aanleveren van relevante en realistische contexten. Met het expliciteren van de punten waarop wiskunde en de

natuurwetenschappen elkaar kunnen versterken, wordt een aanzet gegeven tot meer samenhang tussen wiskunde en de natuurwetenschappen. Daar kunnen de verschillende vakken hun voordeel mee doen.

2. *Welke concrete knelpunten belemmeren de inhoudelijke samenhang tussen de bètavakken en welke mogelijkheden zijn er om de inhoudelijke samenhang in lesmethoden en onderwijsprogramma's te verbeteren?*

Gezocht wordt naar knelpunten die de samenhang belemmeren en naar mogelijke oplossingen hiervoor. Inhoudelijke knelpunten en mogelijkheden doen zich zowel voor op klas- en schoolniveau, als op landelijk niveau. Daarnaast wordt gezocht in lesmethoden, eindtermen en de programmering van onderwerpen door de jaren heen, omdat deze in redelijke mate bepalend zijn voor de inhoud van het onderwijs. Ook de traditie van de vakken ten aanzien van de wijze waarop onderwerpen aan bod komen en de interne samenhang binnen de vakken zijn van belang. Een verdere ontwikkeling van meer samenhangend bètaonderwijs moet gebaseerd worden op een analyse van al deze knelpunten en mogelijkheden.

3.2 Uitwerking van SONaTe

Gekozen is voor de uitwerking van drie inhoudelijke kaders om de onderzoeksvragen te beantwoorden. Elk van deze kaders vormt een perspectief van waaruit gekeken wordt naar een concrete invulling van SONaTe. De drie kaders zijn beschreven in paragraaf 2.2 en worden gelegitimeerd vanuit de in paragraaf 3.1 gestelde onderzoeksvragen. Vanuit ieder kader is een concreet voorbeeld als prototype nader uitgewerkt. Elk voorbeeld verduidelijkt enerzijds de theoretische benadering zelf en geeft anderzijds de gelegenheid om knelpunten en mogelijkheden in kaart te brengen en te analyseren. Deze prototypen staan beschreven in de hoofdstukken 4, 5 en 6.

Een beperkende factor in de gekozen opzet is dat er veel onderwerpspecifieke problemen naar voren komen. Bij keuze van een ander voorbeeld binnen hetzelfde kader zullen zich ook andere specifieke problemen voordoen. Voordeel van deze opzet is echter dat de voorbeelden als prototype dienen en ze zowel het inhoudelijk kader als de gevolgde werkwijze concreet kunnen maken voor anderen. Andere onderwerpen of thema's kunnen in principe op dezelfde manier worden benaderd en ontwikkeld.

De drie inhoudelijke kaders zijn in de volgende prototypen uitgewerkt: het kernconcept 'Transport in levende systemen' vanuit de biologie (hoofdstuk 4), het transdisciplinaire onderwerp 'Energie' (hoofdstuk 5) en het redeneerpatroon 'Verbanden tussen grootheden' (hoofdstuk 6).

De keuze voor deze voorbeelden wordt in de betreffende hoofdstukken nader beschreven. In het algemeen kan gesteld worden dat de onderwerpen in het huidige onderwijs problemen opleveren voor leerlingen en dat (voor)kennis van meerdere bètavakken nodig is voor het krijgen van inzicht hierin.

Verder komt in deze hoofdstukken aan bod hoe de onderwerpen in het huidige onderwijs (lesmethode, praktijk) aan de orde komen en wordt een aanzet gegeven voor een meer samenhangende benadering, die verder uitgewerkt zou moeten worden. Daartoe worden aanbevelingen gedaan voor de korte (binnen bestaande schoolpraktijk) en langere (meer theoretisch gericht) termijn.

Het onderzoek beperkt zich tot het geven van een eerste aanzet tot meer samenhangend

onderwijs op grond van de uitgevoerde analyses, uitwerkingen en besprekingen van de mogelijkheden en knelpunten. Er wordt dus geen poging gedaan binnen het (korte) bestek van het project een leerlijn te ontwikkelen of te voorzien in lesmateriaal en docentenhandleidingen. Het gaat hier om een inhoudelijke basis voor meer samenhang, voor zowel samenhang in het huidige onderwijs als voor samenhang tussen de curricula van de vakken.

De uitwerkingen van de drie prototypen (hoofdstuk 4 t/m 6) zijn verschillend van aard. Bij een kernconcept redeneren we vanuit één van de vakken en zoeken verbindingen in een netwerk van voorbereidende begrippen; bij een transdisciplinair onderwerp kijken we naar de grensgebieden en de gemeenschappelijke elementen van de vakken. Het hoofdstuk over een kernconcept uit één van de vakken zal logischerwijze meer op dat ene vak gericht zijn dan het hoofdstuk over een transdisciplinair onderwerp. Ook het vak wiskunde zal niet overal evenveel aan bod komen, dit is ook afhankelijk van het uitgewerkte prototype. Alle hoofdstukken hebben echter gemeenschappelijk dat het om kaders van en prototypen voor inhoudelijk meer samenhangend onderwijs in de bètavakken gaat.

3.3 Uitvoering

Het onderzoek is uitgevoerd in de periode september 2002 tot en met mei 2003. Een kernteam van acht personen heeft het conceptueel kader ontwikkeld en dat nader uitgewerkt. In dit kernteam waren alle vakken door twee personen vertegenwoordigd, waarbij van ieder duo tenminste één persoon over uitgebreide en recente leservaring in het voortgezet onderwijs beschikte.

In het onderzoek is nauw samengewerkt met docenten. Docenten staan dicht bij de praktijk en hun ervaringen zijn een belangrijk hulpmiddel om tot levensvatbare en succesvolle uitwerkingen van samenhangend onderwijs te komen. Zij kunnen aangeven waar zich op dit moment in de praktijk knelpunten bevinden en waar behoefte aan ondersteuning bestaat. Door deze samenwerking kunnen de ideeën voor SONaTe zich ontwikkelen tot relevante en realistische mogelijkheden voor meer samenhangend onderwijs, die aansluiten bij de behoeften van de docenten die het onderwijs daadwerkelijk moeten (gaan) geven.

De ideeën en concepten zijn aan docenten voorgelegd gebruikmakend van een focusgroep (Assema et al., 1992; Barker & Frankis, 1997). De focusgroep bestond in dit geval uit docenten van vijf scholen waarbij van iedere school één docent van ieder van de vier bètavakken (biologie, natuurkunde, scheikunde en wiskunde) vertegenwoordigd was. Eén school maakte gebruik van een denktank die meedacht en liet één contactpersoon aan de focusgroep deelnemen. De focusgroep bestond bij volledige aanwezigheid dus uit maximaal 17 personen (4x4+1). In bijlage A staat een overzicht van alle deelnemers aan dit onderzoek.

De deelnemende onderzoeksscholen zijn gekozen uit de tien scholen die aan het eerdere SONaTe 'good practice' onderzoek in de bovenbouw (Zegers et al., 2002) hebben deelgenomen. De selectie is gebaseerd op de mate waarin de school reeds bezig is met samenhangend onderwijs en de locatie van de school. Dit laatste is van belang in verband met reistijd voor de docenten om bij de bijeenkomsten in Utrecht aanwezig te kunnen zijn. Opgemerkt dient te worden dat dit zeker niet de enige scholen zijn die inhoudelijke samenhang nastreven.

Op basis van analyse van lesmethoden en programma's zijn knelpunten geïdentificeerd vanuit de exacte vakken. Aan de hand daarvan is geanalyseerd welke onderwerpen als

prototype voor een van de inhoudelijke kaders zou kunnen worden uitgewerkt. Vervolgens is in meer detail bestudeerd hoe deze onderwerpen in het huidige lesprogramma en lesmethoden aan bod komen en wat daarin knelpunten zijn. Mogelijkheden voor een samenhangende aanpak zijn hieruit verder ontwikkeld en hebben geleid tot de beschrijvingen in hoofdstuk 4, 5 en 6.

Drie uitgewerkte prototypen vanuit de drie inhoudelijke kaders voor samenhangend bètaonderwijs zijn in ruw concept ontwikkeld door het kernteam en aan de focusgroep voorgelegd en vervolgens aangepast. De concepten hebben deze cyclus drie maal doorlopen. Deze focusgroep bijeenkomsten vonden plaats in de periode november 2002 tot en met april 2003.

Ter voorbereiding van de discussie tijdens de focusgroep bijeenkomsten is telkens een aantal vragen aan de docenten voorgelegd. Op hoofdlijnen luiden deze als volgt:

Vind je het gekozen voorbeeld geschikt om de samenhang tussen de bètavakken uit te werken?

Naast de door de kerngroep geformuleerde argumenten zijn er ook uit de praktijk argumenten te geven. Kunnen knelpunten uit de praktijk bij dit onderdeel opgelost worden met SONaTe? De keuze van het prototype wordt met deze vraag aan de praktijkervaringen van de focusgroep deelnemers getoetst.

Zijn de genoemde punten herkenbaar? Heb je aanvullingen?

Hierbij gaat het om verschillende punten: knelpunten, mogelijkheden om samenhang vorm te geven of bijvoorbeeld conclusies uit de analyses van enkele lesmethoden. Doel is om na te gaan of de ideeën die in de kerngroep naar voren zijn gekomen ook in de praktijk relevant en realistisch zijn en of er iets mist.

Wat zou een volgende stap kunnen zijn voor verdere uitwerking?

Hoe een onderwerp verder uitgewerkt zou moeten worden om de beoogde leeropbrengst te bereiken is van belang voor het ontwikkelingsproces van het prototype. Met behulp van deze vraag worden aanwijzingen uit de praktijk gekregen voor het vervolg. Naast inhoudelijke opmerkingen wordt hier ook gedoeld op de behoeftes van de docenten ten aanzien van hulpmiddelen om samenhangend onderwijs vorm te geven.

Van alle bijeenkomsten is een verslag gemaakt en de opmerkingen van de docenten zijn voor zover mogelijk verwerkt en gebruikt bij de verdere ontwikkeling van de ideeën en prototypen. Aan het eind van ieder van de hoofdstukken 4, 5 en 6 is te lezen hoe de opmerkingen van docenten bij de specifieke onderwerpen een rol hebben gespeeld. Tot slot worden in hoofdstuk 7 enkele concluderende opmerkingen over de uitvoering van het onderzoek gemaakt.

4. Transport in levende systemen

4.1 Inleiding

Het begrip ‘transport’ is voor het biologieonderwijs belangrijk. In de eerste plaats is het een begrip dat dicht bij de dagelijkse ervaring van leerlingen staat. Leerlingen zullen bij het woord transport wellicht denken aan transport van goederen en personen met behulp van vervoersmiddelen. Maar ook met transport van voeding en voedingsstoffen door het eigen lijf komen zij dagelijks in aanraking, al zullen zij daarvoor niet het woord ‘transport’ gebruiken, maar de woorden ‘eten’ en ‘spijsvertering’. Inzicht in de wijze waarop transport in organismen verloopt is voor hen in verschillende contexten in het dagelijks leven (gezondheid, voeding, etc.) van belang.

In de tweede plaats is het begrip transport in levende systemen in de maatschappij van groot belang. Zo leidt inzicht in transport door ecosystemen (kringlopen) tot verklaringen voor uitputting van natuurlijke hulpbronnen en het uitsterven van soorten. Inzicht in transport in de biosfeer leidt tot verklaringen voor veranderingen in de biodiversiteit en het klimaat.

In de derde plaats wordt in veel biologisch onderzoek aandacht geschonken aan transport in levende systemen, zowel in fundamenteel onderzoek, in bijvoorbeeld de celbiologie, als in praktijkgericht onderzoek dat moet leiden tot een hogere landbouwproductie of tot de ontwikkeling van nieuwe geneesmiddelen.

Er zijn dus genoeg argumenten om het begrip ‘transport in levende systemen’ als kernconcept voor het biologieonderwijs te beschouwen en een leerlijn te ontwikkelen om het begrip aan te brengen. In het basisonderwijs en in de basisvorming zal de aandacht zich vooral moeten richten op het belang van transport binnen dagelijkse contexten. De eisen in de examenprogramma’s in de bovenbouw van havo en vwo gaan veel verder. Daar zal de nadruk meer moeten liggen op de structurerende plaats van het begrip transport in levende systemen binnen de biologie als geheel.

Organisatieniveaus

Transport vindt plaats binnen en door alle biologische systemen, ongeacht hun organisatieniveau. Het begrip transport is niet alleen van belang voor een goed begrip van biologische systemen op organismaal niveau (het niveau van het organisme), maar ook voor een goed begrip van biologische systemen op cellulair niveau, op ecosysteem niveau en zelfs voor een goed begrip van het systeem aarde. Omdat binnen biologische systemen vaak meerdere organisatieniveaus van belang zijn die met elkaar samenhangen, is transport binnen biologische systemen een complex fenomeen (zie figuur 3).

Transport van materie, energie en informatie treedt in alle open systemen op en kan daarom opgevat worden als een algemeen kenmerk van open systemen³.

³ Een systeem is een verzameling componenten die als eenheid gezien kunnen worden doordat ze een min of meer scherpe systeemgrens hebben. De componenten van een systeem beïnvloeden elkaar zodanig dat het systeem door terugkoppeling in stand wordt gehouden. Open systemen zijn systemen die gekarakteriseerd worden door een instroom (input), en een uitstroom (output) van materie, energie en/of informatie. Instroom en uitstroom is alleen mogelijk als binnen het systeem transport (throughput) plaatsvindt.

Micro- en macroniveau

Transport binnen biologische systemen kan zowel op macro- als op microniveau worden bestudeerd. Als we transport op macroniveau willen beschrijven hebben we het over transport van objecten, stoffen, energie en informatie; op microniveau hebben we het dan over transport van moleculen, atomen of subatomaire deeltjes, energie en informatie. Het is van belang om in het biologieonderwijs binnen alle organisatieniveaus zowel aandacht te schenken aan transport op macroniveau als aan transport op microniveau. Met deze keuze wordt aangesloten bij ontwikkelingen in het biologisch onderzoek. Daar is te zien dat de afgelopen tien jaar in onderzoek naar hogere organisatieniveaus (macroniveau) in toenemende mate gebruik wordt gemaakt van moleculaire technieken en verklaringen (microniveau).

Samenhang met andere vakken

Het begrip transport wordt niet alleen in de biologie gebruikt, maar ook in de natuurkunde en scheikunde. Daar gaat het dan met name om transport van stoffen en energie. De manier waarop transport in levende systemen in de biologie wordt uitgewerkt is sterk fysisch en chemisch bepaald. Bij transport in levende systemen gaat het in feite om fysische en chemische processen binnen verschillende organisatieniveaus. We kunnen zelfs zeggen dat het gaat om chemische en fysische kennis die wordt gebruikt in biologische contexten.

Gezien de nauwe verwevenheid van transport in levende systemen met transport van stoffen en energie is het ook begrijpelijk dat de ontwikkeling van het biologische begrip transport in sterke mate samenhangt met kernconcepten uit de natuurkunde en scheikunde als 'deeltjes', 'energie' en 'chemische reactie'.

Met het vak wiskunde zijn bij het begrip transport in levende systemen weinig aanknopingspunten.

Samenhang met andere biologische kernconcepten

Doordat transport hier is omschreven als een algemeen kenmerk van open (biologische) systemen, hangt het niet alleen samen met het begrip 'open systeem', maar ook met andere algemene kenmerken van open systemen. Daarbij gaat het in de eerste plaats om samenhang met de begrippen 'regulatie' en 'evenwicht' of 'homeostase' (Boersma & Schalk, 2001; Kamp, 2000).

4.2 Ontwikkeling van het begrip transport in levende systemen

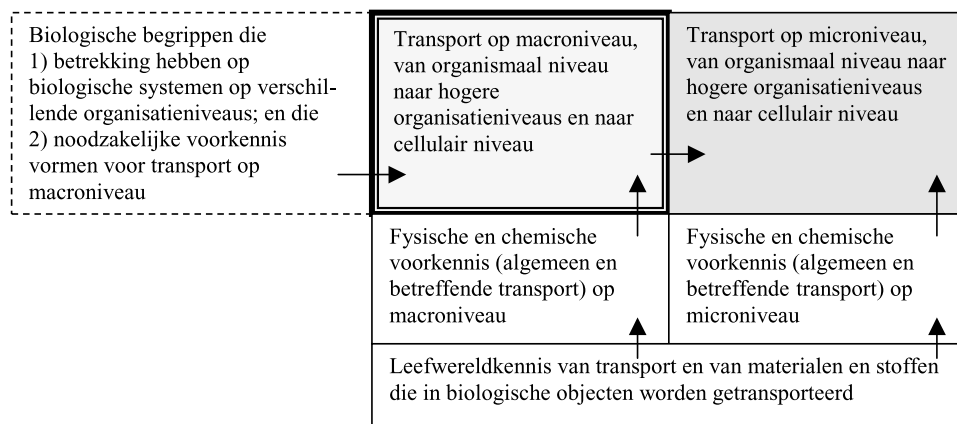
De centrale vraag is nu hoe leerlingen het kernbegrip transport kunnen ontwikkelen en wat dat betekent voor het curriculum dat hen moet worden aangeboden. Het begrip transport is verweven in het hele biologieonderwijs, in alle organisatieniveaus, zowel op het macro- als op microniveau. Dat betekent dat een leerling in verschillende leerjaren bij verschillende thema's aspecten van transport tegenkomt. Het is de moeite waard om te onderzoeken wat een effectieve volgorde is en welke kennis van de andere bètavakken op welk moment nodig is.

Aan psychologisch en vakdidactisch onderzoek kan een aantal criteria worden ontleend die leiden tot een volgorde waarin verschillende betekenissen van transport aan de orde kunnen worden gesteld. Het gaat om de volgende vier ordeningscriteria:

1. Transport dient te worden opgebouwd vanuit de kennis en ervaring die leerlingen hebben met organismen. Psychologisch onderzoek laat zien dat kinderen in eerste instantie altijd het hele object waarnemen (de Gestalt) en niet de onderdelen daarvan, en dat zij in de eerste plaats betekenissen aan organismen zullen toekennen. Dat wordt nog versterkt doordat zij leren dat zij zichzelf ook als organisme kunnen zien. De aandacht voor transport zal zich daarom eerst op het organismale niveau moeten richten.
2. Vanuit het organismale niveau dient afgedaald te worden naar lagere organisatieniveaus en opgestegen te worden naar hogere organisatieniveaus, waarbij voortdurend teruggekoppeld wordt naar het organismale niveau. Deze zogenaamde jojo-strategie is in het proefschrift van Knippels (2002) uitgewerkt voor genetica. De leerlingen krijgen op deze manier meer grip op complexe en abstracte biologische onderwerpen.
3. Het heeft pas zin om transport op microniveau aan de orde te stellen als leerlingen kennis van transport op macroniveau hebben verworven. Dit ordeningscriterium vloeit voort uit onderzoek naar de wijze waarop leerlingen een elementair deeltjesbegrip kunnen verwerven. Dat onderzoek laat zien dat het pas zin heeft om de deeltjestheorie te introduceren als leerlingen vertrouwd zijn met verschijnselen waar de deeltjes theorie een verklaring voor geeft (Vollebregt, 1998).
4. Omdat transport als algemeen kenmerk van open systemen kan worden gezien, is het relevant om het te verbinden met het begrip 'open systeem'. In bijna afgerond promotieonderzoek is een strategie uitgewerkt (Verhoeff et al., 2002) waarbij leerlingen het begrip 'open systeem' ontwikkelen nadat zij eerst algemene levenskenmerken, waaronder transport, op organismaal en cellulair niveau hebben uitgewerkt. Vervolgens ontwikkelen zij een model van een cel, waaruit zij tot slot door generalisatie het begrip 'open systeem' opbouwen. Zodra leerlingen het begrip 'open systeem' kunnen hanteren, kunnen zij in principe ook modelmatig kijken naar andere open systemen, zoals ecosystemen en het systeem aarde.

Met behulp van de hierboven genoemde ordeningscriteria hebben we een begrippenkader ontwikkeld waarin een ordening is aangegeven voor de ontwikkeling van het kernbegrip 'transport'. Bij een verdere invulling kan worden vastgesteld welke lesstof uit de biologie aan de orde zou moeten komen en welke kennis van natuurkunde en scheikunde op dat moment vereist is. Op basis van deze ordening kunnen leerlijnen worden ontworpen. Deze leerlijnen vormen de grondslag voor onderwijsleerstrategieën die leiden tot ontwikkeling van het begrip 'transport'. In figuur 1 is aangegeven hoe het begrippenkader is gestructureerd en in figuur 2 is het begrippenkader zelf weergegeven. De pijlen in de figuren 1 en 2 geven weer welke relaties er tussen de componenten zijn.

Figuur 1 Structuur van het begrippenkader transport in levende systemen.



Het begrip transport wordt eerst opgebouwd op organismaal en macroniveau, zoals in figuur 2 in het dubbelomkaderde vakje is weergegeven. Het onderwerp ‘voeding en spijsvertering’ kan daarbij als voorbeeld dienen (zie bijlage C). Omdat voor een eerste uitwerking relatief weinig biologische kennis en een beperkt begrip van stoffen vereist is kan het al in het basisonderwijs of de basisvorming worden aangeboden. Voor een verdere ontwikkeling van het begrip transport is veel meer kennis van scheikunde en natuurkunde noodzakelijk. Leerlingen moeten bijvoorbeeld begrip hebben van ‘energie’ en ‘energietransport’, van chemische reacties en evenwichten. Ze hebben corpusculaire voorkennis nodig en kennis van diffusie en osmose in het bijzonder. Het merendeel van deze kennis zal op zijn vroegst pas in de 3^e klas worden aangeboden. Dat betekent dat transport in levende systemen vooral een thema is voor de bovenbouw havo en vwo.

4.3 Uitwerking van het begrippenkader

Het algemene begrippenkader uit figuur 2 is gespecificeerd door de vakken in te vullen voor een aantal stoffen en thema’s die een belangrijke rol spelen in levende systemen. We hebben daarbij een keuze gemaakt voor de stoffen zuurstof en stikstof en voor de thema’s voeding en energie. Dit heeft geresulteerd in vier uitgewerkte begrippenkaders, zie de bijlagen B t/m E. Door het invullen van de vakjes wordt de interne samenhang binnen de biologie in kaart gebracht. De externe samenhang met de andere natuurwetenschappelijke vakken kan nu in een volgend stadium duidelijk worden aangegeven.

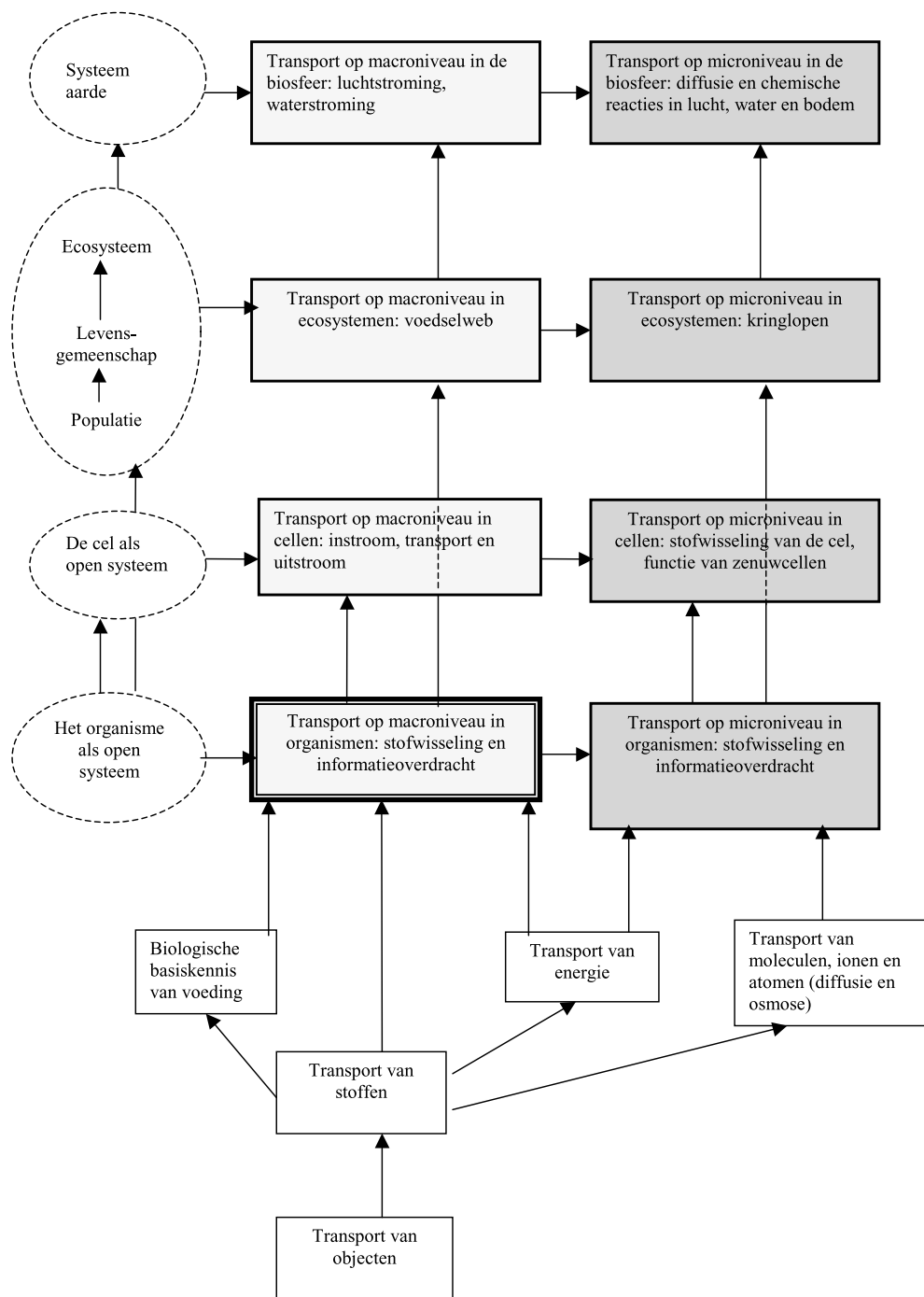
Het invullen van het begrippenkader voor meerdere thema’s en stoffen is nodig omdat ze op andere momenten en in verschillende contexten in het curriculum aan de orde komen. De stikstofkringloop bijvoorbeeld wordt meestal behandeld bij ‘milieu’ in de bovenbouw, terwijl de afbraak van eiwitten bij de spijsvertering in de onderbouw aan de orde komt. Transport van voedingsstoffen komt voornamelijk in de onderbouw op macroniveau voor. Transport van energie komt vooral op microniveau in de bovenbouw voor.

Om een leerlijn voor transport te kunnen ontwikkelen is het noodzakelijk te bepalen in welke volgorde deze begrippenkaders, of delen van deze begrippenkaders moeten worden uitgewerkt. Er van uitgaande dat het de voorkeur verdient dat leerlingen samenhangende

kennis van biologische systemen (organisme, cel, ecosysteem) ontwikkelen ligt het voor de hand om als hoofdlijn voor uitwerking van een leerlijn het algemene begrippenkader (figuur 2) aan te houden.

Van belang is verder dat de scheikundige en natuurkundige voorkennis nader wordt gespecificeerd. Pas daarna kan definitief worden vastgesteld in hoeverre de leerlijn transport in levende systemen binnen het biologieonderwijs kan worden gerealiseerd.

Figuur 2 Begrippenkader voor transport in levende systemen. Deze figuur is een uitwerking van figuur 1. Het startpunt is het dubbelomkaderde vakje. De pijlen geven aan welke relaties er tussen de vakjes zijn.



4.4 Knelpunten

Hoewel verdere inhoudelijke invulling noodzakelijk is kan nu al, op grond van de inhoudsanalyse van enkele biologiemethoden en gesprekken met natuurkunde- en scheikundedocenten, een aantal knelpunten voor het ontwikkelen van een leerlijn transport in levende systemen worden aangegeven. De knelpunten zijn hier kort aangeduid. Daarbij maken we een onderscheid tussen knelpunten die de samenhang binnen het huidige biologieprogramma betreffen en knelpunten die de natuurkundige en scheikundige voorkennis betreffen.

Samenhang binnen het biologieprogramma

Een analyse van de vwo biologiemethoden Biologie voor jou (Smits & Waas, 1998b; 2000a; 2000b; 2001) en Nectar (Maier & Wijk, 1998; 1999; 2000) laat zien dat een structurering, zoals aangegeven in het begrippenkader, niet wordt aangehouden. In veel hoofdstukken komen aspecten van transport aan de orde, maar niet in een logische volgorde. Het is duidelijk dat transport in levende systemen niet als kernbegrip wordt gehanteerd.

Verder kan geconstateerd worden dat bij biologie nauwelijks aandacht besteed wordt aan transport in de cel op macroniveau, alhoewel onderzoek (Verhoeff et al., 2002) laat zien dat kennis van de interactie tussen celorganellen een belangrijke stap is in de ontwikkeling van samenhangende celbiologische kennis.

Het systeem aarde komt nauwelijks bij biologie aan de orde, maar wel bij ANW. De relatie met transport in ecosystemen wordt daar echter niet voldoende aangeduid.

Scheikundige en natuurkundige voorkennis

Voor een goed begrip van transportprocessen in levende systemen is voldoende ervaring met corpusculair denken een voorwaarde. Zowel bij natuurkunde als bij scheikunde wordt hier in de onderbouw aandacht aan gegeven. Toch laat vakdidactisch onderzoek (Vollebregt, 1998) zien dat veel leerlingen in de bovenbouw er problemen mee hebben. De wijze waarop het deeltjesbegrip moet worden geïntroduceerd werd als een nog onopgelost probleem gezien. Bij het ontwikkelen van een leerlijn voor transport in levende systemen bij biologie kan er dus niet van worden uitgegaan dat alle leerlingen in de 2^e fase over voldoende corpusculaire kennis beschikken.

De begrippen diffusie en osmose, die essentieel zijn voor een goed begrip van transport in levende systemen, komen niet meer in de examenprogramma's van natuurkunde en scheikunde voor.

Het ontwikkelen van een goed begrip van energie is een proces dat vele jaren duurt en waar alle natuurwetenschappelijke vakken een bijdrage aan leveren. De samenhang tussen de vakken hierbij wordt nu onvoldoende benut (zie hoofdstuk 5). Bij natuurkunde en scheikunde zouden, veel meer dan nu gebeurt, biologische contexten gebruikt kunnen worden bij de ontwikkeling van het energiebegrip. Zo worden transferproblemen voor leerlingen belangrijk beperkt.

4.5 Vervolgactiviteiten

Op lange termijn

Aan het uitwerken van een leerlijn voor transport in levende systemen gaan eigenlijk de volgende vragen vooraf:

- Welke kernbegrippen en thema's moeten de structuur bepalen voor een biologieprogramma en hoe moet transport daarin worden ingepast?
- Hoe moet het begrip transport in levende systemen gerelateerd worden aan kernconcepten in de andere bètavakken?

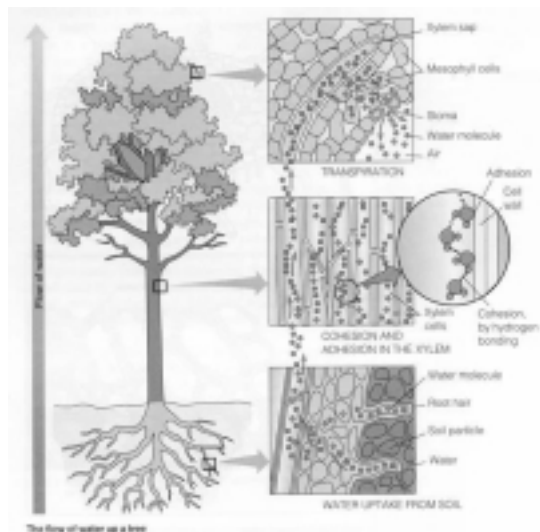
Om deze vragen te beantwoorden zal een gezamenlijke analyse van de examenstof van de bètavakken moeten plaats vinden. Dit is ongetwijfeld een ingewikkeld proces, dat veel werk en tijd zal vergen.

Op korte termijn

Het is gewenst het hier gepresenteerde begrippenkader verder uit te werken. Eerst moeten alle vakjes uit de begrippenkaders meer expliciet worden ingevuld en gerelateerd aan noodzakelijke kennis van de andere bètavakken. Daarna kan dan een leerlijn ontwikkeld worden. In de leerlijn moeten alle begrippen zijn aangegeven die voor transport in levende systemen van belang zijn. Op grond daarvan kan ook, nauwkeuriger dan nu gedaan, een aantal knelpunten worden geïdentificeerd die zich in de huidige schoolboeken voordoen. Dat kan er toe leiden dat voor bestaande methoden een advies aan de uitgevers wordt gegeven over de volgorde waarin hoofdstukken en paragrafen aan de orde moeten komen. Daarnaast kan aanvullend lesmateriaal voor docenten worden ontwikkeld.

Als voorbeeld zou lesmateriaal over 'transport in een boom' kunnen worden uitgewerkt, uitgaande van de vraag hoe transport in een boom op gang komt en vervolgens in stand gehouden wordt. Daarbij is de centrale vraag hoe het mogelijk is dat een sapstroom tegen de zwaartekracht in naar boven gaat. Twee processen liggen daaraan ten grondslag: worteldruk en verdamping (zie figuur 3). Een belangrijke rol daarbij spelen cohesiekrachten van watermoleculen onderling en adhesiekrachten van watermoleculen aan cellulose moleculen van het xyleem. Verklaringen voor het in standhouden van de sapstroom vinden we dus in een combinatie van factoren op meerdere organisatieniveaus namelijk op ecosysteemniveau (zonlicht, bodem, temperatuur), organismaal niveau (wortels, stam en bladerkroon), orgaanniveau (vaatbundels), weefselniveau (xyleem, epidermis, mesophyl), cellulair niveau (wortelhaar, xyleemcel, stoma huidmondje) en moleculair niveau (watermolecuul, cellulose molecuul).

Figuur 3 Watertransport in een boom (Campbell et al., 1997).



4.6 Het proces

Werkwijze

Om samenhang tussen de bètavakken te versterken is er bij biologie voor gekozen om uit te gaan van een biologisch kernbegrip en van daar uit de aanknopingspunten met de andere vakken te onderzoeken. Deze aanpak zou in principe model kunnen staan voor het ontwerpen van een leerlijn voor alle (biologische) kernbegrippen. Samenhang tussen de vakken wordt vanuit deze benadering niet als primair doel gezien, maar als noodzakelijke voorwaarde om effectief vakonderwijs aan te kunnen bieden.

Bij biologie lopen leerlingen regelmatig tegen het probleem aan dat zij onvoldoende voorkennis hebben van een ander bètavak om een bepaald onderwerp goed te begrijpen. Dat betekent dat de samenhang met andere bètavakken niet los gezien kan worden van de leerlijnen die binnen de biologie zouden moeten worden uitgewerkt.

Om te beginnen is daarom een lijst gemaakt met biologische onderwerpen waarvan uit ervaring bekend is dat leerlingen begripsproblemen hebben door een gebrekkig voorkennis. Deze lijst bevatte onder meer de onderwerpen: werking van het oog, werking van de nieren, werking van de celmembraan, werking van enzymen, transportprocessen in planten en fotosynthese. In overleg is gekozen voor het kernbegrip 'transport', later ingeperkt tot 'transport in levende systemen'.

Om te onderzoeken in hoeverre samenhang in de huidige boeken is gerealiseerd is een analyse gemaakt van 'transport' in de methode Biologie voor jou (Smits & Waas, 1998b; 2000a; 2000b; 2001) en de methode Nectar (Maier & Wijk, 1998; 1999; 2000). Elementen van transport bleken in heel veel hoofdstukken voor te komen, echter niet samenhangend. Samen met een docent natuurkunde en een docent scheikunde zijn natuurkunde- en scheikundeboeken geanalyseerd op 'transport aspecten'. Ook hierbij bleek weinig samenhang met 'transport in levende systemen' bij biologie. Voor biologie noodzakelijke

onderdelen bleken zelfs uit hun examenprogramma's geschrapt te zijn. De gesignaleerde begripsproblemen bij leerlingen zijn dus niet verwonderlijk.

Om de samenhang binnen het biologieonderwijs zelf en de samenhang met de andere bètavakken in kaart te brengen is als voorbeeld een algemeen begrippenkader voor 'transport in levende systemen' ontwikkeld. Hierin zijn de relaties tussen de verschillende organisatieniveaus zowel op micro- als op macroniveau aangegeven evenals de relaties met de andere vakken.

Dit begrippenkader is verschillende malen in het projectteam besproken en naar aanleiding hiervan telkens aangepast en verbeterd. De begrippenkaders zijn voor de thema's 'voeding' en 'energie' en voor de stoffen 'zuurstof' en 'stikstof' nader ingevuld. De docenten uit de focusgroep hebben in vier bijeenkomsten gereageerd op de tussenproducten. Tot slot zijn eventuele vervolgactiviteiten voor de korte en lange termijn geformuleerd.

Reacties van docenten

Uit de vier bijeenkomsten met docenten kwam naar voren dat een aantal van hen van mening was dat de samenhang met de andere vakken niet duidelijk was, wiskunde ontbrak zelfs helemaal. Dit werd veroorzaakt door de gekozen benadering, dit onderwerp is sterk vanuit de biologie benaderd. Daarbij vond een aantal docenten dat de problemen met 'Transport in levende systemen' in de huidige klassenpraktijk niet groot zijn en dat de gesignaleerde knelpunten in de wandelgangen worden opgelost. Enkele biologiedocenten waren echter erg enthousiast en wilden graag meedenken over een verder uitwerking.

Ondanks de kritische opmerkingen zijn het onderwerp en de invalshoek niet veranderd, omdat in het projectteam gekozen was voor de benadering om vanuit een biologisch thema naar samenhangend onderwijs te kijken. Bij de andere benaderingen van inhoudelijke samenhang is juist voor een meer overkoepelend thema gekozen. Een deel van de kritiek was ook terug te voeren op de observatie dat docenten denken vanuit de huidige onderwijspraktijk met de huidige exameneisen. De tekst bevatte geen direct bruikbaar lesmateriaal. Om een idee te geven voor verdere uitwerking in de klassenpraktijk is het voorbeeld van 'transport in een boom' toegevoegd.

Suggesties gedaan door docenten:

- Evenwicht is misschien een beter uitgangspunt dan transport.
- Sluit aan bij de tekst over 'energie'.
- Stroom, stroomsterkte en stroomsnelheid zouden aanknopingspunten met natuurkunde kunnen zijn.
- Geef aandacht aan wat de drijvende kracht achter transport is.
- Betrek het begrip 'oplossen' erbij.
- Ontwikkel een éénduidige terminologie voor de vakken bij dit onderwerp
- Begin een leerlijn bij de cel, niet bij het organisme.

De suggesties zijn allemaal bediscussieerd in het projectteam. Hoewel de meeste nuttig en bruikbaar zijn was de tijd te kort voor een verder uitwerking. In een eventueel vervolgproject kunnen ze wellicht worden meegenomen.

5. Energie

5.1 Inleiding

‘Energie’ is in de natuurwetenschappen een centraal en bindend onderwerp, in alle disciplines heeft het een onmisbare rol gekregen. Er is wel eens voorgesteld om in het onderwijs de hele natuurwetenschap te behandelen vanuit het energiebegrip (Falk & Herman, 1977; Schmid, 1982). Anderen daarentegen pleiten ervoor om energie helemaal niet te behandelen als de leerlingen het benodigde fysische en mathematische inzicht nog missen om energie goed te begrijpen (Warren, 1982)⁴. Deze tegengestelde standpunten kunnen beide zijn ingegeven door de wens iets te doen aan de vele begripsproblemen van leerlingen met betrekking tot energie (Valk, 1992; Watts, 1983). Ze getuigen echter ook van diepe tegenstellingen in de visie op het onderwijzen van het transdisciplinaire onderwerp energie.

Het optreden van begripsproblemen is niet zo verwonderlijk: energie is een onderwerp dat zowel in de leefwereld als in de wetenschappelijke wereld wordt gebruikt, maar op heel verschillende manieren (Lijnse, 1990). In de leefwereldtaal is energie iets bruikbaars, iets nuttigs. Hier wordt gesproken over verbruik van energie, energiecrisis, uitputting van de energievoorraad. In het wetenschappelijke taalgebruik daarentegen spreken we over behoud van energie, energie gaat niet verloren. Deze paradox demonstreert dat de verschillen groot zijn (Driver & Warrington, 1985; Duit, 1981; Solomon, 1985). In de natuurkunde, waar het begrip is geboren, is energie een abstract idee, niet iets substantieels waar je bewust van kunt worden door algemeen gangbare ervaringen (Warren, 1982). Het is de vraag of dit abstracte idee ooit adequaat in woorden kan worden uitgedrukt, bijvoorbeeld als ‘het vermogen om arbeid te verrichten’, of dat dit idee uiteindelijk alleen zijn betekenis heeft in de wiskundige structuur waar het een deel van is (Lijnse, 1990).

Wanneer er in de (natuurkunde)lessen veel aandacht besteed is aan energie, gaan leerlingen wel natuurkundige termen als ‘arbeid’ gebruiken en kunnen ze veel energievormen noemen. Dat betekent echter niet dat ze in staat zijn energieconcepten, zoals energiebehoud, toe te passen om processen te verklaren (Duit, 1984). Leerlingen worden waarschijnlijk pas in de bovenbouw ontvankelijk voor het wetenschappelijke energiebegrip, wat Warren (1982) ervoor doet pleiten energie ook pas dan te behandelen. Hier zijn ook wel pedagogische argumenten voor: als leerlingen in de onderbouw geconfronteerd worden met dingen waar ze intellectueel nog niet aan toe zijn, wordt dat vaak door hen vertaald in een “Ik kan het niet begrijpen” (Buck, 1978). Van de andere kant kan de school eigenlijk niet het in het dagelijks leven gebruikte (en maatschappelijk belangrijke) energiebegrip negeren voor leerlingen die geen natuurwetenschappelijke vakken zullen kiezen. Deze bijdrage poogt een uitweg te geven voor dit dilemma.

De begripsproblemen bij energie worden door minstens drie factoren veroorzaakt:

1. Het woord is gewoon geworden in de leefwereld, iedereen gebruikt het en heeft daar dus een bepaald beeld bij. Waarschijnlijk zal dit doorgaans overeenkomen met ‘bruikbare energie’.

⁴ *I wish to make a most earnest plea that teachers of physics should eliminate the word energy entirely from elementary teaching (...)* (Warren, 1982).

2. Het wetenschappelijke energiebegrip is complex. Het heeft niet voor niets lang geduurd voor dit concept ontwikkeld is (Elkana, 1975) en ook onder wetenschappers is er geen volstrekte helderheid over: "It is important to realize that in physics today, we have no knowledge of what energy is" (Feynman et al., 1963).
3. Het komt op school zowel bij natuurkunde, scheikunde als biologie voor, maar in de schoolboeken is weinig of niets van afstemming te merken, noch inhoudelijk noch wat het moment van aanbieden betreft.

We gaan nu eerst na hoe energie in verschillende methoden voor het voortgezet onderwijs behandeld wordt bij de vakken natuurkunde, scheikunde en biologie in de leerboeken voor het havo/vwo, vanaf het eerste jaar tot en met de zesde klas. Deze samenvatting beslaat paragraaf 5.2 (onderbouw) en 5.3 (bovenbouw). Vervolgens doen we in paragraaf 5.4 een voorstel voor de behandeling van energie door de jaren heen, met afstemming in de verschillende vakken. In paragraaf 5.5 vatten we de belangrijkste conclusies samen en tenslotte bespreken we hoe dit hoofdstuk tot stand is gekomen in paragraaf 5.6.

5.2 Energie in leerboeken voor de onderbouw

Biologie

Het schoolvak waar leerlingen het eerst in aanraking komen met energie is meestal biologie. Daar wordt energie genoemd in het kader van voeding. Er worden doorgaans drie soorten voedingsstoffen onderscheiden: energierijke stoffen, bouwstoffen en beschermende stoffen.

Er wordt, zij het enigszins impliciet, van uitgegaan dat leerlingen vertrouwd zijn met het gebruik van de term 'energie' in verband met eten. Energie zal dan vooral met bewegen geassocieerd worden, een slogan als "Mars geeft energie" speelt daar op in. Dat energie er ook voor zorgt dat we warm blijven is misschien minder direct uit het dagelijks woordgebruik af te leiden, maar is waarschijnlijk niet onlogisch in de ogen van de leerlingen. Er wordt immers ook in het kader van 'de kamer verwarmen' over 'energie die daar voor nodig is' gesproken.

In de biologieboeken Nectar (Akkerman et al., 1999; 2000) en Biologie voor jou (Smits & Waas, 1998a; 1999) wordt in dit kader de term *verbranden* gebruikt: *Je lichaam haalt de energie uit energierijke voedingsstoffen door ze te verbranden. Daar komt natuurlijk geen vuur aan te pas. Je lichaam heeft voor de verbranding brandstof en zuurstof nodig. De koolhydraten en de vetten uit je voedsel zijn de brandstof. De zuurstof adem je in. De energie die vrijkomt bij het verbranden gebruik je om te bewegen en warm te blijven.* 'Verbranden' is uiteraard ook bekend bij de leerlingen, maar dat heeft 'natuurlijk' te maken met vuur en vernietigen. Het heeft heel lang geduurd voor de scheikunde deze twee terreinen, voedingsstoffen in het lichaam en verbranden met vuurverschijnselen, met elkaar kon verbinden. Deze stap kunnen de leerlingen niet begrijpen omdat ze de hiervoor benodigde kennis en ervaringen uit de scheikunde nog missen. De volgende passage demonstreert het dilemma waar leerlingen voor staan misschien nog duidelijker: *Verbranding vindt plaats in elke cel van je lichaam. Verbranding vindt voortdurend plaats, dag en nacht. Zonder verbranding gaat een cel dood.*

De verbranding die leerlingen kennen maakt cellen juist dood! Hoe moeten ze deze tegenstellingen met elkaar verbinden? Om dit werkelijk te begrijpen is nodig dat ze 'verbranding' in de meer uitgebreide chemische betekenis kennen, dat ze weten dat energievormen in elkaar kunnen overgaan, dat ze weten dat energie in warmte omgezet kan worden en met behulp van die warmte gemeten kan worden, dat ze er ook enig idee

van hebben dat er zich processen op microniveau afspelen in cellen. Dit vereist, kortom, allerlei kennis die pas in latere jaren mogelijk bij natuur- en scheikunde opgedaan zal worden.

De biologieboeken gaan er niet op in dat voor de opbouw van organismen (of bestanddelen daarvan) ook energie nodig is. Bijvoorbeeld fotosynthese wordt doorgaans in redelijk detail behandeld, zonder te vermelden dat energie gebruikt wordt voor de groei van de plant. Leerlingen zullen het waarschijnlijk heel plausibel vinden dat wat zij onder energie verstaan, ook nodig is bij de opbouw van hun lichaam: ze weten dat om dingen te maken of te bouwen (een auto, een huis) behalve materialen ook energie nodig is⁵.

Natuur- en scheikunde

Banas

Banas (Crommentuijn et al., 1994; 1995) is een veel gebruikte methode voor natuur- en scheikunde in de basisvorming. Er wordt tamelijk veel aan energie gedaan, waarbij is geprobeerd om goed de samenhang te laten zien. Maar ook is goed te zien waar problemen zitten.

Energie wordt in het eerste deel (Crommentuijn et al., 1994) ingevoerd, in hoofdstuk 2, *Elektrische stroom: Het is niet zo gemakkelijk om uit te leggen wat energie is. Daarom zullen we alleen nagaan wat je met energie kunt doen. Een blok hout heeft energie. Dat zie je niet aan het blok zelf. Maar als je het aansteekt, verbrandt het. Daarbij ontstaan warmte en licht. Warmte en licht zijn ook vormen van energie.*

Hier worden wel leefwereld woorden gebruikt, maar niet uit de situaties waarin in het dagelijks leven sprake is van energie zoals voedsel, benzine. Waarom heeft het blok hout nu energie? Omdat het verbrandt? Omdat er warmte en licht ontstaan? Waarom zijn warmte en licht dan vormen van energie? Er wordt hier impliciet verondersteld dat energievormen in elkaar kunnen overgaan.

Je lichaam heeft energie. De temperatuur van je lichaam blijft 37°C, ook al is het in de kamer veel kouder. Je lichaam moet zichzelf blijven opwarmen. Als je hard loopt, maakt je lichaam zelfs veel extra warmte. Je krijgt het dan heet. Met energie kun je warmte produceren.

Zo gaat het verder naar: met energie kun je iets laten bewegen; met energie kun je nieuwe stoffen maken.

Vervolgens wordt weer terug gegaan naar elektriciteit, dat kan ook al die dingen veroorzaken. Conclusie: *Een elektrische stroom bevat dus energie. Deze vorm van energie noemen we elektrische energie.*

De kilowattuurmeter wordt ingevoerd, als meter van elektrische energie. Er worden berekeningen gemaakt, hoeveel energie apparaten verbruiken.

Bij spanningsbronnen wordt de opwekking van elektriciteit behandeld. Er worden nu energiebronnen genoemd (steenkool, aardolie, aardgas, etc.) en de manier waarop in de elektriciteitscentrale die energie wordt omgezet in elektrische energie.

⁵ Dit opent de deur naar een belangrijk aspect van energie later in de bovenbouw: voor alle opbouw en ordening is energie nodig, zonder energietoevoer desintegreren systemen: de natuur streeft naar een toename van de entropie. Entropie is weliswaar uit het examenprogramma verdwenen, het hoeft dan ook niet met deze term genoemd te worden, maar het basisbegrip blijft belangrijk en is eenvoudig voor te stellen.

In deel 2 (Crommentuijn et al., 1995) zijn enkele hoofdstukken geheel of grotendeels aan energie gewijd. In hoofdstuk 6, *Energie en stoffen*, worden allerlei energiebronnen genoemd: aardolie, steenkool, aardgas, uranium, waterstof (als brandstof en voor kernfusie), zon, wind, water, aardwarmte, biogas. Bij alles is een lijstje voor- en nadelen gegeven. Vervolgens komen verschillende energiesoorten en een enkele omzetting van een energiesoort aan bod⁶. Bij bewegingsenergie en zwaarte-energie staan formules, zonder dat duidelijk is waar ze vandaan komen. Als slot wordt de wet van behoud van energie geformuleerd:

*Bij een energieomzetting verdwijnt de ene energiesoort en komen er andere voor in de plaats. De totale energie **vóór** de omzetting blijkt even groot te zijn als **na** de omzetting. Dit heet de **wet van behoud van energie**. Deze wet geldt voor alle energieomzettingen.*

Hoe zit het nu met energiebronnen die op raken? Energie blijft toch behouden? Deze paradox wordt nergens gethematiserd. Welke zin heeft het om hier dit concept in te voeren? De wet van behoud van energie wordt hier alleen gebruikt om klassieke (en onrealistische) sommetjes te maken.

De volgende paragrafen gaan over zuinige apparaten en warmte-isolatie van huizen, 'Rendement' en 'nuttig gebruikte energie' worden behandeld.

In hoofdstuk 7, *Verkeer en Veiligheid*, komt het begrip *arbeid* voor. Hier wordt een ernstige fout gemaakt door volledig voorbij te gaan aan waar het in het verkeer om gaat. *In de motor van een auto wordt de chemische energie van een brandstof omgezet in bewegingsenergie. De snelheid van de auto neemt toe. Voor een snelheidsverandering is een kracht nodig. Bij deze **energieomzetting** werkt dus een **kracht**. Als je remt wordt de bewegingsenergie omgezet in warmte. De snelheid neemt af. (...) De **hoeveelheid energie** die door de kracht wordt omgezet, heet de **arbeid** die de kracht verricht. Arbeid wordt dus gegeven in de eenheid van energie: joule (J).*

De suggestie is dat alle chemische energie wordt omgezet in bewegingsenergie. Dan zou de snelheid van de auto alsmaar moeten blijven toenemen, tot de tank leeg is! Waar komt de energie vandaan die nodig is om te rijden? Dat er ook kracht en dus arbeid nodig is voor het blijvend voortbewegen van de auto, wordt niet vermeld.

Met de formule $W = F \cdot s$ worden sommen gemaakt over optrekkende en afremmende auto's. Na twee pagina's berekeningen is de conclusie: *De arbeid is dus even groot als de toename van de bewegingsenergie. Deze regel heet de **eerste bewegingswet**. In formulevorm wordt deze regel: $F_{\text{netto}} \cdot s = 1/2 \cdot m \cdot v_e^2 - 1/2 \cdot m \cdot v_b^2$.*

Deze formulering is fysisch correct (de door de nettokracht geleverde arbeid is gelijk aan de toename van de kinetische energie), maar de essentie van energie bij transport komt niet ter sprake: bijna alle energie is nodig om iets te vervoeren.

In de volgende hoofdstukken over *Chemische reacties* (8) en *Hefbomen* (9) komt energie niet meer voor. Hoofdstuk 10 is er weer grotendeels aan gewijd: *Elektrische energie*. Hierin komen voor: *Elektrische energie en vermogen; Wat kost elektriciteit; Eenheden;*

⁶ Die zijn soms misleidend. Zo staat er bij uranium: *er is maar weinig uranium nodig om veel energie te produceren*. Niet is vermeld dat er heel veel erts nodig is om dat weinige uranium te winnen. Bij waterstof (als brandstof) staat: waterstof is een schone brandstof. Er is niet vermeld dat waterstof gemaakt wordt via elektriciteit waar andere, misschien niet schone, brandstoffen voor nodig zijn, iets waarop dit moment veel discussie over wordt gevoerd in de maatschappij.

Energieverbruik thuis; Elektronen (zonder energie); Welk apparaat kies je? (met energieverbruik gegevens uit de consumentengids); Spanning (zonder energie); Elektriciteit in huis (zonder energie); Elektrisch vermogen (met berekeningen over vermogen, spanning en stroomsterkte). Veel hieruit is praktisch goed bruikbaar in het dagelijks leven.

Nu voor straks

Nu voor straks (Jonge et al., 1999; 2000), een gecombineerde natuur- scheikunde methode, wijdt in het eerste deel (Jonge et al., 1999) een heel hoofdstuk aan energie: *Energie, dus ook warmte*. Het hoofdstuk begint met een paar zinnen zoals die in het dagelijks woordgebruik voor kunnen komen:

Mijn kind zit vol energie.

Voor de schaatstocht had zij speciale energiedrankjes gekocht.

We moeten zuinig zijn met energie.

In de tweede paragraaf wordt de vraag gesteld: *Maar wat is energie eigenlijk?* Als antwoord wordt gegeven: *Met energie kun je **arbeid** verrichten, bijvoorbeeld het optillen van een boek. Iets bezit energie als het arbeid kan verrichten.*

Het dagelijks woordgebruik maakt het aannemelijk dat er iets (energie) van voedsel in ons lichaam komt. Vanuit het perspectief van de auteurs gezien is de overgang naar de term *arbeid* begrijpelijk, zij willen immers naar de natuurkundige definitie van energie. Voor de leerlingen is dit echter een raadsel. ‘Arbeid’, zo leerlingen dat woord al gebruiken (het heeft iets archaisch, is verbonden met ‘arbeider’), zal voor hen te maken hebben met ‘werken om je brood te verdienen’, ‘grote mensen werk’, zeker niet met het optillen van een boek. Het zal ook niet direct geassocieerd worden met de eerder genoemde voorbeelden als fietsen, lopen sporten etc.⁷.

Verschillende vormen van energie worden toegelicht met voorbeelden die het verrichten van arbeid volgens de natuurkundige definitie illustreren. Warmte wordt als energievorm verklaard door er op te wijzen dat de moleculen van een gas sneller gaan wanneer de temperatuur hoger wordt. Warmtetransport wordt macroscopisch besproken (geleiding, stroming, straling). Methoden om hoeveelheden warmte te meten komen echter niet aan de orde.

In hoofdstuk 8, *Elektrische energie*, gaat het inleidende verhaaltje over energie, met voorbeelden uit het dagelijks leven. Daarna stopt de benadering vanuit energie. De volgende paragrafen gaan over spanning en stroomsterkte, zonder dat energie daar nog genoemd wordt. In de laatste paragraaf staat de kostprijs centraal. De watt wordt geïntroduceerd als eenheid van vermogen, deze term is echter nog niet eerder voorgekomen. Tegelijkertijd wordt de kWh ingevoerd: alle begrippen lopen dus door elkaar!

Chemie

Chemie is een veel gebruikt leerboek voor scheikunde in de onderbouw. In deel 3 h/v (Pieren et al., 1995) komt energie op diverse plaatsen voor, maar steeds heel summier. In

⁷ Het optillen van een boek wordt genoemd omdat het boek zelf een eenvoudige rechtlijnige beweging beschrijft, alleen tegen de zwaartekracht in. Het lijkt daarom handig om van hieruit naar de regel: arbeid = kracht H weg te gaan. Die eenvoud geldt echter niet voor het lichaam: de arm en de hand beschrijven ook nu een ingewikkelde beweging, er is meer energie nodig dan alleen uit de berekening voor het verplaatsen van het boek zou volgen.

hoofdstuk 3 over chemische reacties staat bijvoorbeeld: *Warmte, elektrische stroom en licht zijn vormen van energie. Ontledingsreacties verlopen alleen als we voortdurend energie blijven toevoeren. Dit type reacties noemen we endotherme reacties. Er zijn ook reacties waarbij energie vrijkomt, vaak in de vorm van warmte. Bij de verbranding van magnesium komt energie vrij in de vorm van warmte en licht. Dit type reacties noemen we exotherme reacties.*

Daarna wordt energie pas weer genoemd in hoofdstuk 8. Diverse energieaspecten worden aangestipt, maar niet in samenhang gebracht, noch zó behandeld dat ze op zichzelf begrijpelijk zijn. Kijk bijvoorbeeld naar thema ‘Energie en eten’. Dit begint met een proef om het vetgehalte van pinda’s te bepalen. Vervolgens moeten de leerlingen op grond hiervan berekenen hoeveel kJ 100 gram pinda’s bevatten (er stilzwijgend van uitgaande dat het vet de enige energieleverancier is) en dat vergelijken met de waarden uit de voedingsmiddelentabel. In die voedingsmiddelentabel staat echter niet de term *energie*, maar *verbrandingswarmte*. Op de relatie tussen deze twee wordt niet ingegaan. De tekst gaat vervolgens over energie die je uit eten haalt, en hoeveel je nodig hebt voor diverse activiteiten. Deze paragraaf vertelt niet hoe in het algemeen de energiewaarde van de voedingsstoffen wordt bepaald⁸.

Paragraaf 8.3, *Fossiele brandstoffen*, behandelt wel de destillatie van ruwe aardolie, maar niet hoe de energie van brandstof bepaald kan worden.

Paragraaf 8.4: *Energieverbruik, energiebesparing*, bevat voornamelijk opgaven betreffende energieverbruik en energievoorraden.

Verder komt energie niet meer in het boek voor.

Conclusies

Uit deze analyse van de lesmethoden in de onderbouw kan een aantal conclusies worden getrokken.

- Het woord ‘energie’ wordt in al de bestudeerde onderbouwmethoden voor biologie, natuurkunde en scheikunde genoemd. De auteurs beginnen meestal met termen uit de leefwereld van de leerlingen, maar gebruiken ‘energie’ vervolgens vrij snel in een meer wetenschappelijk context. Hierdoor treden paradoxen op: energie die behouden blijft maar ook verloren gaat, verbranding zonder vuur, etc.;
- Voor de hand liggende verbanden worden niet gelegd, zoals het benoemen van energie als zijnde nodig voor de opbouw van organismen (bijvoorbeeld bij fotosynthese);
- Veelal wordt op één of andere manier behoud van energie vóórondersteld, de teksten gaan er vaak van uit dat leerlingen weten dat energie van de ene vorm in de andere kan overgaan, of van de ene plaats naar de andere gaat en daarbij behouden blijft. Daartegenover staat in aparte paragrafen over ‘zuinig zijn met energie’, dat energie op kan raken. Deze contradictie wordt nergens gethematiseerd;
- In de verschillende vakken wordt energie vooral binnen de eigen context behandeld en de benaderingen ondersteunen elkaar niet veel. Zo wordt bij biologie verondersteld dat leerlingen ‘verbranding’ breder kunnen zien dan als alleen een vuurverschijnsel, bij scheikunde wordt dat bredere kader echter niet behandeld;
- Het gebruik van een wetenschappelijk concept als ‘behoud van energie’ in een

⁸ Dit gebeurt door de warmteproductie bij volledige verbranding op te meten. Dat dit in principe zo kan, is volstrekt niet vanzelfsprekend. Of dit al dan niet aannemelijk is, zou een boeiend stukje onderwijs kunnen opleveren, waarbij ook principiële discussies aan bod kunnen komen in hoeverre processen in het lichaam terug gevoerd kunnen worden tot ‘eenvoudige’ chemische processen.

dagelijks leven context, levert niet méér inzicht op. Onvermijdelijk onbegrip kan juist dan grote fouten tot gevolg hebben;

- De met het milieu verwante aspecten van energie komen in de meeste boeken maar zeer sporadisch aan bod.

5.3 Energie in leerboeken voor de tweede fase

Biologie

In de biologiemethoden voor de bovenbouw Pasteur (Muhlenbaumer et al., 1998; 1999) en Biologie voor jou (Smits & Waas, 1998b; 2000a; 2000b; 2001) wordt veel met energie gedaan. Het betreft veelal energieoverdracht op microniveau, ten behoeve van de processen in de cel. Daarbij wordt bekend verondersteld dat een cel energie nodig heeft. Dat mensen energie nodig hebben, wil echter nog niet zeggen dat daarom ook iedere cel energie nodig heeft. Deze gevolgtrekking blijft impliciet. Zo staat in Pasteur de eerste opmerking die over energie gaat in hoofdstuk 1 (Muhlenbaumer et al., 1998), *In de cel*, onder het kopje *Mitochondriën*:

Zo vinden alle processen die met de opwekking van energie voor de cel te maken hebben, in de mitochondriën plaats. Cellen halen de meeste energie uit de verbranding van suikers en vetten. Daarbij komt ATP vrij, de stof die als brandstof voor de cel dient. De vorming van ATP vindt plaats in de mitochondriën, die om die reden vaak de energiecentrales van de cel worden genoemd.

Energie komt in dit deel niet meer aan bod, ook niet bij groei en werking van spieren. In hoofdstuk 3, *Voortplanting en seksualiteit*, staat een tabel met MJ energie die een vrouw moet eten bij een bepaalde leeftijd variërend voor of ze zwanger, zingend of niet zwanger is. Hier staat energie dus als maat voor de hoeveelheid voedingsstoffen in joule uitgedrukt, terwijl dat hier verder niet is behandeld.

In *deel 2* (Muhlenbaumer et al., 1999) heet het eerste hoofdstuk: *Leven en energie*.

De inleiding geeft een kader vanuit energie en stofwisseling: je wilt je goed en energiek voelen. De centrale vraag (hoe werkt stofwisseling) wordt dan ook aangevuld met de vraag of je invloed kunt uitoefenen op je welbevinden en energiebalans. Vanuit een vrij globale inleiding en een beroep op energiebegrippen uit de natuurkunde en scheikunde, worden vervolgens de ATP cyclus en glycolyse gedetailleerd behandeld op moleculair niveau. Bij fotosynthese wordt atomaire natuurkundekennis verondersteld: *Absorptie van licht betekent in alle gevallen dat een elektron van het bewuste atoom dat het licht absorbeert, in een hoger schilniveau komt. (...) Het elektron valt terug. (...) De geabsorbeerde energie komt vrij als warmte. Een rots die door de zon wordt beschenen, wordt op die manier warm.* Vervolgens wordt behandeld hoe bij fotosynthese de opgenomen energie van het elektron wordt doorgegeven aan andere moleculen, waarbij uiteindelijk ATP wordt gevormd. Hier wordt veel scheikundekennis verondersteld, bovendien wordt de afbraak en vorming van moleculen sterk in termen van energie beschreven.

Vrijkomen en opslaan van energie wordt dus op moleculair niveau behandeld, zonder dat expliciet aandacht besteed wordt aan de vraag wat dit met de cel of het organisme als totaal te maken heeft (macro-micro probleem). Men gaat bij het metabolisme in de mens zonder enige toelichting over op afbraak en opbouw van moleculen, en zit men even later weer op orgaanniveau. Op al deze niveaus wordt gesproken van energie.

In Biologie voor jou wordt in het eerste deel (Smits & Waas, 1998b) ook weinig aandacht besteed aan energie. Er staan een paar opmerkingen die wel impliciet veronderstellen dat er enige notie aanwezig is over energie. Zo bijvoorbeeld op pagina 16 wanneer het over vorm en functie van dieren gaat:

(...) ze mogen ook niet te zwaar zijn, omdat anders het lopen te veel energie kost.

Later, op pagina 28 komen de mitochondriën bij de bespreking van de bouw van de cel aan bod: *In mitochondriën vindt verbranding plaats, vooral van glucose. Voor dit proces is zuurstof nodig. De enzymen die verbranding mogelijk maken, liggen op het binnenste membraan. De energie die bij verbranding vrijkomt, wordt tijdelijk opgeslagen in moleculen van de stof ATP (adenosinetrifosfaat). Als op een later tijdstip ergens in de cel energie nodig is, wordt deze energie weer vrijgemaakt uit de ATP-moleculen.*

In Biologie voor jou is wat meer aandacht voor het micro-macro probleem. Een eerste voorbeeld hiervan vinden we op pagina 37: *Transport dat tegen het concentratieverval in plaatsvindt, kost energie.(...) De energie die voor (dit) actief transport nodig is, wordt geleverd door ATP-moleculen.*

In het volgende deel (Smits & Waas, 2000a) komt energie pas uitgebreid en expliciet aan bod in *Thema 3: Energie*. Ook hier wordt vrij veel scheikundekennis bekend veronderstelt, onder andere het beschrijven van reacties en energieoverdracht met behulp van het uitwisselen van elektronen. Maar ook in dit deel valt op dat in de eerste plaats wordt uitgegaan van een chemisch proces waar energie voor nodig is, daarna wordt beschreven hoe dit op moleculair niveau tot stand komt.

Typerend is in dit kader dat in Pasteur de verbranding van suikers en vetten centraal staat met als bijproduct ATP als brandstof voor de cel, in staat centraal de verbranding van ATP waarbij energie vrijkomt voor de cel.

Natuurkunde

In de bestudeerde natuurkundemethode Newton (Kortland et al., 1998; 2000) wordt energie uitgebreid en zorgvuldig behandeld, veelal binnen de eigen natuurkunde context. Impliciete aannames en onderlinge verwijzingen zorgen echter vaak voor cirkelredeneringen.

- Energie wordt meestal in de context van een ander natuurkundig begrip geïntroduceerd. Met name als dit laatste begrip zelf moeilijk is, bijvoorbeeld wanneer energie behandeld wordt in de context van elektriciteit, is te verwachten dat het begrip energie diffuus blijft.
- Vaak wordt impliciet aangenomen dat de leerling allerlei fysische concepten heeft rondom energie: bijvoorbeeld dat energie van de ene vorm in de andere kan overgaan. Aan de veelvuldig toegepaste energiestroomdiagrammen ligt in feite de aanname ten grondslag dat energie behouden blijft (de wet van behoud van energie). Om inzicht te krijgen in die wet is het nodig te begrijpen hoe allerlei energiesoorten op dezelfde manier gekwantificeerd kunnen worden. Deze diagrammen worden echter al in een vroeg stadium gebruikt, voordat dit de leerlingen duidelijk kan zijn.
- Nergens wordt goed aangegeven waar het begrip energie op gebaseerd is, er worden steeds impliciete definities gegeven. Ook wordt niet expliciet gemaakt waar de eenheden vandaan komen.
- Warmte wordt uitgebreid behandeld in de methode. Er zijn aparte hoofdstukken aan gewijd, echter als één van de laatste begrippen die met energie samenhangen. In voorgaande hoofdstukken wordt echter al aangenomen dat leerlingen weten dat warmte

een vorm van energie is. Historisch heeft de (moeizame) ontwikkeling van het begrip 'warmte' aan de basis gelegen van het energiebegrip⁹. Pas door de mogelijkheid warmte te kwantificeren, kon de wet van behoud van energie opgesteld worden. Deze relatie tussen warmte en energie wordt hier pas aan het einde gelegd, waardoor de eenheid in en de herkomst van de energiebegrippen lang impliciet blijft.

- Er wordt (summier) aandacht besteed aan het verband tussen energie op macro en micro niveau: warmte en beweging van moleculen, faseovergangen en vanderwaalskrachten, elektrische energie en het versnellen van elektronen.
- Er wordt vaak en snel overgegaan naar het werken met formules om diverse energievormen te berekenen. Er wordt waarschijnlijk niet diep genoeg ingegaan op fenomenen om basale begrippen voldoende te ontwikkelen.

In Systematische Natuurkunde komt energie halverwege deel 1 (Middelink et al., 1998) voor het eerst voor. De paragraaf (4.3) heet *Arbeid en energie*. De inleiding gaat over de dagelijks leven context: *energiebehoefte, energiebeheer, energieverbruik, energiebedrijf*. Vervolgens:

De vraag 'Wat is energie?' is moeilijk te beantwoorden. Makkelijker is het om te zeggen wat 'energie bezitten' betekent. Als men namelijk zegt dat je 'veel energie bezit', dan wordt daar vaak mee bedoeld dat je veel werk kunt verzetten, dat je in staat bent veel arbeid te verrichten. Maar om die energie te krijgen, moet je eten en drinken.

Even verder staat dan als definitie:

Energie bezitten' betekent: in staat zijn arbeid te verrichten. Anders gezegd, om arbeid te kunnen verrichten is energie nodig.

Vervolgens wordt een aantal voorbeelden gegeven van energiesoorten, op grond van deze definitie: *Stromend water (watermolen), luchtstroom (zeilboot), heiblok, gespannen veer (schiet kogel weg).*

Als laatste wordt warmte genoemd: *Als je in je handen wrijft, voel je je handen warm worden. Door de wrijving van de ene huid langs de andere huid verricht de wrijvingskracht arbeid. Deze arbeid wordt omgezet in warmte (symbool Q). De warmte wordt in je handen opgenomen. De warmte Q die ontstaat ten gevolge van arbeid die door de wrijvingskrachten wordt verricht, blijkt wat betreft grootte gelijk te zijn aan de wrijvingsarbeid W_w .*

Hierbij wordt er zonder meer van uitgegaan dat warmte en arbeid in dezelfde eenheid kan worden uitgedrukt, dat bij het wrijven in je handen de arbeid gemeten kan worden, dat ook de warmte gemeten kan worden die in je handen door het wrijven ontwikkeld wordt. Deze conclusies kunnen alleen getrokken worden op basis van de wet van behoud van energie, maar die is nog niet behandeld. Dat komt in de volgende paragraaf. Aan de hand van een slinger wordt die wet geponeerd: kinetische energie gaat over in potentiële energie. Vervolgens komt een reeks sommen waarin dit in allerlei klassieke mechanische situaties wordt toegepast. Ook hierbij komt het voor dat er uitgerekend moet worden met behulp van de wet van behoud van energie hoeveel wrijvingswarmte ontwikkeld is. Dat duidt er op dat de wrijvingswarmte ook energie is. Kijken we nu weer naar de definitie die

⁹ Het ontwikkelen van het warmtebegrip heeft als katalysator gewerkt om het begrip mechanische arbeid en begrippen die op dat moment gelijkstonden aan de nu gebruikte begrippen kinetische en potentiële energie, tot een eenheid te smeden. Later kon het energiebegrip binnen de elektriciteit ontwikkeld worden op basis van het warmtebegrip. Zo werd in de negentiende eeuw in een samenspraak van de diverse disciplines het energiebegrip ontwikkeld (Bernal, 1971).

in het begin van energie gegeven is, dan moet die in staat zijn om arbeid te verrichten. Met andere woorden: de ontwikkelde wrijvingswarmte zou ook arbeid moeten kunnen verrichten.

Twee volgende paragrafen behandelen *Vermogen en rendement*. Ook hier vooral klassieke definities en sommen. Bij rendement wordt gerekend aan het rendement van een auto. Nu wordt wel over energieverbruik gesproken, zonder dat gethematiseerd wordt dat dit niet spoort met het behoud van energie. Wel wordt gezegd dat een groot deel van de energie die de benzine levert *in de vorm van warmte verloren gaat*. Overigens wordt hier een zelfde fout gemaakt die ook in Banas voorkwam:

Om een auto te laten rijden, heb je benzine nodig. Bij verbranding van benzine in de motor komt energie vrij. Daardoor is de motor in staat arbeid te verrichten. Ongeveer 25% van de vrijkomende energie wordt uiteindelijk omgezet in 'nuttige energie', dat wil zeggen: in bewegingsenergie van de auto. De rest gaat in de vorm van warmte 'verloren', vooral via de uitlaatgassen.

Als 25% van de energie in bewegingsenergie wordt omgezet, zou de auto voortdurend moeten versnellen en uiteindelijk zelfs de lichtsnelheid bereiken! De 'nuttige energie' gaat uiteindelijk ook 'verloren' in de vorm van warmte. Nuttig was dat de auto de inzittenden vervoerd heeft, niet dat er bewegingsenergie ontstaan is. Hier had de eerder geciteerde definitie goed gebruikt kunnen worden: de energie is 'nuttig' gebruikt om arbeid te verrichten!

Energie komt in deel 1 pas weer voor in paragraaf 7.7 *Elektrische energie en elektrisch vermogen*. Hierin komen voor: warmteontwikkeling en de formules voor elektrische energie en vermogen, kWh en J.

In deel 2 (Woerkom, 2000) komt energie alleen voor bij trillingen en golven: de trillingsenergie bij een harmonische trilling en de energie die bij een golfbeweging wordt doorgegeven.

In deel drie (Jansens & Woerkom, 2001) wordt het meten van warmtehoeveelheden behandeld in hoofdstuk 3: soortelijke warmte, warmtecapaciteit, verbrandingswarmte. Allemaal onderwerpen die in feite eerder bekend verondersteld waren. In de volgende paragraaf komt de eerste hoofdwet van de warmteleer aan de orde en, zeer summier, de verschillende soorten energie van moleculen. In paragraaf 3.5 wordt de tweede hoofdwet van de warmteleer behandeld, met het begrip 'kwaliteit van energie'. Zeer kort kom verder het milieueffect aan bod, gekoppeld aan het gebruik van afvalwarmte. De laatste twee paragrafen worden besteed aan 'anders omgaan met energie' (onder andere alternatieve energievormen) en 'warmtehuishouding in het menselijk lichaam' (relatie tussen gebruikt voedsel, opgenomen energie, activiteiten, bewegen, lichaamstemperatuur, omgevingstemperatuur).

Scheikunde

In de bestudeerde scheikundemethoden Chemie (Pieren et al., 1998; 1999) en Chemie Overal (Franken et al., 1998; 1999) wordt er bij de behandeling van chemische aspecten van energie veelal van uitgegaan dat de leerlingen een hele reeks natuurkundige concepten paraat hebben. Te denken valt aan het rekenen met warmte en het verband tussen warmte en energie; behoud van energie; energie die benodigd is respectievelijk vrijkomt bij faseovergangen; elektriciteit en elektrische energie; atoombouw en energieniveaus. Die concepten zitten ook wel in het natuurkundecurriculum, maar ze zullen lang niet altijd behandeld zijn als ze bij scheikunde bekend verondersteld worden. De momenten waarop onderwerpen behandeld worden, zullen in ieder geval goed afgestemd moeten worden tussen de natuurkundedocent en scheikundedocent.

Er wordt in de methoden geen aandacht besteed aan macro-micro overgangen, vaak lopen micro- en macroredeneringen door elkaar. Energievormen die met reacties in verband staan, worden steeds macroscopisch benaderd, met behulp van warmte die vrijkomt of nodig is. Wat dit op moleculair niveau betekent (belangrijk voor biologie) wordt in de scheikundemethoden nauwelijks besproken. In Chemie komt energie op microniveau alleen voor wanneer de energieniveaus van het atoom besproken worden, als kennis op zich, gebaseerd op veronderstelde natuurkundekennis. Het wordt niet duidelijk wat het belang van deze kennis is voor de scheikunde.

Energie wordt overigens vaak min of meer geïsoleerd in aparte paragrafen behandeld, als een op zichzelf belangrijk onderwerp, het komt weinig terug als verklaringsprincipe voor andere onderwerpen.

Conclusies

In de boeken voor de tweede fase van zowel biologie, natuurkunde als scheikunde wordt (meestal impliciet) verondersteld dat over energie redelijk wat kennis aanwezig is, hetzij uit de basisvorming bij het eigen vak, hetzij behandeld bij een ander vak. Weliswaar beginnen hoofdstukken of paragrafen waarin energie voorkomt vaak op basale wijze, door aan te knopen bij het gebruik van de term 'energie' in de gewone spreektaal, maar dit niveau wordt snel verlaten zonder dat de link met de leefwereld gebruikt wordt.

Impliciete vooronderstellingen en vaktermen bemoeilijken die overgang. In de biologieboeken wordt verondersteld dat de benodigde begrippen vanuit de scheikunde bekend zijn, met name het vrijkomen en de opslag van energie op moleculair niveau. In de scheikundemethoden komt dit echter nauwelijks voor. In de scheikundeboeken wordt veel natuurkundekennis met betrekking tot energie bekend verondersteld. Met name gaat het daar al snel over warmte en inwendige energie. Deze begrippen komen in de natuurkundemethode echter pas vrij laat aan bod. Bij natuurkunde wordt energie uitgebreid behandeld. Het verband met warmte wordt pas laat expliciet gelegd, impliciet wordt het echter al wel direct bekend verondersteld.

De samenhang tussen energie op macro en micro niveau krijgt te weinig aandacht. Energie wordt ingevoerd vanuit waarneembare fenomenen: macroscopische verschijnselen. Er wordt bij natuurkunde doorgaans wel aandacht aan de relatie met moleculen besteed, bijvoorbeeld hoe energie op macroscopisch niveau samenhangt met beweging en onderlinge afstand van de moleculen. Met name biologie gebruikt dat in moleculen energie is opgeslagen, maar het blijft in het ongewisse welk mechanisme daar verantwoordelijk voor is. Bij scheikunde komt energie op microniveau nauwelijks voor in de leerboeken, energiebeschouwingen betreffen nagenoeg uitsluitend hoeveelheden stoffen van de orde van grootte van een mol.

5.4 Naar meer afstemming en beter begrip van energie

Inleiding

Zoals geconcludeerd komt de term 'energie' veel voor in leerboeken van natuurkunde, biologie en scheikunde, maar is er vrij weinig overeenstemming met betrekking tot de inleiding in en gebruik van dit begrip. Het door elkaar heen lopen van betekenissen uit het dagelijks leven en de wetenschappelijke betekenis zorgt voor verwarring.

De voorstellen die we hierna formuleren om de afstemming en consistentie te bevorderen, hebben als doel de leerlingen een beter begrip van energie te laten krijgen en hun motivatie te vergroten, twee aspecten die nauw met elkaar samenhangen.

Om leerlingen met het wetenschappelijke energie begrip vertrouwd te maken, zal het niet

voldoende zijn om binnen de school goede afspraken te maken op het gebied van terminologie en volgorde. Dit abstracte energiebegrip is voortgekomen uit langdurig onderzoek van vele wetenschappers. In dit begrip zijn ontwikkelingen op vele terreinen van de wetenschap samengekomen, zowel uit de natuurkunde, scheikunde biologie als uit de wiskunde. Vaak is van perspectief gewisseld, vele experimenten zijn nodig geweest. Ook leerlingen zullen vele nieuwe ervaringen nodig hebben en geregeld van perspectief moeten wisselen om enigszins een beeld van dit begrip te kunnen krijgen. In het vervolg schetsen we globaal een weg die via een intuïtief energiebegrip zou kunnen leiden tot een eerste inzicht in het wetenschappelijke energiebegrip.

Ons uitgangspunt is dat de leerlingen het woord ‘energie’ associëren met voor hen bekende voorwerpen, gevoelens en situaties uit het dagelijks leven: het woord heeft betekenis gekregen door het gebruik in die situaties¹⁰. Door de situatiegebondenheid zal die betekenis echter niet eenduidig zijn¹¹. De eerste stappen naar meer samenhang zouden dan een afstemming, uitbreiding en precisering van het woordgebruik voor het dagelijks leven kunnen inhouden. Het woordgebruik in het dagelijks leven heeft vooral betrekking op wat we ‘nuttige energie’ zouden kunnen noemen. Wij krijgen energie, voelen ons energiek, de benzine voor de auto, Deze energie wordt verbruikt, raakt op, kan slechts gedeeltelijk in een andere nuttige energiesoort omgezet worden¹². Binnen dit kader kun je heel praktisch met energiehoeveelheden werken, maar niet de wet van behoud van energie formuleren.

De wetenschappelijke formulering van de wet van behoud van energie, berust op het principe dat allerlei verschijnselen die bij energieomzettingen, in de zin zoals hiervoor genoemd, optreden (‘warmteverlies’, uitzetting, faseverandering...) gekwantificeerd worden met behulp van ‘hoeveelheden warmte’ en vervolgens ook ‘energie’ genoemd worden. Dat is echter niet meer allemaal nuttige energie: het wetenschappelijk begrip ‘energie’ heeft een andere betekenis gekregen dan het dagelijks leven begrip ‘energie’, dat vooral ‘nuttige energie’ betreft. De wet van behoud van energie, en daarmee in feite ook energie zelf, kan men daarom pas begrijpen wanneer men inzicht heeft in ‘hoeveelheden warmte’. Veel problemen die leerlingen hebben met het energiebegrip (Valk, 1992; Watts, 1983) worden waarschijnlijk mede veroorzaakt doordat warmte en temperatuur nog niet zó behandeld waren dat leerlingen warmte konden zien als een kwantificeerbare grootheid. Om de leerlingen met een meer wetenschappelijke begrip ‘energie’ kennis te laten maken, zal hun ervaringswereld daarom uitgebreid moeten worden met relevante verschijnselen en daarmee samenhangende basale begrippen uit de klassieke warmteleer in hun onderlinge samenhang zoals: ‘warmte’, ‘temperatuur’, ‘soortelijke warmte’, ‘warmtecapaciteit’, ‘verdampingswarmte’ en ‘smeltwarmte’. Daarna zullen ze moeten ervaren hoe met behulp van een dergelijk begrippenapparaat allerlei zaken konden worden gekwantificeerd en onder één noemer gebracht die wij nu ‘energie’ noemen.

¹⁰ Dat betekent niet dat leerlingen een ‘alternatief beeld’ hebben van het wetenschappelijke begrip ‘energie’, dit begrip bestaat voor hen eenvoudigweg nog niet zolang ze geen natuurwetenschappelijke vorming hebben gehad. We noemen het ook geen misconceptie, leerlingen zullen wanneer ze het woord ‘energie’ gebruiken daar hun eigen beeld bij hebben dat misschien beperkt, maar voor het gebruik in hun dagelijks leven doorgaans correct is.

¹¹ Watts (1983) heeft de manieren waarop leerlingen ‘energie’ gebruiken, in zeven categorieën ondergebracht: 1. ‘Human centred’ energy; 2. A ‘depository’ model of energy; 3. Energy is an ‘ingredient’; 4. Energy is an ‘obvious’ activity; 5. Energy is a product; 6. Energy is functional; 7. A flow-transfer model of energy.

¹² Het gaat hier in feite om wat in de techniek ‘exergie’ genoemd wordt.

Hoever hun energiebegrip ontwikkeld wordt, zal afhangen van de mate van samenhang die ze tussen die verschijnselen en begrippen kunnen gaan ervaren.

We doen hier enkele suggesties om deze precisering en uitbreiding te structureren, verdeeld over onder- en bovenbouw. Om deze suggesties beter te kunnen expliciteren, gebruiken we twee aparte schrijfwijzen: **energie** wanneer het gaat om de betekenis in het dagelijks leven, **energie** wanneer het wetenschappelijk begrip bedoeld is¹³.

Onderbouw

We gaan ervan uit dat leerlingen vertrouwd zijn met het gebruik van het woord energie in het dagelijks leven, en dat de betekenis die zij daaraan toekennen contextgebonden is: ‘Mars geeft energie’, ‘ik heb geen energie meer’, ‘mijn mobiel heeft geen energie meer’, ‘uitputting van energievoorraden’, enzovoort. In het basisonderwijs hebben leerlingen daar misschien al wat aan gedaan, maar dat gaat niet verder dan deze contexten. Kerndoel 33 (OCenW, 1998c) luidt als volgt:

De leerlingen kunnen onderzoeken welke kenmerken verschillende energiebronnen hebben en aangeven welke energiebronnen worden gebruikt voor verwarming, verlichting en beweging (bijvoorbeeld: fossiele delfstoffen, wind-, water-, en zonne-energie).

Hier proberen we een eerste weg aan te geven hoe we, startend vanuit een energie begrip van de leerlingen, hen ervaringen kunnen laten opdoen die hen voorbereiden op het ontwikkelen van een **energie** begrip. In eerste instantie wordt het repertoire aan ervaringen van leerlingen waarin ze de term energie kunnen gebruiken uitgebreid en wordt het gebruik van die term gepreciseerd. Hun energiebegrip zal vooral samenhangen met bruikbare energie.

We gaan daarom uit van vier gebieden in het dagelijks leven waarbij in die zin energie aan de orde is: *voedsel, autorijden, de elektriciteitsrekening en de uitputting van energievoorraden*. Te verwachten valt dat ze in de beleving van de leerlingen nog tamelijk los van elkaar staan, er zal niet direct gezien worden dat (en zeker niet hoe) de energie die de mens uit voedsel haalt werkelijk vergelijkbaar is met de energie die elektriciteit levert. De vergelijking kan wel gemaakt worden, maar zal slechts het karakter van een metafoor hebben. Daarom gebruiken we hier voor de diverse contexten waarin energie voorkomt in het vervolg ook verschillende schrijfwijzen: **energieA** (i.v.m. voedsel), **energieB** (i.v.m. transport) en **energieC** (i.v.m. elektriciteit). We stellen voor om deze drie contexten in eerste instantie ook geïsoleerd van elkaar, zonder onderlinge verbanden, te behandelen. In al deze contexten kan het verbruik van energie en daarmee de uitputting van energiebronnen aan de orde komen. We verwachten dat bij leerlingen de vraag op zal komen wat die verschillende energievormen met elkaar te maken hebben. Dit zal dan een behoefte oproepen aan een afronding, een stap op weg naar een **energiebegrip**.

Het is pas mogelijk de essentie van de wet van behoud van **energie** in te zien wanneer je weet dat **energievormen** in elkaar kunnen overgaan en de centrale plaats die warmte daarbij heeft. Daarom stellen we als vierde en afsluitende context voor de onderbouw voor een ‘laboratoriumsituatie’ waarin overgangen van de ene **energievorm** in de andere gedemonstreerd worden en waarbij het tevens duidelijk wordt dat er daarbij altijd energie

¹³ Deze hier gebruikte schrijfwijze betekent niet dat we er ook voor pleiten in het onderwijs of in de boeken die schrijfwijze te gebruiken. Ze wordt hier gehanteerd om in een discussie onder docenten en didactici het probleem duidelijk te maken.

verloren gaat en er doorgaans warmte geproduceerd wordt. Hiermee zijn leerlingen op weg naar een **energiebegrip** in de bovenbouw.

De vijf contexten passen bij de drie verschillende vakken: **energieA** (i.v.m. voedsel) betreft biologie in het eerste of tweede jaar, **energieB** (i.v.m. transport en brandstoffen) past bij scheikunde in het tweede of derde jaar en **energieC** (i.v.m. elektriciteit) kan in feite alleen bij natuurkunde in het tweede of derde jaar. De afsluitende laboratoriumcontext, m.b.t. de overgang van de verschillende energievormen in elkaar, zou in het derde jaar bij natuurkunde en/of scheikunde een plaats kunnen krijgen. De uitputting van energiebronnen, de vijfde context, kan bij alle vier de voorgaande contexten aan bod komen. Beide laatste contexten hebben een integrerende functie.

1. **EnergieA** staat voor leerlingen in verband met voedsel. Dit kan een opening naar twee begrippen maken: er zijn energiebronnen (het voedsel) en je kunt over hoeveelheden van **energieA** spreken (benoembaar met getallen en een eenheid).

Van deze energiebronnen is het min of meer duidelijk hoe ze ontstaan: ze komen in de natuur voor (vissen, wild, wilde planten) of ze moeten verbouwd, gekweekt of gefokt worden. In het laatste geval is er zorg nodig. In alle gevallen zijn er ook andere bronnen nodig zoals water en de zon. De ene **energieA** bron kan in een andere overgaan (planten in dieren in mensen...)^{14,15}.

Het is ook een ingang van waaruit de uitputting van energiebronnen kan worden begrepen: op een gegeven ogenblik zijn sommige **energieA** bronnen ‘op’ (droogte → hongersnood, etc.).

Leerlingen beseffen heel goed dat de ene **energieA** bron meer energie geeft dan de andere, meer voedsel betekent ook meer energie. Dit levert waarschijnlijk een intuïtieve notie op dat **energieA** die uit een bron gehaald wordt gekwantificeerd kan worden.

Als eenheid bij **energieA** kan de bij voedingsleer gebruikelijke eenheid genomen worden¹⁶. Als je gegeten hebt, voel je je weer energiek, je kunt er weer tegen (in feite pas als je het voedsel enigszins verteerd hebt: direct na de maaltijd ben je soms slaperig). De **energieA** zit dan in jou, jij hebt **energieA** gekregen, jij kunt dan weer iets doen^{17,18}. Naast **energieA** bevat voedsel ook bouwstoffen en andere noodzakelijke

¹⁴ We hebben het hier uitdrukkelijk nog niet over het behoud van **energie**! Dat concept wordt pas begrijpelijk als overgangen van verschillende **energie** vormen in elkaar duidelijk zijn en wanneer warmte ook als **energie** wordt herkend.

¹⁵ In dit verband kan gezegd worden dat we datgene wat planten van de zon (of lampen) krijgen om te kunnen groeien, ook energie noemen. We benoemen dan al een langere keten: (zon)licht – plant – (dier) – mens waarin energie overgedragen wordt. Deze overdracht van energie is nog geen behoud van energie: op het einde kan de energie verdwenen zijn!

¹⁶ Als dat nog de calorie is, is dat geen probleem. Het gaat om de notie dat iets dat **energie** genoemd wordt, gekwantificeerd kan worden. Dat het een zelfde eenheid heeft als bijvoorbeeld de energie van benzine of elektriciteit is eerder raar dan vanzelfsprekend, ook al wordt voor al deze zaken het woord ‘energie’ gebruikt.

¹⁷ Wanneer je als persoon de energie van het voedsel hebt opgenomen en je zelf weer energiek voelt, is er energie van het voedsel naar jou gegaan. Dat betekent echter nog geen behoud van energie in de optiek van de leek: jij verbruikt de energie, na verloop van tijd is die weer weg, deze keer zelfs helemaal verdwenen.

¹⁸ Overigens wordt in het dagelijks leven hier ook wel de term kracht gebruikt: “je bent weer op krachten gekomen”. ‘Kracht’ moet hier als synoniem voor ‘energie’ gezien worden, wat het in de natuurkunde niet is!

componenten, zoals zouten (mineralen) en vitaminen. De hoeveelheid van deze componenten kan niet met de eenheid voor energieA benoemd worden. Het is in dit verband niet nodig om het te hebben over ‘verbranding in cellen’. Deze uitspraak kan niet begrepen worden zonder enige kennis van wat in de scheikunde onder ‘verbranden’ wordt verstaan. Bovendien voegt de uitspraak niets toe, ze suggereert zelfs dat de energie alleen maar nodig zou zijn om het lichaam warm te houden. Vanuit het gebruik van energie in leefwereldtaal is duidelijk dat energie zowel nodig is voor verwarming als om iets op te bouwen. Het is aannemelijk dat dit bij je lichaam (of bij planten) ook wel zo zal zijn¹⁹.

2. Een auto heeft brandstof nodig om te kunnen rijden. Vergelijkend met mensen, en gebruikmakend van een metafoor, kunnen we zeggen dat de auto energieB nodig heeft, de energiebron is benzine. EnergieB wordt verbruikt, gebruikt om te rijden. Het heeft om twee redenen geen zin om hier er over te praten dat ‘brandstofenergie wordt omgezet in bewegingsenergie’. Om te beginnen is bewegingsenergie een fysisch begrip dat staat voor $\frac{1}{2}mv^2$. Dat heeft geen betekenis voor de leerlingen in de onderbouw. Bovendien suggereert het dat de hele energie van de benzine wordt omgezet in bewegingsenergie wat uiteraard niet waar is. Bijna alles is nodig om de motor te laten draaien en de auto te laten rijden²⁰. Ook aan de energieB die de benzine kan leveren, kan een getal worden gehangen. De eenheid is hierbij de joule. Door die maat is het mogelijk hoeveelheden energieB die verschillende bronnen leveren met elkaar te vergelijken (diesel, benzine, kerosine). Ook nu is het niet nodig te weten waar die vandaan komt, het is voldoende begrijpelijk dat hier een maat voor ingevoerd kan worden. Het lijkt bij benzine eenvoudig te zijn om te vertellen hoe men aan de maat komt: verbranden en meten hoeveel water er verwarmd kan worden met een zelfde hoeveelheid brandstof. Ook al wordt voor benzine de term brandstof gebruikt, het is toch niet vanzelfsprekend dat de energieB om de auto te laten rijden, met dezelfde maat gemeten kan worden als het verwarmen van water (bovendien kunnen leerlingen in de onderbouw doorgaans nog niet met warmte rekenen). Hier geldt hetzelfde bezwaar dat we ook bij het verbranden van voedsel in ons lichaam zagen. De relatie wordt pas inzichtelijk met de equivalentie van arbeid en warmte zoals die door Joule is aangetoond.

Behalve het woord energie hebben energieA en energieB meer gemeenschappelijk. Die analogieën kunnen we gebruiken als stappen op weg naar een energie begrip. Bijvoorbeeld bij allebei was sprake van een ‘energie bron’. Voor het krijgen van energie is altijd op een of andere manier materie nodig geweest. Dit inzicht is belangrijk voor het verband met de volgende twee contexten.

¹⁹ Dat de energie-eenheid ‘joule’ voor voedsel hier wordt geïntroduceerd zonder aan te geven dat de energie van voedsel gemeten wordt door het voedsel te verbranden en de vrijkomende warmte te meten, is geen verlies, want dit gebeurt nu toch al niet in de schoolboeken, zoals eerder is beschreven.

²⁰ Hoewel het verleidelijk is, heeft het weinig zin om hier de term ‘arbeid’ te gebruiken. Dit is een generalisatie van veel van dit soort bewegingen. Ze zou gebruikt kunnen worden wanneer meerdere soorten klussen waar benzinemotoren bij ingezet worden aan de orde komen, zoals een grasmaaiër of een hijsmachine. Het is een goede term om te introduceren in het afsluitende deel.

3. In het dagelijks leven wordt energie bij uitstek gekwantificeerd door de **energie** rekening. We zouden daarbij apart kunnen kijken naar de elektriciteitsrekening en de gasrekening. In de ogen van de leerlingen levert gas meestal alleen warmte, elektriciteit levert allerlei soorten comfort: licht, de werking van mechanische apparaten, tv en geluidsapparatuur. Wat het elektriciteitsbedrijf levert noemen we **energieC**, daarmee kan van alles gedaan worden. De hoeveelheid **energieC** die een apparaat per seconde nodig heeft staat erop: het aantal Watt. Door deze **energie** vorm te kwantificeren, kunnen allerlei kostenberekeningen gemaakt worden. Misschien kunnen de energieberekeningen het beste in kWh gemaakt worden, zonder op joules in te gaan. Op de rekening van de elektriciteitsbedrijven in Nederland komen tenslotte ook geen joules voor, bovendien houdt het de berekeningen eenvoudig. Problemen bij dit onderwerp worden voornamelijk veroorzaakt door het door elkaar lopen van kWh, watt en joules²¹. Nog niet met joules werken, kan als voordeel hebben dat het later misschien als verrassend gezien wordt dat de eenheid van **energieC** in joule kan worden omgezet.
4. **Energiebronnen** kunnen uitgeput raken. Duurzaamheid en uitputting kunnen in alle hiervoor genoemde contexten aan de orde komen. Dat er een wet behoud van **energie** is, dat **energie** nooit verloren gaat, is pas te begrijpen wanneer je er vertrouwd mee bent dat verschillende vormen van energie in elkaar kunnen overgaan en wanneer je in staat bent het totaal te bekijken, inclusief verlies in bijvoorbeeld de vorm van warmte of straling. We vormen dan als het ware in gedachten een gesloten systeem. In het dagelijks leven hebben we niet met een gesloten systeem te maken: ons voedsel kan opraken, het is dan niet interessant dat de **energie** behouden is en in warmte is omgezet, daar kunnen we niet van leven. Relevant is het inzicht dat de meeste van onze **energieB** bronnen uitgeput raken, dat we naar duurzame **energie** toe moeten. Dat kan op verschillende manieren: zonne-energie, wind energie, energie in een ecosysteem (biomassa). Zinvol is hier ook het inzicht dat we deze laatste vorm van 'groene' energie kunnen gebruiken, mits we niet meer gebruiken dan we aanplanten. Dit maakt een **energie** balans duidelijk: zonlicht wordt omgezet in groene planten, die we vervolgens als brandstof gebruiken.
5. Nadat in de vorige vier contexten verschillende vormen van **energie** zijn gethematiseerd, gepreciseerd en eventueel gekwantificeerd, kan nu een context aangeboden worden waarin de leerlingen zien hoe **energievormen** in elkaar kunnen overgaan. Dit is een stap naar het wetenschappelijk **energiebegrip**, het stijgt uit boven de dagelijks leven ervaring, maar is daar wel mee verwant en bouwt erop voort. De wijze van kijken naar de dagelijkse context verandert, het gaat niet meer om het directe gebruiksaspect. We plaatsen ons op een niveau van waaruit we meerdere zeer uiteenlopende zaken onder één noemer brengen. We moeten ons daartoe bovendien in een laboratoriumsituatie plaatsen. Deze context noemen we daarom een 'wetenschappelijke' context.

²¹ Daarnaast is het begrip 'spanning' belangrijk in verband met gevaren en het vergelijken van batterijen met het stopcontact. Het begrip 'stroom' en 'stroomsterkte' wordt in het dagelijks leven alleen als maat voor de stoppen in de stoppenkast gebruikt. In de natuurkundeles in de onderbouw wordt het begrip zelden duidelijk en zorgt voortdurend voor verwarring. Het is daarom de vraag of het zinnig is dit begrip in het beginonderwijs te behandelen.

Om te kunnen beseffen dat energievormen in elkaar overgaan, zullen leerlingen dat zelf eens ervaren moeten hebben, niet aan een enkele vorm maar aan vele. Veel van deze ervaringen zijn uit het dagelijks leven verdwenen, vanwege de ontoegankelijkheid van de werking van veel apparaten. We zouden de leerlingen de gelegenheid moeten bieden een veelheid van fenomenen waar te nemen. Het gaat er daarbij vooral om, ermee te spelen, ernaar te kijken, erover te praten, te bouwen (Buck, 1978). We denken aan modellen van elektriciteitscentrales (een benzinemotor, een stoommachine, een schoepenrad, die generatoren aandrijven waarop weer lampen branden), zonnecellen die licht in elektriciteit omzetten (Nuffield, 1967). Zo komt aan de orde dat voor de opwekking van elektriciteit ook **energie** bronnen nodig zijn. Dit leidt naar omzettingen van verschillende soorten energie in elkaar. De energie van brandstoffen wordt in warmte omgezet, die warmte weer in beweging, ook kan beweging direct (wind, stuwmeer, getijden) worden omgezet in elektriciteit. Ook licht (zonnestraling) kan in elektriciteit worden omgezet.

Diverse opstellingen kunnen duidelijk maken dat bij omzettingen er altijd wat verloren gaat, dat je er uiteindelijk altijd minder bruikbare energie uitkrijgt dan je erin gestopt hebt. De term 'rendement' vindt hier ook zijn plaats. Het begrip 'bruikbare energie' is ook het begrip wat maatschappelijk relevant is. Omdat in deze context allerlei bewegingen voorkomen (rijden, vallen, hijsen) is dit de plaats om eventueel als generalisatie van bewegingen het begrip 'arbeid' in te voeren, zonder dat dit direct de zware 'wetenschappelijke' lading hoeft te hebben. Iets als: bij een beweging die 'moeite' kost, zeggen we dat er 'arbeid verricht wordt', ook als er geen mensenhand meer aan te pas komt.

Dit onderdeel zou uitstekend gegeven kunnen worden in de vorm van een technisch ontwerp, waarin leerlingen bijvoorbeeld proberen zo voordelig mogelijke energieomzetters te construeren. Het kan een afsluitend werkstuk aan het einde van het derde jaar zijn, waarin de verschillende vakken (natuurkunde, scheikunde, biologie, wiskunde, maar ook techniek en aardrijkskunde en eventueel geschiedenis) de leerlingen samen de gelegenheid geven deze ontwerpen te bedenken en uit te voeren. De resultaten kunnen gepresenteerd worden in een tentoonstelling, die weer een rol kan spelen op bijvoorbeeld een ouderavond waar de leerlingen hun ouders demonstreren wat zij geleerd hebben.

Hierboven zijn mogelijkheden aangegeven hoe in de onderbouw het intuïtieve energiebegrip van de leerlingen uitgebouwd kan worden. Begrippen als 'arbeid' en 'behoud van energie' zouden vanuit deze optiek pas in de bovenbouw uitgewerkt worden en een precieze plaats krijgen. Ook microscopische beschouwingen zouden dan pas in de bovenbouw aan de orde komen. Deze zijn naar verwachting functioneler als leerlingen al met allerlei aspecten van het macroscopische energiebegrip vertrouwd zijn.

Bovenbouw

Hiervoor is beschreven hoe in de onderbouw het intuïtieve energiebegrip van de leerlingen binnen enkele dagelijks leven contexten verder uitgebouwd kan worden tot 'bruikbare energie'. Er is ook beschreven hoe een begin met kwantificeren gemaakt kan worden, beperkt tot de contexten die specifiek deze bruikbare energie betreffen. In de bovenbouw zou naar het wetenschappelijk begrip **energie** toegewerkt moeten worden, uitmondend in de wet van behoud van **energie**. In grote lijnen kan dit, voortbouwend op wat in de onderbouw ontwikkeld is, als volgt bereikt worden:

- Teruggrijpend op het laatste onderwerp uit de onderbouw, energieomzetters en hun beperkte rendement, kan bij natuurkunde een project opgezet worden om die beperking

beter te begrijpen. De leerlingen moeten weten dat ze nu gaan werken in een wetenschappelijke context, aan de hand van werk van wetenschappers in het nog niet zo verre verleden. Er worden basale begrippen behandeld uit de klassieke warmteleer in hun onderlinge samenhang zoals: ‘warmte’, ‘temperatuur’, ‘soortelijke warmte’, ‘warmtecapaciteit’, ‘verdampingswarmte’, ‘smeltwarmte’.

- Daarna kunnen de leerlingen ervaren hoe met behulp van een dergelijk begrippenkader allerlei zaken gekwantificeerd en onder één noemer gebracht kunnen worden, die wij nu ‘energie’ noemen. Hier komen **energiesoorten** uit de onderbouw terug, maar zodanig dat de hoeveelheden energie gemeten en berekend kunnen worden uitgaande van ‘warmte’. Te denken valt aan *elektrische energie*, *mechanische energie*, *chemische reacties (op stoffen niveau, macroscopisch gezien)*. Ze staan nu niet in een dagelijks leven context, maar in een wetenschappelijke context.
- Behoud van **energie** wordt begrijpelijk door nu ook de verlieswarmte als energie te definiëren, evenals verschillende vormen van inwendige **energie**. Zo wordt duidelijk dat energie niet verloren gaat, maar dat de hoeveelheid bruikbare energie wel op kan raken.
- **Energie** op microniveau, inclusief de relatie met energie op macroniveau komt nu aan bod:
 - energie van deeltjes in relatie met energie van een systeem (kinetische energie en verband met temperatuur; potentiële energie en verband met inwendige energie)
 - energie in moleculen en atomen, bijvoorbeeld energie van elektronen en kernenergie.

Van energie naar energie: de wetenschappelijke context ‘Verlies van bruikbare energie’ en ‘warmte’

De overgang naar een meer wetenschappelijke context, zou voor de leerlingen ongeveer als volgt gemotiveerd kunnen worden. *Bij het omzetten van energie van de ene soort in de andere hebben we gezien dat er steeds bruikbare energie verloren gaat, vaak krijgen we veel warmte die meestal niet meer te gebruiken is. Om het verloren gaan van bruikbare energie beter te begrijpen, en dat misschien te kunnen beperken, ligt het voor de hand om warmteverschijnselen te gaan bestuderen.*

In de onderbouw is het begrip warmte misschien wel aan bod gekomen, maar doorgaans niet als kwantificeerbare grootheid. Het gaat er nu vooral om een ‘warmtehoeveelheid’ te kunnen meten. Daarvoor is een begrip van het verschil tussen warmte en temperatuur nodig, van soortelijke warmte en de mogelijkheid om vervolgens met behulp van ‘hoeveelheid materie’ een ‘hoeveelheid warmte’ te definiëren.

Voor de ontwikkeling van het energiebegrip zijn twee basale inzichten noodzakelijk:

- Je kunt ‘hoeveelheden warmte’ meten door de stijging in temperatuur te meten van een bepaalde hoeveelheid water;
- Alle energievormen kunnen in warmte overgaan. Een hoeveelheid energie wordt in principe bepaald door de ontwikkelde hoeveelheid warmte te meten wanneer die energie helemaal in warmte zou zijn omgezet.

Voor het eerste inzicht is het nodig dat leerlingen de klassieke proeven doen betreffende calorimetrie zoals werken met soortelijke warmte en warmtecapaciteit, in het licht van de opgeroepen behoefte om warmte te kunnen gaan meten. De proeven zijn heel lastig, ze vereisen een nauwkeurig werken, maar wanneer leerlingen begrijpen waar het om gaat kunnen het heel intrigerende proeven zijn.

Als de leerlingen het meten van warmtehoeveelheden beheersen, kunnen ze in principe ook bepalen hoeveel warmte een bepaalde hoeveelheid brandstof kan leveren

(verbrandingswarmte) door deze helemaal om te zetten in warmte. Het meten van de verbrandingswarmte van brandstof is overigens praktisch lastig uit te voeren. Ook kunnen ze meten met hoeveel warmte een bepaalde 'hoeveelheid' elektriciteit kan leveren. Dit is veel gemakkelijker te bepalen: een dompelaar zet alle elektrische energie om in warmte.

Dit warmtebegrip ligt aan de basis van het energiebegrip: pas door warmte te kwantificeren werd het mogelijk energie op veel verschillende plaatsen te herkennen.

Mechanische energie

Historisch gezien heeft het begrip *mechanische energie* al lang bestaan, voordat de wet van behoud van energie geformuleerd werd. Het begrip *arbeid* (als product van kracht en weg) is rechtstreeks gerelateerd aan mechanische energie.

Ook beweging kan gemakkelijk als een vorm van energie gezien worden, wanneer de notie aanwezig is dat de ene energievorm in de andere kan overgaan. Dit kan uit de onderbouw zijn meegenomen bij het project betreffende het in elkaar over gaan van energievormen. Bijvoorbeeld bij de opwekking van elektriciteit uit stromend water en wind. Om te begrijpen hoe de kinetische energie gekwantificeerd kan worden is kennis van de mechanica op bovenbouw niveau nodig én begrip van de wet van behoud van energie: de ene energievorm kan volledig overgaan in een andere. Wanneer een voorwerp met massa m onder invloed van een constante kracht F versneld wordt over een afstand s , zonder wrijving, kan eenvoudig met kinematica aangetoond worden dat geldt $F \cdot s = 1/2 \cdot m \cdot v^2$ waarbij v de eindsnelheid is na de afgelegde weg s . Dit geldt ook voor een valbeweging, we kunnen daarmee dus de potentiële energie definiëren.

De link tussen de natuurkundige definitie van energie als 'het vermogen om arbeid te verrichten' en 'warmte' als meetbare grootheid, moet nu nog gelegd worden. Historisch gezien gebeurde dat door de experimenten van Joule. Met name het 'schoepenrad experiment' speelde een sleutelrol: een nauwkeurig gedefinieerde hoeveelheid 'arbeid' werd hierbij in een meetbare hoeveelheid warmte omgezet. Dit experiment, althans tenminste de beschrijving daarvan, kan in het onderwijs nog steeds een belangrijke rol spelen om het verband tussen mechanische energie en warmte te zien. Wanneer leerlingen goed op de problematiek zijn voorbereid, blijkt uit ervaring dat ze dit experiment naar waarde weten in te schatten.

Chemische reactie: endotherm en exotherm

Als warmte eenmaal als energie gezien wordt, kan bij scheikunde het begrip verbranding in een breder kader geplaatst worden. Het betreft een uitbreiding van de verbranding van brandstoffen naar het inzicht dat ook andere stoffen warmtebron (en dus energiebron) kunnen zijn, ook al levert het misschien weinig op. Soms kost het zelfs warmte om een reactie voor elkaar te krijgen. De warmte kan dan later wel weer vrij komen, dit legt de link naar opslag van warmte.

Inzicht hoe energie voorkomt in chemische processen is met name belangrijk om het verband tussen processen in levende wezens (ook op moleculair niveau) en energie te kunnen begrijpen. De uitgebreide definitie van verbranden, in eerste instantie het aangaan van een verbinding met zuurstof, moet hier dan ook aan de orde komen om de link te kunnen leggen naar levensprocessen en 'verbranding' in de cel. Dit is nodig als voorbereiding op hoe het energiebegrip in de biologie op cellulair en moleculair niveau gebruikt wordt.

Behoud van energie

Het energiebegrip in de verschillende contexten heeft tot nu toe voornamelijk naast elkaar bestaan. Er zal al wel een notie ontstaan zijn dat het allemaal veel met elkaar te maken zal hebben, alleen al doordat overal het woord energie en de eenheid joule gebruikt is. Het is voor een goed begrip van **energie** echter noodzakelijk de **overgangen** van de ene energievorm in de andere expliciet te thematiseren. Dit is al in de onderbouw gedaan zonder het warmteverlies te meten, nu moet warmte (zowel nuttig als verloren) kwantitatief aan bod komen. Pas door warmte ook als energie te zien kon de wet van behoud van energie geformuleerd worden. Omgekeerd wordt energie daarna weer gedefinieerd met behulp van de wet van behoud van energie: als er energie verloren lijkt te zijn gegaan, wordt net zo lang gezocht tot iets als energie opgevat kan worden (Feynman et al., 1963).

Het zal niet nodig zijn alle overgangen zo expliciet te thematiseren, het is wel belangrijk dat exemplarisch enkele gevallen uitgebreid worden behandeld. We noemen hierna enkele die om diverse redenen meer aandacht verdienen.

- Overgang *elektrische energie in beweging en warmte*. Het is experimenteel gemakkelijk te doen, geeft een beter inzicht in elektrische energie en werkt voorbereidend op het begrip ‘behoud van energie’.

- Overgang van *warmte in inwendige energie en omgekeerd*. Daarbij gaat het bijvoorbeeld om verdampingswarmte en smeltwarmte, die experimenteel eenvoudig vastgesteld kunnen worden. Dit geeft inzicht in de opslag van energie in stoffen door middel van faseovergangen (de energieopslag bij temperatuurstijging moet hiervoor al aan bod zijn gekomen). Het zijn macroscopische begrippen, die voorbereidend werken op het begrip van energie op microscopisch niveau.

- Kan de *warmte die in levende wezens* ontwikkeld wordt, herleid worden tot natuurkundige of chemische processen? Wat heeft de energie die we krijgen door te eten, te maken met de energie die een auto krijgt, of die in de elektriciteitscentrale opgewekt wordt? Dit wordt voor zover we weten nergens gethematiseerd in schoolboeken voor de tweede fase. De warmteproductie kan waarschijnlijk gebruikt worden om bij leerlingen de vraag op te roepen of in de cellen chemische processen plaatsvinden²². Dit kan weer leiden tot de vraag of alle levensprocessen chemische processen zijn. Dit soort vragen heeft in de historie een belangrijke rol gespeeld om steeds meer overeenkomst te gaan zien tussen alle materiële dingen op aarde, of het nu levende of levenloze natuur betrof. Deze vragen beginnen doorgaans leerlingen in het vierde jaar te boeien.

Energie op microniveau

Alle hiervoor genoemde verschillende invalshoeken hangen samen met ‘behoud van energie’. De wet van behoud van energie kan uitstekend op macroniveau geformuleerd worden, er zijn nog geen beschouwingen over moleculen nodig. Het formuleren van de wet van behoud van energie betekent het op hun plek vallen van de verschillende stukjes van een puzzel. De overgang van macro naar micro moet bewust en zorgvuldig gemaakt

²² Historisch gezien is dit een belangrijke vraag geweest op weg naar de formulering van het begrip van behoud van energie. Toen men in het begin van de 19^e eeuw zocht naar de oorzaak van de ‘dierlijke warmte’ passeerden vele theorieën de revue. Bijvoorbeeld dat de warmte werd opgewekt door de wrijving van de vaste deeltjes in het bloed. Lavoisier en Laplace ontdekten experimenteel dat de oxidatie van koolstof die gevonden kan worden in de koolwaterstoffen van het bloed, niet genoeg was om exact de geproduceerde hoeveelheid warmte te verklaren (Elkana, 1975).

worden. Dit gebeurt in de schoolboeken bijna altijd impliciet, met soms in dezelfde zin macro en microredeneringen naast elkaar. Dit zorgt voor verwarring en onbegrip. Het is te verwachten dat begrip van de wet van behoud van energie, en daarmee het in beginsel aanwezig zijn van een wetenschappelijk energiebegrip, een goede voorwaarde is om energie op microniveau beter te kunnen begrijpen. Dan nog zal de overgang naar het microniveau zorgvuldig gemaakt moeten worden. Redeneringen die op het beschrijven van fenomenen stoelen, en dus macroscopisch van aard zijn, kunnen niet zonder meer naar het microniveau overgezet worden. We onderscheiden twee aspecten:

1. Energie van deeltjes zelf en ten opzichte van elkaar.

Hierbij gaat het om een directe relatie tussen de energie van deeltjes en de energie van een systeem. Het verband tussen temperatuur en de beweging van deeltjes is een daarbij een centraal begrip. Wanneer het principe van mechanische energie op macroniveau bekend is, kan dit vervolgens getransformeerd worden naar het microniveau: moleculen hebben bewegingsenergie. Het begrip ‘vanderwaalskracht’ is nodig om de relatie te leggen tussen de macroscopische potentiële energie en de verklaring van de inwendige energie met behulp van moleculen. Bij energiebeschouwingen op dit niveau veranderen de deeltjes zelf niet, de energie die macroscopisch gezien al bekend was, kan in principe vrij simpel in gedachten verdeeld en aan de deeltjes zelf toegekend worden. De verklaringsprincipes zijn ook vrij analoog aan hun macroscopische equivalent.

2. Energie in moleculen en atomen

Bij deze energie op microniveau is de parallel met macroscopische verschijnselen minder makkelijk te trekken. We denken aan:

- bindingen tussen atomen, verband met endotherme en exotherme reacties.

Macroscopisch gezien gaat het hier om scheikundige reacties en hun energie. De vrijgekomen of opgeslagen energie kan ook nu weer in gedachten verdeeld worden over alle deelnemende moleculen, maar wat is dan het principe dat in het molecuul voor de energiebinding zorgt? Hier komen elektrische krachten in het spel, willen we ook in het microscopische verklaringsprincipe macroscopische analogieën handhaven dan vraagt dit dat leerlingen vertrouwd zijn met de elektrostatica²³.

Het inzicht dat energie opgeslagen kan worden in moleculen is nodig in de biologie bij de beschrijving van diverse kringlopen.

Verder denken we bij energie in atomen aan:

- bindingen tussen kern en elektronen, verband met straling;
- bindingen in atoomkernen, verband met kernenergie

Dit hoort bij de klassieke natuurkundestof, ze worden daar doorgaans vrij grondig behandeld op microscopisch niveau. Er zal hier ook meer aandacht nodig zijn voor de relatie micro – macro. Hier gaan we daar nu niet verder op in.

²³ Daar wordt in het havo-vwo programma echter weinig aandacht meer aan besteed.

5.5 Conclusies en aanbevelingen

Het begrip energie is een bindend en unificerend principe in de natuurwetenschappen. Het heeft ook een centrale plaats in het dagelijks leven gekregen. Daar heeft het echter een andere betekenis dan in de natuurwetenschappen. In de leefwereldtaal gaat het om nuttige energie, die verbruikt wordt. De wetenschappelijke taal is ontwikkeld rondom het concept behoud van energie.

In de schoolboeken van de drie natuurwetenschappen zijn we in grote lijnen drie problemen tegengekomen die moeilijkheden kunnen veroorzaken bij het leren van leerlingen over energie.

1. Bij alle vakken wordt in eerste instantie van een leefwereldtaal uitgegaan bij het behandelen van energie, maar al snel wordt de term energie in een wetenschappelijke betekenis gebruikt zonder dat dit begrip eerst bij leerlingen is ontwikkeld. Hierdoor ontstaat noodzakelijkerwijs een ‘kloof van niet-verstaanbaarheid’ tussen leerling en boek/leraar (Voorde, 1977). Het wordt manifest in de contradictie: behoud van energie - verbruik van energie.
2. Er is geen of weinig afstemming tussen de vakken wat betreft het gebruik van het onderwerp energie. In de natuurkunde wordt het het meest grondig behandeld, bij scheikunde en biologie wordt het echter al bekend verondersteld op momenten dat het bij natuurkunde nog niet aan de orde is geweest. Verder veronderstelt met name biologie dat een scheikundig energieconcept ontwikkeld wordt. Als daar in de scheikunde iets aan wordt gedaan is het veel later dan het bij biologie bekend verondersteld wordt.
3. Voor het ontwikkelen van een wetenschappelijk energiebegrip is het begrijpen en kunnen werken met aspecten van de klassieke warmteleer onmisbaar. Als dit al wordt aangeboden is het op een tijdstip dat leerlingen er waarschijnlijk nog niet aan toe zijn (onderbouw), of te laat waardoor het niet de noodzakelijke centrale rol kan hebben bij de begripsontwikkeling.

We hebben een behandeling van energie voorgesteld, die er in grote lijnen op neerkomt:

- A. Beperk je in de onderbouw tot het concept van energie dat voor het dagelijks leven belangrijk is, namelijk bruikbare energie. Dat betekent voornamelijk:
 - i. Vermijd wetenschappelijk getinte gekleurde beschouwingen en berekeningen, die stoeien op het begrip behoud van energie;
 - ii. Concentreer het werken met energie rond een aantal contexten waarin bruikbare energie centraal kan staan, zoals voedsel, brandstof en elektriciteit in huis;
 - iii. Besteed aandacht aan de energieproblemen: uitputting grondstoffen, milieueffecten;
 - iv. Een afsluitend thema kan betrekking hebben op het opwekken van energie, dit bereidt tevens voor op de behandeling in de bovenbouw van het wetenschappelijke energiebegrip.
- B. Werk in de bovenbouw aan een zorgvuldige ontwikkeling van het wetenschappelijke energieconcept. Dit kan in de onderbouw zijn voorbereid door bij het opwekken van energie de energieovergangen te thematiseren, inclusief het verlies van bruikbare energie.

Het is een voorstel dat in principe binnen het huidige examenprogramma gerealiseerd kan worden, met herschikking van stof zoals die in de schoolboeken voorkomt. In de onderbouw betekent het in veel gevallen een schrappen van zaken, maar meer aandacht

voor bruikbare energie, inclusief zowel de persoonlijke als de maatschappelijke aspecten. In de bovenbouw betekent het een bezinning op de wijze van behandelen van het energieconcept, wat een drastische herschikking van de stof zoals die in veel leerboeken voorkomt met zich mee zal brengen, en het nadenken over en maken van additioneel materiaal (zowel voor practica als theorie).

Zowel in onder- als bovenbouw zal daarbij een goede verdeling van aandachtspunten over de verschillende vakken nodig zijn, zowel qua onderwerp als qua tijd.

Om te onderzoeken hoe een en ander in de praktijk vorm kan krijgen, zou het aan te bevelen zijn om een groep docenten in de natuurwetenschappen van één school, samen met één of meer vakdidactici te laten werken aan het vormgeven en uitvoeren van dit programma. Er wordt dan zichtbaar waar de mogelijkheden en problemen voor docenten liggen om op het gebied van energie meer samenhang in het onderwijs aan te brengen en waar en in welke vorm eventueel extra ondersteuning gewenst is.

5.6 Het proces

Uit een aantal onderwerpen vanuit de chemie en natuurkunde is het onderwerp energie gekozen als voorbeeld van een transdisciplinair onderwerp. De docenten vonden energie een goed onderwerp om samenhang mee vorm te geven, omdat de vakken er allemaal bij betrokken zijn. Bovendien levert het onderwerp in de klas bij leerlingen veel verwarring op. Er is behoefte aan ondersteuning wat betreft dit thema.

Om de problemen met energie in het bètaonderwijs in kaart te brengen en om mogelijkheden voor meer samenhang te signaleren is begonnen met het bestuderen van lesmethoden van de verschillende vakken voor de bovenbouw. Naar aanleiding van discussies binnen het kernteam en met de docenten is ervoor gekozen ook de onderbouw te betrekken, omdat de basis voor een energiebegrip daar reeds wordt gelegd. Dus zijn ook enkele onderbouwmethoden bestudeerd, door de docenten aangeraden, zoals Banas.

Volgens de docenten leek een doorlopende leerlijn energie goed haalbaar. De inhoudelijke problemen met dit onderwerp zagen zij niet als belemmering voor samenhangend onderwijs hierin. Hierbij hoort ook de opmerking dat je niet als doel moet hebben om precies aan te geven wat energie is.

Vervolgactiviteiten voor korte en lange termijn zijn geformuleerd aan de hand van de gesignaleerde mogelijkheden, knelpunten en opmerkingen van de docenten die niet in de huidige stukken verwerkt konden worden.

Reacties van docenten

De hoofdpunten uit de discussies met de docenten over de uitgewerkte mogelijkheden om energieonderwijs vorm te geven zijn hieronder beknopt weergegeven.

- Hoe kan wiskunde bij energie worden betrokken? Wiskunde krijgt een plaats bij efficiëntie berekeningen van bijvoorbeeld een cv installatie of een zonnepaneel. Rendementen zijn zeer belangrijk bij energie. Ook integralen kunnen aan energie gekoppeld worden, maar het nadeel is dat dat op dit moment eindonderwijs van wiskunde B2 is.

- Het thema duurzaamheid werd aangedragen door de docenten als zijnde een belangrijk en relevant aanknopingspunt om energiebegrip mee te ontwikkelen. Dit is meegenomen in één van de contexten.
- Techniek betrekken. In veel contexten kan dat, laat leerlingen bijvoorbeeld een windmolen ontwerpen.
- Besteed aandacht aan de vraag waar zit energie in? Dit is bijvoorbeeld in de context voedsel niet zo vanzelfsprekend als het doorgaans wordt voorgesteld in de leerboeken.
- Leg een link met het stuk ‘transport in levende systemen’: energie komt daar regelmatig terug. Ook de opslag en kringloop van zonne-energie zijn aanknopingspunten, zowel met biologie als met de dagelijkse wereld van de leerlingen. Een begrippenkader energie is in hoofdstuk 4 uitgewerkt (zie bijlage D).
- Leerlingen weten vaak weinig over energieomzettingen (alhoewel de meningen hierover wel verdeeld waren). In de bovenbouw wordt voorgesteld expliciet aandacht besteed aan energieovergangen.
- Leerlingen hebben moeite vanuit een systeem te denken, bijvoorbeeld bij de begrippen exotherm en endotherm. Een gesloten systeem is voor behoud van energie van belang.
- Moet je wel zo’n strikte scheiding aanbrenge(n) tussen de onder- en de bovenbouw? Aangegeven wordt dat in de onderbouw wel degelijk een wetenschappelijk energiebegrip aan de orde moet komen omdat ook daar leerlingen willen weten hoe het zit en niet bij een intuïtief begrip willen blijven. Een cyclische volgorde heeft dus de voorkeur. Je zou wel kunnen kiezen om bepaalde energievormen alleen in de bovenbouw aan de orde te laten komen. De huidige scheiding is echter niet bedoeld om strikt te zijn maar om structuur aan te brengen.
- Hoe breng je nu samenhang aan in de onderbouw? Daartoe zijn integrerende contexten bijgevoegd.
- De begrippen om energie heen moeten we goed neerzetten en consequent gebruiken. Dat schept een kader voor leerlingen. Daarmee kun je ook een leerlijn opbouwen.
- Terminologie gelijkstellen bij de vakken kan mogelijk al veel helpen. Dat geeft voor leerlingen duidelijk de equivalentie aan. Dat werd ook geconcludeerd uit de lesmethoden analyses en is verwerkt in de aanbevelingen, met name die voor de korte termijn. Impliciete definities van energie kun je halen uit de lesmethoden en gebruikte contexten en kunnen gebruikt worden bij het gelijkstellen van de terminologie.
- Er zijn veel leuke en interessante onderwerpen te bedenken die met energie te maken hebben en waar je leerlingen iets mee kunt laten doen.
- Een projectweek energie in ieder leerjaar kan een mogelijkheid zijn om dit thema vorm te geven. Hiermee kun je de leerlijn ook vorm geven, door ieder jaar dieper op het onderwerp in te gaan.
- Hoe maken we hier lesmateriaal bij? Of een docentenhandleiding? Die zou veel concrete handvatten aan moeten reiken. Er is duidelijk behoefte aan concreet materiaal waarmee de docenten aan de slag kunnen. Dit is in de aanbevelingen meegenomen.
- Je moet een voorstel voor energieonderwijs wel vertalen in kern- en einddoelen, zodat je het op iedere school terug ziet. Dat komt terug in de lange termijn aanbevelingen.

6. Verbanden tussen grootheden

6.1 Inleiding

Leerlingen worden op de middelbare school bij veel vakken met ‘verbanden’ geconfronteerd, bijvoorbeeld: het verband tussen vorm en betekenis van een sonnet, of van een limerick; het verband tussen klimaat en vegetatie;.... Bij de natuurwetenschappelijke vakken en wiskunde wordt dieper ingegaan op verbanden tussen grootheden of variabelen. Vanaf de brugklas krijgen leerlingen met dit redeneerpatroon te maken. In de loop der schooljaren neemt de complexiteit van de verbanden en de achterliggende concepten toe. Ook worden de representatievormen waarmee de verbanden tussen grootheden worden weergegeven gaandeweg abstracter.

Onze analyses van examenprogramma's, schoolboeken en de lespraktijk geven aan dat het werken met verbanden tussen grootheden vanuit elk vak op een eigen wijze wordt aangepakt, zonder daarbij nadrukkelijk te kijken naar of rekening te houden met wat er in de andere vakken gebeurt. Dit is in het buitenland niet anders (Campbell, 1999, pagina 14). Aangezien verbanden tussen grootheden bij zowel de drie natuurwetenschappelijke vakken als wiskunde voorkomen, is het waarschijnlijk dat er diverse mogelijkheden zijn om meer samenhang in het omgaan met dit soort verbanden aan te brengen tussen de genoemde vakken. Daarom is in het SONaTe-project het redeneerpatroon ‘verbanden tussen grootheden’ gekozen om mogelijkheden voor het aanbrengen van samenhang tussen de vakken nader te onderzoeken en uit te werken.

In dit hoofdstuk wordt eerst globaal beschreven op welke manier verbanden tussen grootheden in de verschillende vakken in de basisvorming (met name in de onderbouw van het vwo) aan bod komen. Daarna wordt meer in detail stilgestaan bij de manier waarop in de tweede fase in schoolboeken en eindtermen van de profielen NG en NT dit onderwerp bij de diverse vakken wordt ingevuld. Na een paragraaf die is gewijd aan geconstateerde knelpunten, volgt een slotparagraaf met aanbevelingen voor het aanbrengen van meer samenhang bij ‘verbanden tussen grootheden’, waarbij zowel mogelijkheden voor betere afstemming op de korte termijn, als voor de langere termijn worden gepresenteerd.

6.2 Verbanden: begripsbepalingen

Het onderwerp ‘verbanden tussen grootheden’ is zo breed en veelkleurig, dat het nodig lijkt om eerst aan te geven wat wij daaronder verstaan. Daarbij perken we het onderwerp ook in; een paar aspecten ervan zullen nader worden beschreven en geanalyseerd. We hebben het in deze tekst als we schrijven over verbanden steeds uitsluitend over verbanden tussen verschillende grootheden of variabelen.

In de natuurwetenschappen gaat het daarbij vrijwel altijd om een verband waarin betekenisvolle fysische, chemische of biologische grootheden een rol spelen en waarbij afhankelijke en onafhankelijke variabelen worden onderscheiden. Ogenscheinlijk vergelijkbare variabelen kunnen daarbij een heel verschillende rol hebben. Bij wiskunde zijn variabelen meestal alleen maar ‘geslachtsloze’ getallen en speelt causaliteit eigenlijk nooit een rol. Dat maakt dat de variabelen, die een rol spelen in een verband, binnen de wiskunde in zekere zin uitwisselbaar zijn. Dit geldt in sterke mate bij verbanden zoals die voorkomen in het vak wiskunde B in de tweede fase, maar in veel schoolboeken speelt dit ook al in de onderbouw.

Representatievormen

Verbanden tussen grootheden of variabelen kunnen op verschillende manieren worden gerepresenteerd. De verschillende verschijningsvormen zijn:

- Tekst: een verband wordt in (vak)taal geformuleerd ofwel in woorden beschreven;
- Tabel: een verband wordt met getallen(paren) weergegeven;
- Grafiek: een verband wordt grafisch gerepresenteerd (bij verbanden gebeurt dat vaak met losse meetpunten of in lijngrafieken);
- Formule: een verband wordt op een meer formele, algebraïsche manier vastgelegd.

Kwalitatief en kwantitatief

Bij het werken met verbanden worden de termen kwalitatief en kwantitatief vaak gebruikt. Daarom worden deze twee manieren van omgaan met verbanden hier ook nader toegelicht.

Onder *kwantitatief* omgaan met verbanden verstaan we meestal het in detail en numeriek omgaan met een verband. Dit gebeurt met name als een verband is gepresenteerd in een tabel of formule: er kan worden gerekend. Ook het aflezen of intekenen van punten in een grafiek kan kwantitatief worden genoemd. Andere voorbeelden zijn: het herschrijven van een formule in een equivalente vorm; het (algebraïsch) oplossen van vergelijkingen; het bepalen van een formule bij een verband op basis van tabelgegevens.

Bij *kwalitatief* omgaan met verbanden wordt meer gelet op globale kenmerken van een verband. Dit zal vaak gebeuren aan de hand van de representatie van een verband in tekst of grafiek, hoewel dat ook kan met een tabel of formule. Voorbeelden zijn: het geven van de beschrijving ‘de lichtintensiteit is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand tot de puntlichtbron’; of het beschrijven van de grafiek in globale termen als ‘de grafiek daalt steeds minder snel’. Bij formules passen globale redeneringen zoals ‘als deze grootheid toeneemt neemt die andere af’.

Anders gezegd: bij een kwalitatieve beschouwing staat het concept van het verband als geheel voorop, terwijl bij kwantitatief gebruik het (reken)technische en vaak algoritmische aspect van een verband meer wordt benadrukt.

Zo kun je bijvoorbeeld het verband tussen de grootheden ‘tijd’ en ‘plaats’ bij een verplaatsing met een constante snelheid aanduiden met: de twee grootheden *plaats* en *tijd* zijn evenredig ($s \propto t$). Conceptueel betekent dit dat als t met een bepaalde factor verandert, s met dezelfde factor verandert. Een grafische voorstelling van zo’n verband kan alleen schetsmatig worden gegeven: een rechte lijn door de oorsprong waarvan de steilheid nog niet vastligt. Als de constante snelheid v erbij wordt gegeven, dan is de formule voor het verband bekend, namelijk $s = v \cdot t$ en kan er worden gerekend, getabelleerd en ligt ook de steilheid van de grafiek vast.

Soorten verbanden

De belangrijkste soorten verbanden die bij de natuurwetenschappelijke vakken en bij wiskunde aan bod komen, zijn:

- Machtsverbanden. Deze zijn te schrijven als $y = a \cdot x^n$ met y en x variabel en a constant. Bij de natuurwetenschappelijke vakken zijn de recht- en omgekeerd evenredige verbanden de meest voorkomende. De waarden die n kan aannemen zijn veelal beperkt tot de waarden 1 en 2 bij rechtevenredigheid en tot -1 en -2 bij omgekeerd evenredigheid;
- Exponentiële verbanden van de vorm $y = a \cdot b^x$;
- Periodieke verbanden, waaronder de goniometrische functies.

6.3 Verbanden in de basisvorming: een analyse van de kerndoelen

In de basisvorming zijn voor de natuurwetenschappelijke vakken geen kerndoelen geformuleerd over het leggen van verbanden en het interpreteren van grafieken (OCenW, 1998d).

Impliciet komen dergelijke vaardigheden wel voor, wat kan worden afgeleid uit kerndoelen omtrent ‘het kunnen doen van experimenten’ en ‘het kunnen interpreteren van meetgegevens’. Op veel scholen voor havo en vwo zal hier bij de natuurwetenschappelijke vakken wel degelijk expliciet aandacht aan besteed worden. Aangenomen mag worden dat daarbij begrippen als evenredig en omgekeerd evenredig behandeld zijn bij de representatievormen formule, tabel, woord en grafiek. Daarnaast kunnen we aannemen dat leerlingen bij de natuurwetenschappelijke vakken leren eenvoudige vergelijkingen te manipuleren, waarin drie verschillende grootheden voorkomen waarvan twee grootheden bekend zijn.

Bij wiskunde worden natuurlijk wel expliciet kerndoelen geformuleerd die betrekking hebben op het werken met verbanden. Voor het wiskundedomein algebraïsche verbanden zijn de volgende kerndoelen geformuleerd:

8. De leerlingen kunnen eenvoudige verbanden tussen twee variabelen uit de werkelijkheid omzetten in de vier vormen verwoording, tabel, grafiek en (woord)formule en terug.
9. De leerlingen kunnen veranderingen in een verband in de werkelijkheid verwerken in de genoemde vormen.
10. De leerlingen kunnen de beschrijving van een verband in een vorm vervangen door de beschrijving in een andere vorm.
11. De leerlingen kunnen verbanden aflezen, vergelijken, interpreteren en gebruiken bij het oplossen van concrete problemen met behulp van verwoordingen, tabellen, grafieken en (woord)formules.
12. De leerlingen kunnen bij eenvoudige verbanden karakteristieke eigenschappen herkennen en interpreteren, als maximale en minimale waarden en welke waarden van de variabelen zinvol zijn in de gegeven situatie.
13. De leerlingen kunnen regelmaat in getalpatronen en tabellen vaststellen, verwoorden en voortzetten.
14. De leerlingen kunnen bij een gegeven grafiek, eventueel op een gegeven interval, vaststellen of er sprake is van een constant, stijgend, dalend of periodiek verband.
15. De leerlingen kunnen uit specifieke punten, het verloop en de vorm van een grafiek conclusies trekken over de bijbehorende situatie.
16. De leerlingen kunnen in een (woord)formule getallen substitueren voor variabelen. Zij kunnen de waarde van een overblijvende variabele berekenen.
17. De leerlingen kunnen, eventueel in benadering, bepalen wanneer twee eenvoudige verbanden gelijke uitkomsten hebben en bepalen op welke intervallen het ene verband groter is dan het andere.
18. De leerlingen kunnen eenvoudige computerprogramma's gebruiken bij het oplossen van problemen waarbij verbanden tussen twee variabelen een rol spelen.

In de wiskundeboeken voor de onderbouw wordt sinds de invoering van de basisvorming niet meer uitgegaan van de klassieke opbouw van de algebra naar ‘graad van de functie’; dat wil zeggen eerst uitputtend lineaire functies behandelen, dan kwadratische, dan hogere machten, dan andere typen zoals bijvoorbeeld exponentiële en periodieke functies. In de huidige methoden wordt de longitudinale lijn meer zichtbaar in de opbouw van een

‘gereedschapskist’, bestaande uit enerzijds beschrijvingsmiddelen: variabelen en taal, tabellen, grafieken en formules, en anderzijds uit methoden en technieken (Team W12-16, 1992). Dit betekent dat leerlingen al in de onderbouw kennis maken met allerlei typen verbanden, met name lineaire, kwadratische en andere machtsverbanden (waaronder wortelverbanden) en met periodieke en exponentiële verbanden. De nadruk ligt aanvankelijk op het gebruik van grafieken, tabellen en woordformules. Het meer formeel (met formules) omgaan met deze verbanden is daarmee voornamelijk naar de tweede fase verschoven.

Bij wiskunde wordt in de onderbouw niet expliciet aandacht besteed aan evenredigheden (behalve in meetkundige context) en aan vergelijkingen met meer dan twee variabelen. Verder wordt er geen expliciete relatie gelegd met verbanden in andere vakken.

Het omgaan met verbanden uit, of in de context van, andere vakken - en dan met name de natuurwetenschappelijke - zou wel passen bij de kerndoelen 8, 9 en 11. In bijlage F is een tekst opgenomen uit het boek *Achtergronden van het nieuwe leerplan wiskunde 12-16* (Team W12-16, 1992), waarin een opsomming wordt gegeven van de soorten formules die mensen in het dagelijks leven, waaronder ook de schoolvakken vallen, zoal tegen zouden kunnen komen. Daarbij zijn een flink aantal formules passend bij verbanden afkomstig uit de natuurwetenschappelijke vakken. In de tekst volgend op deze opsomming, wordt een pleidooi gehouden om aandacht te schenken aan deze typen verbanden, met hun eigen manieren van beschouwen. Dit wijkt af van wat in het traditionele wiskundeonderwijs gebruikelijk was.

Het is opmerkelijk dat ook in de wiskundeboeken voor de onderbouw (zie o.a. Bemmelen et al., 2000; Dijkstra et al., 1999; Vuijk et al., 2000) deze formules met hun eigen ‘behandelingswijze’ niet of nauwelijks terug te vinden zijn. Daarmee worden kansen op het aanbrengen van samenhang tussen de vakken al in een vroeg stadium niet benut. Het is evident dat aanbevelingen voor het in samenhang omgaan met verbanden in de tweede fase ook aandacht moeten schenken aan het voortraject. Dit geldt met name met betrekking tot de keuzes die daar moeten worden gemaakt ten aanzien van de kwalitatieve en kwantitatieve manieren van omgaan met verbanden bij de verschillende vakken.

6.4 Verbanden in de tweede fase: analyse van eindtermen en leerboeken

In de examenprogramma’s voor het vwo zijn bij de natuurwetenschappelijke vakken (OCenW, 1998a) in domein A ‘vaardigheden’, de reken- en wiskundige vaardigheden opgesomd waarover een leerling bij deze vakken moet beschikken. In bijlage G zijn deze vaardigheden naast elkaar gezet. Duidelijk valt het verschil op tussen de vakken scheikunde en biologie enerzijds en het vak natuurkunde anderzijds. Bij scheikunde en biologie worden veel minder wiskundige technieken genoemd, terwijl bij natuurkunde een uitgebreide lijst met technieken gericht op een kwantitatieve aanpak van verbanden wordt gegeven. Wiskunde heeft natuurlijk niet een dergelijke opsomming in het vaardigheden domein (OCenW, 1998b). De domeinen waarin het omgaan met verbanden in de bovenbouw (vwo wiskunde B) vooral worden beschreven zijn:

- Functies en grafieken B1;
- Differentiaal- en integraalrekening B1;
- Voortgezette analyse B2;

- Goniometrische functies B1;
- Discrete analyse B1;
- Continue dynamische modellen B1.

In verschillende schoolboeken (Boer et al., 1998; 2000; Bos, D. et al., 1998; Bos, M. et al., 1998; 1999; Kortland et al., 1998; Lagerwaard-Fijten et al., 1998; 1999; 2000; Pieren et al., 1998; Smits & Waas, 1998b; 2000a; 2000b; 2001) is gezocht naar onderwerpen waar duidelijk wordt ingegaan op of gebruik gemaakt wordt van ‘verbanden’. Een overzicht hiervan staat in bijlage K. Verder is in wiskundeboeken (Boer et al., 1998; 2000; Bos, D. et al., 1998; Bos, M. et al., 1998; 1999) gezocht naar het voorkomen van natuurwetenschappelijke contexten.

Om meer inzicht te krijgen in de wijze waarop daadwerkelijk in het onderwijs in de verschillende vakken met verbanden wordt omgegaan is vervolgens een analyse uitgevoerd op drie mogelijke aangrijpingspunten, die illustratief zijn voor de noodzaak tot het aanbrengen van meer samenhang in het omgaan met verbanden:

1. Het voorkomen van natuurwetenschappelijke contexten in de wiskunde boeken;
2. Het omgaan met ‘exponentiële verbanden’ in de verschillende vakken;
3. De manier waarop het interpreteren van grafieken in de verschillende vakken aan bod komt.

De resultaten van deze analyses staan in bijlagen H, I en J. De conclusies daaruit worden hieronder kort beschreven.

In bijlage H wordt een overzicht gegeven van de vraagstukken die in de methode Moderne Wiskunde deel A1/B1 voor 4vwo (Bos, M. et al., 1998) gerelateerd lijken te zijn aan natuurwetenschappelijke contexten. Daar blijkt dat met name de machtsverbanden (recht evenredig en omgekeerd evenredig) en de exponentiële verbanden goede mogelijkheden bieden om de vakken meer op elkaar af te stemmen. Bij de knelpunten en de aanbevelingen in paragraaf 6.5 wordt hierop teruggekomen.

In bijlage I is als voorbeeld voor ‘het exponentieel verband’ aangegeven wanneer elk van de natuurwetenschappelijke vakken en wiskunde hiermee bezig zijn. Uit een nadere beschouwing van de genoemde schoolboeken blijkt dat vooral wiskunde erg kwantitatief met exponentiële verbanden omgaat, terwijl de vakken scheikunde en biologie zich voornamelijk op de kwalitatieve aspecten richten. Natuurkunde heeft een duidelijke tussenpositie: zowel de kwalitatieve als de kwantitatieve aspecten komen aan bod. Een goede doordenking van het gebruik van exponentiële verbanden in de verschillende vakken en een onderlinge afstemming in de tijd, kan het werken met en het inzicht in exponentiële verbanden voor de leerling sterk verbeteren.

Bijlage J laat zien hoe er binnen de verschillende vakken met ‘het interpreteren van grafieken’ wordt omgegaan. Het gaat dan om:

- Het halen van gegevens uit grafieken;
- Het bepalen van trends;
- Het opzoeken van toppen en dalen en andere bijzonder punten.

Het interpreteren van grafieken in de natuurwetenschappelijke vakken heeft voornamelijk betrekking op het kwalitatieve aspect van verbanden: het gaat over trends, de globale vorm en kenmerken. Scheikunde en biologie gebruiken grafieken vaak als illustratie, de interpretatie is dan kwalitatief, terwijl in de natuurkunde methode expliciet aandacht besteed wordt aan het formaliseren van meetdata en het kwantitatief en meer formeel interpreteren van de diagrammen die daarbij kunnen worden gemaakt.

Duidelijk blijkt dat het programma van wiskunde B weinig op het interpreteren van grafieken is gericht. Alleen in 4vwo wordt daar nog wat aandacht aan besteed, daarna gaat het vooral om het kwantitatief omgaan met formules en soms het maken van grafieken daarbij. Na de vierde klas wordt alleen bij natuurkunde nog aandacht besteed aan het kwantitatief omgaan met diagrammen ontstaan uit experimentele data.

Als we er vanuit gaan dat het kwantificeren van een relatie tussen gemeten grootheden een belangrijke vaardigheid is voor leerlingen in een natuurprofiel, dan zal het werken met grafieken, tabellen en formules binnen en tussen de verschillende vakken beter op elkaar moeten worden afgestemd. Daarvoor zal die leerstof echter eerst nog beter in kaart moeten worden gebracht.

6.5 Knelpunten in de relatie tussen de vakken

In deze paragraaf worden knelpunten op het terrein van verbanden tussen grootheden opgesomd. Deze zijn naar voren gekomen uit eerder genoemde analyses, uit discussies in de projectgroep en uit de bijeenkomsten met de docenten.

Contexten

In het gebruik van contexten bij wiskunde liggen mogelijkheden voor aansluiting met bijvoorbeeld de natuurwetenschappelijke vakken. In een aantal contextopgaven in de wiskundeboeken komen dan ook situaties en formules voor uit andere vakken: bijvoorbeeld bekende formules uit de natuurkunde als de lenzenformule, de wet van Ohm, etc.; gemodelleerde situaties uit de biologie, zoals de afbraak van de hoeveelheid medicijn na een injectie of de groei van bacteriekolonies; situaties uit de natuur- en scheikunde, bijvoorbeeld radioactief verval (zie analyses Moderne Wiskunde B1 in bijlage H).

In deze contextopgaven wordt binnen de wiskundemethoden echter niet of nauwelijks ingegaan op de meer vakspecifieke kenmerken van die contexten zelf. Zo worden de variabelen niet altijd ‘gedefinieerd’ of omschreven als representanten van grootheden; en dus worden eenheden niet altijd vermeld; er is geen aandacht voor het modelaspect; een constante die in de natuurwetenschappen wel degelijk dimensies heeft, wordt opgevoerd als een willekeurig dimensieloos getal etc. Vaak zijn de vragen in een contextopgave niet gesteld in termen van de (natuurwetenschappelijke) context, of hebben ze geen betekenis in termen van die context. Iets nader belicht: binnen de wiskundevraagstukken wordt (vrijwel) nooit gerefereerd aan het feit dat variabelen en ook constanten (‘parameters’) in de natuurwetenschappelijke vakken altijd (samengestelde) grootheden zijn die van nature eenheden met zich meebrengen.

Een schoolvoorbeeld van een verkeerde manier van vakkenintegratie is een opgave bij wiskunde over veranderingen. Een fietser fietst met snelheden in m/min (tot 90 km/h) en versnellingen oplopend tot 0,08 m/s². Versnelling zelf komt niet expliciet aan de orde en de in het vraagstuk gebruikte gegevens zijn absoluut niet realistisch.

Een simpel voorbeeld op onderbouwniveau illustreert nog eens het verschillend omgaan met verbanden in enerzijds de natuurwetenschappelijke vakken en anderzijds wiskunde.

Persoon A loopt met een snelheid 2 m/s een bepaalde route. Zijn verplaatsing laat zich beschrijven met de formule $s = 2 \cdot t$, met s in meters en t in seconden.

Persoon B loopt hetzelfde traject vanaf hetzelfde beginpunt met dezelfde snelheid maar start 3 seconden later. De formule die zijn verplaatsing beschrijft is dus

$$s = 2 \cdot (t - 3).$$

Wiskundig (algebraïsch) gezien is deze laatste formule volledig identiek aan $s = 2 \cdot t - 6$. Maar in de natuurkundige context is de laatste formule echt anders: de ‘3’ in de

eerstgenoemde formule heeft de dimensie 'tijd', terwijl de '6' in de tweede formule de dimensie 'lengte' heeft. De structuur van de eerste formule is $afstand = snelheid \cdot tijd$, terwijl de tweede formule de structuur $afstand = snelheid \cdot tijd - afstand$ heeft. In de eerste formule start B met een tijdsachterstand van 3 seconden; in de tweede formule met een afstand-achterstand van 6 meter.

Dit globaal beschouwen van de koppeling tussen de structuur en de betekenis van formules zou in zowel de natuurwetenschappen als in de wiskunde meer aandacht moeten krijgen om het ontwikkelen van een beter inzicht in verbanden mogelijk te maken (Campbell, 1999, pagina 30).

Verbanden tussen meetgegevens

Het verzamelen van meetgegevens, daarbij een passend verband zoeken en dat weer relateren aan theoretisch verantwoorde natuurwetenschappelijke modellen, komt in de wiskunde niet voor. Voor de natuurwetenschappelijke vakken zijn deze vaardigheden zeer relevant.

Het zoeken naar verbanden passend bij meetgegevens en het weergeven ervan in formules, komt duidelijk aan bod bij natuurkunde. In het begin van klas vier krijgt dit zelfs expliciet aandacht in de schoolboeken. Bij scheikunde en biologie is er in de boeken weinig aandacht voor. In het wiskunde B programma krijgen het uitzetten van meetpunten waarbij een grafiek ontstaat waarin de uitgezette meetpunten niet allemaal exact op een vooronderstelde kromme liggen (in de statistiek vaak 'puntenwolk' genoemd), en regressie ofwel 'curve fitting' helemaal geen aandacht (meer).

Hetzelfde geldt voor onnauwkeurigheden in (meet)getallen: toleranties en significantie.

Bij de natuurwetenschappelijke practica werken meetonnauwkeurigheden door in berekeningen en ook in de nauwkeurigheid van een gevonden verband. Bij wiskunde komen leerlingen hier nooit mee in aanraking, getallen worden nog steeds alleen behandeld als exacte dingen. In de wiskunde is het bijvoorbeeld gebruikelijk om gewoon '2' m/s te schrijven voor de snelheid, terwijl in de natuurwetenschappen met significante cijfers wordt gewerkt en we daar veeleer bijvoorbeeld '2,00' m/s verwachten.

Omdat de verbanden tussen grootheden die uit metingen in de natuurwetenschappelijke vakken voorkomen, vaak machtsverbanden of exponentiele verbanden zijn, zou meer gerichte aandacht voor het gebruik van enkel- en dubbellogaritmisch grafiekenpapier in alle vakken op zijn plaats zijn.

Samenvattend liggen er op het gebied van het omgaan met verbanden tussen meetgegevens veel knelpunten maar ook veel mogelijkheden op het gebied van samenhang tussen de vakken.

'Kwalitatief' redeneren

Er is in de bovenbouw bij wiskunde weinig aandacht voor meer kwalitatief redeneren over verbanden, met name wanneer het gaat om formules met meerdere variabelen/grootheden. Dat zijn bij uitstek de formules zoals ze in de natuurwetenschappelijke vakken voorkomen. Het gaat dan om redeneringen als: '*Als ik deze variabelen vastzet kan ik het verband tussen de overblijvende twee karakteriseren als een ... type verband*' en '*als deze grootheid toeneemt, neemt deze dus ...af/toe*'. Daarbij zouden de begrippen 'evenredig met' en 'omgekeerd evenredig met' meer aandacht behoeven. Het gebrek aan aandacht voor kwalitatief omgaan met formules, met name die met meer variabelen, is een gemis in het wiskunde programma, maar ook in de andere vakken komt dit onvoldoende aan bod. Hier liggen goede mogelijkheden voor het aanbrengen van meer samenhang. Bovendien zou het een lijn door de verschillende vakken heen kunnen vormen.

Kwantitatieve aspecten van verbanden tussen grootheden

Een algebraïsche vaardigheid die goed past bij en van nut kan zijn in aanvulling op kwalitatief redeneren met formules is het kunnen herschrijven van formules in equivalente formules waarbij één van de variabelen (grootheden) geïsoleerd wordt.

Deze vaardigheid krijgt nu slechts aandacht in het wiskundeprogramma waar het gaat om het creëren van inverse functies. Dit beperkt zich uitsluitend tot verbanden tussen de twee variabelen x en y . Samen met het kwalitatief redeneren met formules met meer variabelen kan dit ook binnen de wiskunde verder ontwikkeld worden.

Hier ligt een duidelijk knelpunt. Hoewel 'het herschrijven van een formule' uit de natuurwetenschappen vaak identiek zou kunnen zijn aan de wiskundige bewerking 'de inverse functie bepalen', blijkt daar een duidelijke systeemscheiding.

Dit hangt samen met het feit dat in de wiskunde getallen en variabelen 'geslachtsloze' entiteiten zijn, terwijl ze in de natuurwetenschappen altijd grootheden representeren. Een simpel voorbeeld uit de wiskunde: de rechte lijn door de twee punten (0,32) en (20,68) heeft als formule: $y = (9/5)x + 32$. De formule die het inverse verband beschrijft (en dus de punten (32,0) en (68,20) bevat) is: $y = (5/9)(x - 32)$. Eigenlijk zou het moeten zijn $x = (5/9)(y - 32)$, maar allerlei conventies in de (school)wiskunde hebben er toe geleid dat wereldwijd is geaccepteerd dat je functies altijd in de vorm $y = f(x)$ schrijft. Dus worden in de procedure van het bepalen van de inverse x en y verwisseld. Binnen het systeem van de wiskunde is dat volledig correct.

Zodra echter deze wiskundige aanpak klakkeloos wordt gebruikt bij verbanden uit de natuurwetenschappelijke vakken gaat er van alles mis. Die verwisseling van rol van x en y is dan dodelijk. Vervang in bovenstaand voorbeeld maar x door C (graden Celsius) en y door F (graden Fahrenheit) en de wiskundige conventies leiden tot volledige nonsens: door de rolverwisseling van de variabelen ontstaan dan namelijk twee verschillende formules die schijnbaar de omzetting van Celsius naar Fahrenheit beschrijven:

$$F = (9/5)C + 32 \text{ en } F = (5/9)(C - 32).$$

Ook op dit punt is dus het helder maken van de verschillen en het aanbrengen van meer samenhang tussen wiskunde en de natuurwetenschappen nodig.

Veranderingen

Eén van de potentiële bijdragen die wiskunde kan leveren aan de ondersteuning van de natuurwetenschappelijke vakken ligt op het gebied van het wiskundige model van de differentiaalvergelijkingen. Uit de discussie op de eerste bijeenkomst met docenten in het kader van het SONaTe-project bleek dat dit onderwerp op de scholen niet meer uitvoerig wordt behandeld omdat het in het wiskunde B programma geen verplicht examenonderdeel meer is. Als het al wordt behandeld, gebeurt dat pas aan het einde van 6vwo. Dat lijkt een gemiste kans voor het aanbrengen van meer samenhang, omdat bij een aantal natuurwetenschappelijke onderwerpen die eerder al aan bod komen differentiaalvergelijkingen een belangrijke rol spelen. Het beschrijven van veranderingsgedrag in natuurwetenschappelijke contexten met een wiskundig model is goed mogelijk in het begin van 5vwo. Zulke modellen hoeven dan niet algebraïsch te worden doorgerekend of opgelost, maar kunnen heel goed met behulp van de grafische rekenmachine of met modellerprogramma's als IP-Coach, Powersim, Modellus of met VUgrafiek kwalitatief en ook kwantitatief worden doorgerekend en geanalyseerd.

Verdere knelpunten, gebaseerd op de inventarisaties in de bijlagen

- Het blijkt dat zowel bij scheikunde als biologie gebruik gemaakt wordt van het begrip energiediagram, dat nauw aansluit bij het energieniveauschema bij natuurkunde 2 en niet voorkomt bij natuurkunde 1.

- Vectoren zijn in klas vier (en ook in mindere mate in andere jaren) bij natuurkunde belangrijk; bij wiskunde komen die slechts summier en meestal pas in klas 5 aan bod. Biologie en scheikunde doen eigenlijk niets met vectoren.
- Logarithmen komen bij scheikunde en natuurkunde in 5vwo aan de orde. Bij wiskunde gebeurt dat al in klas 4, maar dan wel met de contexten (groefactoren, radioactief verval) die in de andere vakken pas later komen. Er ligt een vrij lange tijd tussen de start in wiskunde en de voortzetting bij scheikunde, biologie en natuurkunde. Meer formeel en abstracter omgaan met logarithmen gebeurt bij wiskunde dan pas weer veel later bij het onderwerp differentiëren (eind 5vwo, start 6vwo). Dit leent zich ook niet voor een goede aansluiting bij de andere vakken. Op dit punt zouden de vakken veel meer op elkaar kunnen worden afgestemd.

6.6 Conclusies en aanbevelingen

Het beschrijven en vormgeven van een samenhangende aanpak van het redeneerpatroon 'verbanden tussen grootheden' door de vakken en leerjaren heen is wenselijk. De manier waarop dit gestalte moet krijgen in een doorlopende lijn die zowel de onderbouw als de bovenbouw bestrijkt, moet nader bepaald worden. Mogelijk kan worden aangesloten bij de manier waarop in het wiskundeprogramma op een cyclische wijze door de leerjaren heen steeds meer abstractie en formalisering in het omgaan met de verschillende soorten verbanden wordt aangebracht. In de onderbouw komen verbanden aan bod weergegeven in woorden, tabellen en diagrammen; er ligt minder nadruk op de formules. Deze komen wel voor. In klas vier wordt dan voortgebouwd op de onderbouw met de formalisering van deze kwalitatieve verbanden. De precieze aanpak bij de vakken moet in samenhang met de didactisch gewenste volgorde van onderwerpen bij die vakken nader worden vastgelegd.

De wiskunde zou meer aandacht moeten besteden aan het interpreteren van meetgegevens en het uit diagrammen afleiden van formele verbanden ('curve fitting'). Door hier meer en vaker aandacht aan te besteden ontstaat meer samenhang met de natuurwetenschappelijke vakken. De wiskunde kan hierbij gebruik maken van concrete situaties uit de natuurwetenschappelijke vakken, waarin de betekenis van variabelen binnen die context en bijbehorende eenheden moeten worden meegenomen. Daarbij moet bij voorkeur bij alle vakken van dezelfde hulpmiddelen gebruik worden gemaakt (grafische rekenmachine, IP-Coach, logaritmisches grafiekpapier, etc.).

Bij het omgaan met verbanden moet bij alle vakken nadrukkelijk aandacht worden besteed aan zowel het kwalitatief als kwantitatief omgaan met verbanden in de verschillende representatievormen. Met name de onderlinge relatie en de overgangen tussen deze vormen van beschouwen hebben meer aandacht nodig. Zowel de natuurwetenschappelijke als de wiskundige kenmerken van een bepaald soort verband en algemene karakteristieken moeten hierbij aandacht krijgen, bijvoorbeeld: de vorm ' $1/R^2$ ' komt voor bij de uitzending door een puntbron; ' $1/R$ ' komt altijd voor bij een lijnbron; bij elk exponentieel groeiproces hoort een groefactor, etc. Hierdoor kan de leerling meer relaties tussen onderwerpen gaan zien en de geleerde stof flexibeler hanteren.

Bovenstaande wenselijkheden voor een samenhangende aanpak van verbanden kunnen deels op de korte termijn en deels op de langere termijn worden geëffectueerd. Op de korte termijn, rekening houdend met de bestaande examenprogramma's, kan bijvoorbeeld meer afstemming gezocht worden bij:

- Verschillen en overeenkomsten in gebruikte terminologie en notaties;
- Tabellen en het gebruiken ervan, om wetmatigheden te onderzoeken (patronen in een tabel, de verschiltabel interpreteren als beschrijver van veranderingen, ...);
- Evenredigheid en omgekeerd evenredigheid bij wiskunde in de hoofdstukken over machtsverbanden, gekoppeld aan de vele mogelijkheden die de andere vakken daartoe bieden;
- De grafische rekenmachine en andere ICT tools en deze effectief inzetten, bijvoorbeeld bij het vinden van een verband bij meetgegevens uit proeven via regressie;
- Logaritmisch grafiekenpapier; dit ook daadwerkelijk gebruiken bij natuurwetenschappelijke experimenten.

Voor de langere termijn is een aanpassing van de examenprogramma's van de vier vakken nodig om de onderlinge samenhang te vergroten en te expliciteren. Dat vereist beslissingen over zowel de onderwerpen die aan de orde moeten komen als de onderlinge afstemming van de inhoud en de behandeling van die onderwerpen in de tijd.

Ook het geconstateerde knelpunt van de taal- en cultuurverschillen heeft aandacht nodig bij het verder uitwerken van samenhangend onderwijs.

Vanuit wiskunde B gezien zal, naast het eigen gezicht dat het vak nu al heeft, het ondersteunende karakter dat het vak zou kunnen en moeten hebben voor de natuurwetenschappelijke vakken expliciet moeten worden geformuleerd. Het aspect van de ondersteuning komt in het huidige examenprogramma van wiskunde vrijwel niet aan bod. Bij de natuurwetenschappelijke vakken moet deze ondersteunende functie ook uitdrukkelijker aan bod komen en geformuleerd worden.

6.7 Het proces

Werkwijze

Bij een eerste inventarisatie van onderwerpen en thema's die zich lenen voor een nadere analyse van samenhang tussen de vakken, kwamen als mogelijke thema's naar voren verbanden, veranderingen, evenwicht, logaritmen en beweging.

Twee groepen zijn aan de slag gegaan met een thema 'veranderingen, evenwicht en processen'; de ene groep vanuit de wiskunde en de andere groep vanuit de natuurkunde.

De wiskundegroep richtte zich meer op dynamische processen en evenwicht, de natuurkundegroep meer op veranderingen in tijd of plaats en evenwicht. In dit stadium is bij natuurkunde een begrip als schaal gebruikt als indelingscriterium van veranderingen, evenwicht en het gebruik van modellen in de diverse vakken. Er is tevens vanuit de wiskundegroep een inventarisatie gemaakt van soorten differentiaalvergelijkingen en waar die voor natuurkunde, scheikunde of biologie bruikbaar zijn als beschrijving van evenwichten, verstoringen daarvan en veranderingen.

Bij de eerste besprekingen van de thema's is duidelijk gebleken dat natuurkunde en wiskunde deels verschillende talen spreken en deels ook met schijnbaar dezelfde onderwerpen andere doelen hebben. Wiskunde richt zich in het algemeen op de functie als relatie tussen variabelen, terwijl bijvoorbeeld natuurkunde zich meer richt op de betekenis van de functie voor het onderliggende proces. Het constateren van en discussiëren over deze verschillen gaf al meer overeenstemming en ook meer begrip voor elkaars standpunten. Het knelpunt van de taal- en cultuurverschillen heeft aandacht nodig bij het verder uitwerken van samenhangend onderwijs.

Tijdens bijeenkomsten met docenten bleek dat de thema's van de twee groepen veel

raakvlakken hadden. Ook bleek dat de bètavakken verschillend omgaan met veranderingen, variërend van globaal en kwalitatief tot kwantitatief. Het thema ‘veranderingen van tijd of plaats’ is verder uitgewerkt met concrete voorbeelden vanuit de natuurwetenschappelijke vakken, meer gespecificeerd naar het soort verband dat de verandering beschrijft. De wiskundegroep is vanuit de wiskunde gestart en heeft de soorten veranderingen gekoppeld aan het veranderingsgedrag van grootheden en tevens gekeken naar de rol van evenwicht bij veranderingsprocessen. Daarbij bleek dat met name het fenomeen differentiaalvergelijking vanuit de wiskunde een krachtig instrument is om meer samenhang aan te brengen bij de dynamische processen die in alle natuurwetenschappelijke vakken voorkomen.

Differentiaalvergelijkingen worden door docenten in de tweede docentenbijeenkomst wel genoemd als belangrijke component voor zaken als verband en verandering. Maar door de minimale aandacht in de huidige examenprogramma’s is men niet op voorhand overtuigd van het nut deze vergelijkingen in een samenhangend programma te gebruiken. Het onderwerp differentiaalvergelijkingen is daarom niet verder uitgewerkt.

In de tweede docentenbijeenkomst is bij het commentaar op beide stukken regelmatig verwezen naar het thema verbanden. De veranderingsprocessen en soorten veranderingen roepen blijkbaar op om het over verbanden te hebben. Naar aanleiding van het docentcommentaar en de analyse van de uitwerking is de invalshoek van beide groepen verlegd naar verbanden. Dit houdt zowel een verbreding van het te bestuderen begrip in als een inperking van het aandachtsgebied. Expliciete aandacht voor onderwerpen als evenwicht, modelleren en veranderingsprocessen is daarmee voor nu terzijde geschoven, hoewel deze onderwerpen wel worden gezien als een belangrijke optie tot het aanbrengen van meer samenhang tussen de verschillende vakken. De huidige examenprogramma’s bieden daartoe echter te weinig ruimte.

Voor verbanden is een analyse gemaakt van wat de methoden in de verschillende vakken wanneer hier aan doen. Tevens is een inventarisatie gemaakt hoe in de examenprogramma’s omgegaan wordt met verbanden. Voor wiskunde is gekeken hoe gebruik gemaakt wordt van voorbeelden uit verschillende natuurwetenschappelijke vakken bij hoofdstukken over voor verbanden relevante stof.

Doordat de twee groepen door deze aandachtsverschuiving meer hetzelfde onderwerp aanpakken blijkt dat er twee invalshoeken over verbanden ontstaan. Mede naar aanleiding van het commentaar dat tijdens de derde docentenbijeenkomst werd gegeven is besloten de twee stukken te integreren tot een geheel over het onderwerp verbanden. Hierdoor is een stuk ontstaan dat een goed beeld geeft van de manier waarop in het huidige onderwijs de vakken met een dergelijk overkoepelend onderwerp zonder enige samenhang en afstemming omgaan. Tevens blijkt dat hier door afstemming van examenprogramma’s en aandacht voor elkaars noden en mogelijkheden veel winst valt te behalen.

De vierde docentenbijeenkomst geeft aan dat het samenvoegen goed is gelukt. Er is lof en weinig inhoudelijk commentaar op wat er dan ligt. Wel wordt nog gerefereerd aan het slecht kunnen rekenen en kunnen manipuleren met formules door leerlingen. Dit is een gezamenlijk probleem van de verschillende vakken. Verder wordt aangegeven dat het omgaan met verbanden niet pas vanaf de tweede fase in samenhang bekeken moet worden maar juist al veel eerder moet beginnen.

Reacties van docenten

Tijdens de verschillende bijeenkomsten voor overleg met docenten hebben de aanwezigen veel reacties op de stukken gegeven, die grotendeels in de stukken zijn verwerkt. Naast de

eerder genoemde opmerkingen die de invalshoek mede hebben bepaald, zijn nog de volgende opmerkingen naar voren gekomen, die hier met een korte toelichting worden opgesomd.

- Het is uitdrukkelijk niet de bedoeling om wiskunde alleen als dienstbaar vak neer te zetten. Dit werd meerdere malen als probleem genoemd door de wiskundeleraars. Wiskunde heeft ook een eigen rol die in het curriculum naar voren moet (kunnen) komen. Binnen dit project wordt echter nadrukkelijk gezocht naar samenhang tussen de vakken. Daarom is vanuit de wiskunde met name opgesomd waar het zou kunnen ondersteunen bij de andere vakken. Er moet wel voor gewaakt worden dat wiskunde als zelfstandige discipline ook een rol houdt, net als overigens de natuurwetenschappelijke vakken hun eigen karakter blijven behouden.
- 'Verbanden' en 'modelleren' worden genoemd als overkoepelende thema's. Voor modelleren is binnen het project niet gekozen. Modellen zijn wel bij uitstek geschikt om bij een thema als dynamische processen en evenwicht in te zetten en zeker ook om wiskunde nadrukkelijk bij de natuurwetenschappelijke vakken te betrekken.
- Docenten geven aan dat bij veranderingen eigenlijk ook naar verbanden wordt gekeken. Of dit betekent dat je vanuit verbanden of vanuit veranderingen moet werken wordt niet meteen helder. Wel is er brede instemming met de aanpak waarvoor nu gekozen is.
- Het gebruik van de grafische rekenmachine (GR) voor het opsporen van verbanden wordt genoemd. Ook het feit dat bij biologie de GR niet gebruikt mag worden kwam nog eens als knelpunt naar voren! Er is ook gepleit voor meer inzet van ICT hierbij, dus ook het gebruik van de computer in plaats van of naast de GR. Als voorbeeld werd IP-Coach genoemd. Wel werd van belang geacht dat alle vakken dezelfde ICT tools gebruiken.
- Nadruk op verbanden kan ervoor zorgen dat leerlingen alleen nog maar naar verbanden zoeken. Er moet aandacht blijven voor de verschillende rollen van bijvoorbeeld grafieken in diverse situaties. Het komt nu wel voor dat leerlingen verbanden zoeken als dat voor een experiment geheel niet nodig is en er alleen een piekwaarde moet worden afgelezen in een grafiek.
- Het gaat in de derde klas al vaak mis. Leerlingen kunnen dichtheid niet meer in woorden uitleggen maar er wel mee rekenen.
- Het stimuleren van een onderzoekende houding bij leerlingen en een leerlijn voor de bijbehorende vaardigheden is belangrijk. Wiskunde hoort hierin ook een rol te spelen. Bij een vervolg op dit project dient dat zeker de aandacht te krijgen. In dit project is daarvoor niet gekozen, maar aangezien het leren onderzoeken en het gebruik van een gezamenlijk laboratorium meerdere malen expliciet genoemd zijn is dat mogelijk wel een zinvol onderwerp voor een leerlijn.
- Er moeten heldere eenduidige definities komen van verschillende vakoverstijgende begrippen. Te denken valt hierbij onder andere aan 'grootte' of 'variabele', 'grafiek' of 'diagram' en 'hypothese'.
- Over een tool als logaritmisch papier voor het opsporen van verbanden denken de docenten verschillend. De een vindt het nodig dat de vaardigheid 'gebruik van logaritmisch papier' blijft, terwijl de ander aangeeft dat het toepassen van coördinatentransformaties (en zo grafieken rechtbuigen) steeds eenvoudiger wordt met behulp van de computer. Dergelijke vaardigheden moeten blijkbaar geanalyseerd worden op hun wenselijkheid bij de verschillende vakken.

7. Conclusies en aanbevelingen

In de vorige hoofdstukken zijn de resultaten gepubliceerd van de analyse van drie inhoudelijke kaders voor samenhang. Daarbij is per onderdeel gepresenteerd wat de analyse heeft opgeleverd, wat het commentaar van docenten is geweest, welke knelpunten kunnen worden geconstateerd en welke aanbevelingen kunnen worden gedaan voor vervolgvacativiteiten. In dit slothoofdstuk bespreken we de resultaten aan de hand van de onderzoeksvragen en doen wij aanbevelingen voor vervolgvacativiteiten teneinde meer samenhang te bevorderen tussen de vakken natuurkunde, scheikunde, biologie en wiskunde.

1. Hoe kan de relatie tussen biologie, natuurkunde, scheikunde en wiskunde zichtbaar worden gemaakt en nader uitgewerkt worden?

In dit project zijn drie verschillende perspectieven op samenhang tussen de exacte schoolvakken gekozen en nader uitgewerkt aan de hand van een prototype. Het eerste perspectief gaat uit van het biologische kernconcept 'transport in levende systemen'. Dit concept beperkt zich niet tot een deelgebied van de biologie maar heeft betrekking op vele levende systemen en komt in verschillende leerjaren aan bod. In het uitgewerkte kader wordt enerzijds aandacht geschonken aan de samenhang binnen het vak biologie, met name door onderscheid te maken naar organisatie-niveau (cel, organisme, ecosysteem, systeem aarde) en naar micro- en macroprocessen op elk van de systeem-niveaus.

Anderzijds is aangegeven welke kennis uit de andere exacte vakken vereist is voor een goed inzicht in transportprocessen, zoals bijvoorbeeld diffusie en osmose (van zuurstof of koolstofdioxide) en chemische reacties in de fotosynthese (waarbij lichtenergie wordt vastgelegd in ATP en NADPH). De rol van de andere vakken verdient extra aandacht bij dit perspectief, omdat het gekozen onderwerp sterk gericht is op één vak.

Het tweede perspectief betreft een transdisciplinair onderwerp, in dit geval 'energie'. In elk van de disciplines natuurkunde, scheikunde en biologie speelt energie een belangrijke rol. Theoretisch is het een lastig begrip dat bovendien in het dagelijks leven in andere betekenissen wordt gebruikt dan in de natuurwetenschappen. In de vakdidactische literatuur zijn de betreffende begripsproblemen veelvuldig beschreven. Het SONaTe-onderzoek laat zien dat het begrip nu in vele leerjaren ter sprake komt, echter op een weinig samenhangende wijze. Resultaat van dit onderzoek is een kader waarin geschetst wordt langs welke weg gekomen kan worden tot een beter begrip van energie door specifieke accenten te leggen in de basisvorming en de tweede fase havo/vwo en door de vakken beter af te stemmen. In de basisvorming zou bijvoorbeeld uitgegaan kunnen worden van het intuïtieve energiebegrip van leerlingen, met het accent op energie in het dagelijks leven: energie in relatie met voedsel, transport en brandstoffen, elektriciteit en duurzame energie. In de bovenbouw kan dan het meer wetenschappelijke energiebegrip ontwikkeld worden, door bijvoorbeeld de nadruk te leggen op energieovergangen en energiesoorten, behoud van energie en energie op micro niveau.

Het derde perspectief is gericht op het redeneerpatroon 'verbanden tussen grootheden'. In alle natuurwetenschappen spelen deze relaties een zeer belangrijke rol en de wiskunde is daarbij onmisbaar. Het SONaTe-onderzoek laat ook hier zien dat in alle exacte vakken op geheel eigen wijze aandacht wordt besteed aan verbanden tussen grootheden. Het resultaat is niet alleen een beschrijving van de aard van het probleem, maar ook het geven van een aantal voorbeelden van wijzen waarop meer samenhang kan worden gebracht in het onderwijs over verbanden tussen grootheden, van basisvorming tot tweede fase.

Bijvoorbeeld door bij alle betrokken vakken aandacht te besteden aan zowel kwalitatief als kwantitatief omgaan met verbanden in verschillende representatievormen (tabel, grafiek, formule) en aan overgangen en relaties tussen deze vormen. In de onderbouw zouden verbanden tussen grootheden met name in woorden en tabellen aan bod kunnen komen, vanaf klas 4 kan dit geformaliseerd worden. Ook algemene karakteristieken kunnen de samenhang versterken, bijvoorbeeld $1/R$ komt altijd voor bij een lijnbron.

De drie uitgewerkte perspectieven zijn uiteraard niet dekkend voor het gehele gebied van de exacte vakken. Het eerste perspectief kan ook voor andere kernconcepten worden uitgewerkt, en niet alleen in de biologie maar ook voor de andere schoolvakken. Bij natuurkunde kunnen we denken aan 'geluid', bij scheikunde aan 'molecuul structuur' en bij wiskunde aan 'exponentiële functies'. Steeds dient het dan te gaan om zowel de interne samenhang als de samenhang met andere disciplines. Ook voor het tweede perspectief, transdisciplinaire begrippen, zijn andere voorbeelden beschikbaar, zoals 'elektriciteit' en 'straling'. Het derde perspectief betreft een groot terrein dat nader gespecificeerd kan worden uitgewerkt, bijvoorbeeld naar verwerken van meetgegevens, kwalitatief redeneren en modelleren.

Uiteindelijk zouden we moeten kunnen beschikken over een *theoretisch raamwerk* waarin relevante kennis en inzichten ten aanzien van vakinhoudelijke verbanden en vakdidactische overwegingen bij elkaar zijn gebracht. Een theoretisch raamwerk voor de Nederlandse natuurprofielen (tweede fase havo/vwo) is op dit moment niet beschikbaar maar de resultaten van dit onderzoek geven hiertoe wel een eerste aanzet en sluiten aan bij andere initiatieven op dit gebied zoals het werk van de KNAW (2003a). Een voorbeeld van een omvangrijk raamwerk vinden we in de Atlas of Science Literacy van het Amerikaanse Project 2061. Dit raamwerk is echter vrij globaal omdat het van toepassing is op een groot aantal vakken (natuurkunde, scheikunde, biologie, wiskunde, techniek en maatschappijleer) en reikt van Kindergarten tot Grade 12 (AAAS, 1993; 2001).

2. Welke concrete knelpunten belemmeren de inhoudelijke samenhang tussen de bètavakken en welke mogelijkheden zijn er om de inhoudelijke samenhang in lesmethoden en onderwijsprogramma's te verbeteren?

- Examenprogramma's

Wat wij tevoren wisten maar wat herhaaldelijk werd bevestigd tijdens de uitvoering van het project is dat de huidige examenprogramma's biologie, natuurkunde, scheikunde en wiskunde vakinhoudelijk niet zijn geschreven vanuit het idee om samenhang tussen de vakken te bevorderen. Sommige onderwerpen die van belang zijn voor het ene vak komen niet of nauwelijks aan bod in de andere vakken, zoals diffusie en osmose, hetgeen de afstemming bemoeilijkt. In enkele gevallen is de situatie met de invoering van de tweede fase zelfs verslechterd. Zo is het onderwerp 'differentiaalvergelijkingen' in wiskunde B op het vwo niet langer verplicht, terwijl het voor natuurkunde een belangrijk stuk wiskunde is.

- Gebruik concepten, eenheden en afbeeldingen

Daarnaast hebben we geconstateerd dat er verschil is in het gebruik van concepten, eenheden en afbeeldingen in de verschillende vakken, bijvoorbeeld ten aanzien van het begrip energie en het niet-gebruiken van eenheden bij functies (formules) en diagrammen bij wiskunde. Dit is niet zozeer toe te schrijven aan de inhoud van de examenprogramma's maar meer aan de wijze waarop bepaalde onderwerpen in de verschillende schoolvakken

gewoonlijk aan bod komen. Wanneer docenten dat niet van elkaar weten en daarover niet communiceren worden de leerlingen opgezadeld met een probleem dat de meesten niet zelf kunnen oplossen.

- Tijdsplanning en diepgang

Tussen de schoolvakken zien we ook verschillen qua tijdsplanning en diepgang van behandeling. Zo zijn vectoren voor het natuurkundeonderwijs belangrijk vanaf klas 4. Bij wiskunde komen vectoren pas in klas 5 aan bod en dan nog vrij summier. Anderzijds wordt in de wiskundelessen al in klas 4 aandacht besteed aan logaritmen, terwijl dit concept pas in klas 5 wordt besproken in de lessen natuurkunde en scheikunde. Louter vanuit de wiskunde gezien zijn er wellicht goede redenen een bepaald onderwerp pas in 6vwo ter sprake te brengen, terwijl het vanuit de natuurkunde gezien beter al in 4vwo kan worden behandeld. Er is dus een spanningsveld tussen interne en externe samenhang.

- Leerlijnen

En tenslotte, het leren op het gebied van de bètavakken begint niet pas in de tweede fase havo/vwo. In de discussies met docenten kwam dit punt herhaaldelijk naar voren bij elk van de geanalyseerde onderwerpen. Bijvoorbeeld bij energie, een begrip dat eigenlijk in het basisonderwijs al aan bod komt en van daaruit opgebouwd zou moeten worden. Bij verbanden tussen grootheden wordt een opbouw vanaf de basisvorming voorgesteld. De begrippenkaders voor transport in levende systemen vormen de basis voor een leerlijn waarbij basiskennis uit de basisvorming vereist is. De discussie kan zich dus niet beperken tot de tweede fase. Samenhang in het onderwijs in de exacte vakken zou uit moeten gaan van leerlijnen die al vóór de tweede fase in het voortgezet onderwijs beginnen rekening en die rekening houden met interne en externe samenhang.

Suggesties voor mogelijke oplossingen voor deze knelpunten komen bij de aanbevelingen (voorstellen voor vervolgactiviteiten) uitgebreider aan bod.

Terugblik op het proces

De docenten van de vijf scholen leverden een grote en relevante bijdrage aan de docentenbijeenkomsten. Per school waren meestal drie of vier docenten aanwezig en op school bleek over de voorgelegde ideeën te zijn gesproken. De gemaakte opmerkingen waren in het algemeen kritisch-constructief, discussies over meningsverschillen vonden in een open sfeer plaats en de docenten toonden een duidelijke wil om tot meer samenhang te komen.

Het belang van een betere afstemming tussen de vakken werd herhaaldelijk onderschreven door de docenten, niet zo verwonderlijk gezien de voorselectie van de scholen. Vanuit de wiskunde werd vrijwel elke bijeenkomst de zorg uitgesproken dat wiskunde nog slechts een steunvak zou worden voor de andere exacte vakken. Door andere docenten werd de waarde van wiskunde op zich echter niet ter discussie gesteld.

In de discussies bleken docenten en onderzoekers wel duidelijk te verschillen in perspectief. Docenten hadden in het algemeen de neiging pragmatisch te zijn en bekeken de aangeleverde stukken vooral vanuit het perspectief 'heb ik er binnenkort iets aan in mijn lessen'. Ze hadden meer de neiging toe te werken naar projecten, lesmaterialen en docentenhandleidingen. Vaak werd door de docenten verwezen naar het feit dat bepaalde onderwerpen niet meer in het examenprogramma voorkomen. De onderzoekers bleken meer te denken in termen van een lange termijn perspectief: inhoudelijk en didactisch verkennen van mogelijkheden om tot meer samenhang te komen, binnen en buiten de huidige programma's. Daaruit bleek dus een spanningsveld tussen het aansluiten op de huidige praktijk en een lange termijn perspectief.

Bij de evaluatie aan het eind van de serie van vier bijeenkomsten bleken de docenten het gewaardeerd te hebben op deze inhoudelijke wijze van gedachten te wisselen over samenhang tussen de exacte vakken. De geraadpleegde docenten hadden desgevraagd een voorkeur voor een nadere uitwerking van de onderwerpen ‘energie’ en ‘verbanden tussen grootheden’, omdat het onderwerp ‘transport in levende systemen’ meer vanuit één van de bètavakken (de biologie) was opgezet. De docenten wilden liever met het hele bètateam aan de slag vanuit een gemeenschappelijk perspectief, bijvoorbeeld in de vorm van een project over energie of verbanden tussen grootheden. Alle scholen waren in principe bereid in een vervolgproject meer concreet te gaan werken aan het versterken van de samenhang in hun onderwijs.

Voorstellen voor vervolgactiviteiten

Uit het hierboven geschetste beeld van een spanningsveld tussen theorie en praktijk zou de conclusie kunnen worden getrokken dat er een keuze dient te worden gemaakt tussen een van beide richtingen. Wij pleiten er voor zo’n keuze niet te maken maar juist om het spanningsveld productief te maken. Dat betekent dat enerzijds pragmatisch, aansluitend bij de mogelijkheden die de huidige programma’s bieden, te werk zou moeten worden gegaan, bijvoorbeeld door in samenwerking met scholen praktische handleidingen te ontwikkelen voor docententeams die streven naar meer samenhang in het onderwijs in de bètaprofielen. Anderzijds lijkt het ons van belang een theoretisch fundament te leggen onder het streven naar meer samenhang, met inbreng van diverse vakspecialisten. Beide soorten activiteiten zouden parallel aan elkaar moeten worden uitgevoerd, enerzijds om bij de keuze van onderwerpen en de uitwerking daarvan een referentiekader ter beschikking te hebben, anderzijds om het referentiekader op zijn waarde te toetsen en te voorkomen dat dit te ver van de praktijk geraakt.

Beide lijnen kunnen een bijdrage leveren aan het werk van mogelijk in te stellen bètaprofielcommissies in het kader van de herziening van de tweede fase (Inspectie van het Onderwijs, 2003; KNAW, 2003b). Ze sluiten uitstekend aan bij de denkbeelden van de klankbordgroep voortgezet onderwijs van de KNAW (KNAW, 2003a) om in de landelijke programma’s de nadruk te leggen op ‘kernconcepten’ en scholen de ruimte te geven deze kernconcepten uit te werken in zelf gekozen contexten. Programmatische samenhang is vooral van belang met betrekking tot de kernconcepten. Bovendien zouden voorbeelden van uitwerking van deze lijnen op schoolniveau van veel nut kunnen zijn voor de invulling van de ruimte die scholen krijgen in het kader van de implementatie van de nieuwe programma’s. Ook andere initiatieven, zoals projecten binnen Jet-Net, zouden gebruik kunnen maken van de opbrengsten van deze activiteiten.

Wat betreft terreinen voor vervolgactiviteiten op de *korte termijn* (bijvoorbeeld de ontwikkeling van praktische handleidingen) valt te denken aan:

1. Het ontwikkelen van leerlijnen voor kernconcepten en transdisciplinaire onderwerpen: vanaf een intuïtief naar een meer wetenschappelijk begrip. Mogelijke onderwerpen voor dergelijke leerlijnen zouden kunnen zijn ‘energie’ (gebaseerd op hoofdstuk 5) maar ook ‘elektriciteit’ of ‘deeltjes’;
2. Het didactisch uitwerken van het redeneerpatroon ‘verbanden tussen grootheden’, met speciale aandacht voor de relatie tussen wiskunde en de natuurwetenschappen.

Voor elk van deze terreinen zouden over *langere termijn* studies moeten worden uitgevoerd die een bijdrage leveren aan het theoretisch fundament en die verworven vakdidactische kennis op het betreffende terrein toegankelijk maken voor docenten. Op langere termijn kunnen ook andere kernconcepten, transdisciplinaire onderwerpen en

redeneerpatronen op vergelijkbare wijze worden uitgewerkt. Uit pragmatisch oogpunt is het aan te raden in eerste instantie met één of enkele van de in dit onderzoek bestudeerde onderwerpen verder te gaan.

Globaal zou de volgende werkwijze voor deze vervolgactiviteiten kunnen worden gevolgd:

- Een aantal onderwerpen wordt vastgesteld voor nadere uitwerking in de periode 2003-2007;
- Twee of drie scholen tekenen in op een van de onderwerpen. De scholen moeten bereid zijn tijd te investeren in het project en het materiaal in de praktijk te beproeven;
- Voor elk van deze onderwerpen worden door vakdidactici overzichtsstudies uitgevoerd. Parallel hieraan worden in teams van docenten en vakdidactici praktische handleidingen ontwikkeld en op de betrokken scholen op bruikbaarheid beproefd.

De genoemde deelprojecten leveren naar verwachting de volgende opbrengsten op voor zowel scholen die meewerken (mesoniveau) als voor het maken van afspraken over de examenprogramma's op profielniveau (macroniveau):

- Lesbrieven met docentenhandleidingen rond kernconcepten, transdisciplinaire onderwerpen en 'verbanden tussen grootheden';
- Beschrijvingen en analyses van ervaringen met de lesbrieven en docentenhandleidingen;
- Overzichtsartikelen waarin kennis bijeen wordt gebracht over de mogelijkheden en beperkingen van meer samenhang voor elk van de gekozen onderwerpen;
- Artikelen in vaktijdschriften;
- Bijdragen aan conferenties voor docenten;
- Scholingsbijeenkomsten voor docenten.

De voorgestelde vervolgactiviteiten kunnen op schoolniveau meer samenhang tussen de bètavakken wat betreft concepten, eenheden en afbeeldingen, tijdsplanning en diepgang bevorderen. Daarnaast levert het de basis voor leerlijnen door de jaren heen, waarbij externe en interne samenhang nagestreefd wordt.

De deelnemende scholen doen ervaring op door hun deelname en hebben de beschikking over de praktische handleidingen. Hun ervaringen worden vastgelegd en kunnen bijvoorbeeld behulpzaam zijn voor andere scholen.

Parallel daaraan levert het onderzoek theoretische en praktische input voor de herziening van de examenprogramma's.

Referenties

- AAAS (1993). *Benchmarks for science literacy, Project 2061*. Oxford: Oxford University Press.
- AAAS (2001). *Atlas of science literacy*. Washington DC: AAAS-NSTA.
- Assema, P. van, Meesters, I. & Kok G. (1992). Het focusgroep-interview: een stappenplan. *Tijdschrift voor Sociale Gezondheidszorg*, 70, p. 431-437.
- Akkerman, T., Dietvorst, P., Delea, P., Maier, E., Nilwik, S., Nuiver, J., Steen, J. van der & Zanden, P. van der (1999). *Nectar. Biologie (mavo) havo vwo deel 1*. Groningen: Wolters-Noordhoff.
- Akkerman, T., Beekman, J.P., Delea, P., Maier, E., Nuiver, J., Steen, J. van der & Zanden, P. van der (2000). *Nectar. Havo vwo biologie deel 2*. Groningen: Wolters-Noordhoff.
- Barker, M. & Frankis, J. (1997). *Focus Group Research*
www.psychology.nottingham.ac.uk/internal/seminars/qm/focusgroup.html.
- Bemmelen, Th. van, Fortgens-van der Plicht, C., Kop, N. & Smit-Mulder E.M. (2000). *Netwerk 3 vwo*. Groningen: Wolters-Noordhoff.
- Bernal J.D. (1971). *De wetenschap als maatschappelijk proces deel 2*. Utrecht: Het Spectrum
- Boer, W., Giessen, C. van de, Goede, W. de, Hakkert, A., Linden, T. van der & Reuter, W. (1998). *Moderne wiskunde 7^e editie, vwo bovenbouw wiskunde A1 en B1 - deel 2*. Groningen: Wolters-Noordhoff.
- Boer, W., Bos, D., Bouw, J., Dijk, B. van, Dijksterhuis, F.J., Doekes, W., Giessen, C. van de, Hakkert, A., Hoogland, K., Jansen, R., Linden, T. van der & Reuter, W. (2000). *Moderne wiskunde 7^e editie, vwo bovenbouw wiskunde B1 - deel 5*. Groningen: Wolters-Noordhoff.
- Boersma, K.Th. & Schalk, H. (2001). Homeostase in het biologieprogramma. *Niche*, 32 (6), p. 27-29.
- Boersma, K.Th., Geraedts, C.L. & Eijkelhof, H.M.C. (2003). *Vormgeving op schoolniveau van samenhangend onderwijs in natuur en techniek in de basisvorming*. Paper ORD 7-9 mei 2003, Kerkrade.
- Bos, D., Doekes, W., Giessen, C. van de & Reuter, W. (1998). *Moderne wiskunde 7^e editie, vwo bovenbouw wiskunde A2 - deel 1 / B1 - deel 3*. Groningen: Wolters-Noordhoff.
- Bos, M., Bouw, J., Bouwman, J., Dijk, B. van, Dijksterhuis, F.J., Hakkert, A., Hoogland, K., Jansen, R., Reijenga, R., Roorda, G., Sinkeldam, R., Streun, A. van & Wanga, R. (1998). *Moderne wiskunde 7^e editie, vwo bovenbouw wiskunde A1 en B1 - deel 1*. Groningen: Wolters-Noordhoff.

Bos, M., Bouw, J., Dijk, B. van, Dijksterhuis, F.J., Doekes, W., Giessen, C. van de, Hoogland, K., Jansen, R., Linden, T. van der, Reuter, W., Roorda, G. & Wanga, R. (1999). *Moderne wiskunde 7^e editie, vwo bovenbouw wiskunde B1 - deel 4*. Groningen: Wolters-Noordhoff.

Buck, P. (1978). Sollten wir 'Energie' auf der Sekundarstufe I wirklich als Erhaltungsgrosse einführen? *Physica Didactica*, 5, p. 199-218.

Campbell, N.A., Mitchell, L.G. & Reece, J.B., (1997). *Biology*. San Francisco: Benjamin Cummings.

Campbell, P. (ed) (1999). *Shaping the future – physics in mathematical mood*. Bristol: IOP-publishing.

Commissie Onderwijs van de Biologische Raad (2003). *Biologieonderwijs: een vitaal belang*. Amsterdam: KNAW.

Crommentuijn, J.L.M., Wisgerhof, E. & Zwarteveen, A.J. (1994). *Banas 1. Basisvorming natuurkunde scheikunde vbo-mavo-havo-vwo*. Voorschoten: Uitgeverij Educatief.

Crommentuijn, J.L.M., Wisgerhof, E. & Zwarteveen, A.J. (1995). *Banas 2. Basisvorming natuurkunde scheikunde vbo-mavo-havo-vwo*. Voorschoten: Uitgeverij Educatief.

Dijkstra, J., Eijk, E. van der, Gelderblom, G., Hoogland, K., Horst, A. van der, Kok, D., Koning, A., Schaberg, G., Streun, A. van & Visser, W. (1999). *Moderne Wiskunde 2a havo vwo*. Groningen: Wolters-Noordhoff.

Driver, R. & Warrington, L. (1985). Students' use of the principle of energy conservation in problem situations. *Physics Education*, 20, p. 171-176.

Duit, R. (1981). Understanding energy as a conserved quantity. *European Journal of Science Education*, 3, p. 29.

Duit, R. (1984). Learning the energy concept in school – empirical results from The Philippines and West Germany. *Physics Education*, 19, p. 59-66.

Eijkelhof, H.M.C. (1999). *Vakkenintegratie natuurwetenschappen in de eerste fase van het voortgezet onderwijs: droom of nachtmerrie*. Discussiepaper. Delft: Stichting Axis.

Elkana, Y. (1975). *The discovery of the conservation of energy*. Cambridge (Massachusetts): Harvard University Press.

Engelen, M.P. van, Boersma, K.Th., & Eijkelhof, H.M.C. (2003a). *SONaTe in het buitenland. Voorbeelden samenhangend onderwijs natuur en techniek*. Delft: Stichting Axis.

Engelen, M.P. van, Boersma, K.Th., & Eijkelhof, H.M.C. (2003b). *SONaTe in lesmateriaal. Een analyse van geïntegreerd lesmateriaal*. Delft: Stichting Axis.

Falk, G. & Herman F. (eds) (1977). *Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts*. Hannover: Schroedel Verlag.

Feynman, R. P., Leighton, R.B. & Sands, M. (1963). *The Feynman lectures on physics*. Reading (Massachusetts): Addison Wesley.

Franken, P.W., Kabel-van den Brand, M.A.W. & Korver, E.J. (1998). *Chemie Overal scheikunde 1 vwo voor de tweede fase vwo NG/NT 1 en NG/NT 2*. Houten: EPN.

Franken, P.W., Kabel-van den Brand, M.A.W., Korver, E.J. & Reiding, J. (1999). *Chemie Overal scheikunde 2 vwo voor de tweede fase vwo NG/NT 3*. Houten: EPN.

Geraedts, C.L., Boersma, K.Th., Huijs, H.A.M. & Eijkelhof, H.M.C. (2001). *Ruimte voor SONaTe. Onderzoek naar good practice op het gebied van samenhangend onderwijs in natuur en techniek in de basisvorming*. Delft: Stichting AXIS.

Geraedts, C.L., Boersma, K.Th., & Eijkelhof, H.M.C. (submitted). Towards coherent science and technology education.

HBO-Raad (2003). *Brief aan de Minister van OCenW met een reactie op de nota 'Ruimte laten en keuzes bieden in de tweede fase havo en vwo, dd 21 maart 2003*. Den Haag: HBO-Raad.

Hummelen, H., Jambroes, A. & Valk, T. van der (2000). Vorm een bètaprofielteam! *NVOX*, 25 (3), p. 103-106.

Inspectie van het Onderwijs (2003). *Tweede fase vierde jaar. Een overzicht van de stand van zaken vier jaar na invoering van de tweede fase havo/vwo*. Utrecht: Inspectie van het Onderwijs.

Jansens, W.G.F. & Woerkom, M.M.A. van (eds) (2001). *Systematische Natuurkunde. Kernboek N1 vwo3 tweede fase*. Baarn: NijghVersluys.

Jonge, R. de, Lubeck, H. van & Peters, F. (1999). *Nu voor straks natuurkunde en scheikunde 2hv*. Zutphen: Uitgeverij Thieme.

Jonge, R. de, Lubeck, H. van & Peters, F. (2000). *Nu voor straks natuurkunde en scheikunde 3hv*. Zutphen: Uitgeverij Thieme.

Kamp, M. (2000). *Centrale concepten in het curriculum. Het voorbeeld homeostase in het curriculum biologie van de bovenbouw vwo*. Nijmegen: Katholieke Universiteit Nijmegen.

KNAW (2003a). *Ontwikkeling van talent in de tweede fase. Advies van de KNAW-klankbordgroep voortgezet onderwijs*. Amsterdam: KNAW.

KNAW (2003b). *Robuuste profielen in het voortgezet onderwijs. Advies van de KNAW aan de minister van Onderwijs, Cultuur en Wetenschappen over het curriculum in de tweede fase van het voortgezet onderwijs*. Den Haag: KNAW.

Knippels, M.C.P.J. (2002). *Coping with the abstract and complex nature of genetics in biology education. The yo-yo learning and teaching strategy*. Utrecht: CDß-Press.

Kortland, K., Langras, R., Bergen, H. van, Over, P., Wijbenga, J. & Verhagen, P. (1998). *Newton. Natuurkunde voor de tweede fase vwo informatieboek 1a 1b*. Zutphen: Uitgeverij Thieme.

Kortland, K., Langras, R., Bergen, H. van, Over, P., Wijbenga, J. & Verhagen, P. (2000). *Newton. Natuurkunde voor de tweede fase vwo informatieboek 2*. Zutphen: Uitgeverij Thieme.

Lagerwaard-Fijten, F., Leijen, A.W.J. van, Overbeek, M. van, Spanjers, A.W., Steenhuis, U.P. & Zee, A.P. van der (1998). *Biologie overal, vwo NG1*. Houten: EPN.

Lagerwaard-Fijten, F., Leijen, A.W.J. van, Overbeek, M. van, Spanjers, A.W., Steenhuis, U.P. & Zee, A.P. van der (1999). *Biologie overal, vwo NG2*. Houten: EPN.

Lagerwaard-Fijten, F., Leijen, A.W.J. van, Overbeek, M. van, Spanjers, A.W., Steenhuis, U.P. & Zee, A.P. van der (2000). *Biologie overal, vwo NG3*. Houten: EPN.

Lederman, N.G. & Niess, M.L. (1998). 5 apples + 4 oranges = ? *School Science & Mathematics*, 98 (6), p. 281-284.

Lijnse, P.L. (1990). Energy between the life-world of pupils and the world of physics. *Science Education*, 74, p. 571-583.

Maier, E. & Wijk, P. van (eds)(1998). *Nectar vwo bovenbouw biologie 1*. Groningen: Wolters-Noordhoff.

Maier, E. & Wijk, P. van (eds) (1999). *Nectar vwo bovenbouw biologie 2 deel 1*. Groningen: Wolters-Noordhoff.

Maier, E. & Wijk, P. van (eds) (2000). *Nectar vwo bovenbouw biologie 2 deel 2*. Groningen: Wolters-Noordhoff.

Middelink, J.W., Engelhard, F.J., Brunt, J.G., Hillege, A.G.M., Jong, R.W. de, Moors, J.H. & Ottink, H.A.M. (1998). *Systematische Natuurkunde. Kernboek N1 vwo1 tweede fase*. Baarn: NijghVersluys.

Muhlenbaumer, G.J., Dassen, H.E.A., Leemburg-van der Graaf, C.A., Griethuysen, G.A. van & Schäfer, D.F. (1998). *Pasteur, biologie voor de tweede fase, vwo informatieboek 1*. Zutphen: Uitgeverij Thieme.

Muhlenbaumer, G.J., Dassen, H.E.A., Leemburg-van der Graaf, C.A. & Griethuysen, G.A. van (1999). *Pasteur, biologie voor de tweede fase, vwo informatieboek 2*. Zutphen: Uitgeverij Thieme.

Nuffield (1967). *O level physics: guide to experiments, guide to apparatus*. London: Henneman.

OCenW (1998a). *Examenprogramma's profielen vwo/havo natuurwetenschappelijke vakken*. Zoetermeer: CFI, Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschappen.

OCenW (1998b). *Examenprogramma's profielen vwo/havo wiskunde*. Zoetermeer: CFI, Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschappen.

OCenW (1998c). *Kerdoelen basisonderwijs. Over de relaties tussen de algemene doelen en kerndoelen per vak*. Zoetermeer: Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschappen.

OCenW (1998d). *Kerdoelen basisvorming 1998 – 2003. Relaties in beeld*. Zoetermeer: Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschappen.

Pieren, L.O.F., Scheffers-Sap, M.M.E., Scholte, H.G.M., Vroemen, E.H.M. & Davids, W. (eds) (1995). *Chemie 3 havo/vwo*. Groningen: Wolters-Noordhoff.

Pieren, L.O.F., Scheffers-Sap, M.M.E., Scholte, H.G.M., Vroemen, E.H.M. & Davids, W. (1998). *Chemie vwo bovenbouw scheikunde 1, deel 1 en 2*. Groningen: Wolters-Noordhoff.

Pieren, L.O.F., Scheffers-Sap, M.M.E., Scholte, H.G.M., Vroemen, E.H.M. & Davids, W. (1999). *Chemie vwo bovenbouw scheikunde 2*. Groningen: Wolters-Noordhoff.

Schmid, G.B. (1982). Energy and its carriers. *Physics Education*, 17, p. 212-218.

Smits, G. & Waas B. (1998a). *Biologie voor jou 1mhv. Biologie voor de basisvorming*. Den Bosch: Malmberg.

Smits, G. & Waas B. (1998b). *Biologie voor jou vwo B1 tweede fase*. Den Bosch: Malmberg.

Smits, G. & Waas B. (1999). *Biologie voor jou 2mhv. Biologie voor de basisvorming*. Den Bosch: Malmberg.

Smits, G. & Waas B. (2000a). *Biologie voor jou vwo B2 deel 1 tweede fase*. Den Bosch: Malmberg.

Smits, G. & Waas B. (2000b). *Biologie voor jou vwo B2 deel 2 tweede fase*. Den Bosch: Malmberg.

Smits, G. & Waas B. (2001). *Biologie voor jou vwo B2 deel 3 tweede fase*. Den Bosch: Malmberg.

Solomon, J. (1985). Teaching the conservation of energy. *Physics Education*, 20, p. 165-170.

Team W12-16 (1992). *Achtergronden van het nieuwe leerplan. Wiskunde 12-16; band 2*. Utrecht: Freudenthal Instituut (FI) & Enschede: Stichting Leerplanontwikkeling (SLO). P. 27 - 29.

Tweede Fase Adviespunt (2001). *De implementatie van de vernieuwingen in de tweede fase van havo en vwo. Eindverslag van de schoolbezoeken*. Den Haag: Tweede Fase Adviespunt.

Tweede Fase Adviespunt (2002). *Samenhang en afstemming; inventarisatie van lesmethoden*. Te bestellen via http://www.tweedefase-loket.nl/nieuws/news_messages.php?cluster_id=25&message_id=701.

Valk, A.E. van der (1992). *Ontwikkeling in energieonderwijs*. Utrecht: CDβ-Press.

Venville, G.J., Wallace, J., Rennie, L.J. & Malone, J.A. (2002). Curriculum integration: eroding the high ground of science as a school subject? *Studies in Science Education*, 37, p. 43-84.

Verhoeff, R.P., Waarlo, A.J. & Boersma, K.Th. (2002). Naar een didactische structuur voor de cel als systeem. *Tijdschrift voor Didactiek der β-wetenschappen*, 19 (1&2), p. 42 – 61.

Vollebregt, M.J.(1998). *A problem-posing approach to teaching an initial particle model*. Utrecht: CDβ-Press.

Voorde, H.H. ten (1977). *Verwoorden en verstaan*. Den Haag: SVO.

VSNU (2003). *Brief aan de minister van Onderwijs, Cultuur en Wetenschappen over de tweede fase havo en vwo, dd 20 maart 2003*. Utrecht: VSNU.

Vuijk, R.A.J., Reichard, L.A., Rozemond, S., Dijkhuis, J.H., Admiraal, C.J., Aalmoes, H., Vaarwerk, G.J. te, Verbeek, J.A., Jong, G. de, Brokamp, N.J.J.M., Houwing, H.J., Vroome, R. de & Kuis J.D. (2000). *Getal en Ruimte 3V deel 1*. Houten: EPN.

Warren, J.W.(1982). The nature of energy. *European Journal of Science Education*, 4, p. 295-297.

Watts, D.M. (1983). Some alternative views of energy. *Physics Education*, 18, p. 213-217.

Woerkom, M.M.A. van (ed) (2000). *Systematische Natuurkunde. Kernboek N1 vwo2 tweede fase*. Baarn: NijghVersluys.

Zegers, G.E., Boersma, K.Th., Wijers, M., Pilot, A. & Eijkelhof, H.M.C. (2002). *SONaTe in het studiehuis. Onderzoek naar good practice op het gebied van samenhangend onderwijs in natuur en techniek in de tweede fase*. Delft: Stichting Axis.

Zegers, G.E., Mooldijk, A.H. & Eijkelhof, H.M.C. (2003). Wiskunde en de natuurwetenschappen staan samen sterk. *Nieuwe Wiskrant*, 3 (22), p. 11-13.

Bijlagen

- A.** Overzicht van de deelnemers aan dit SONaTe-project.
- B.** Begrippenkader voor transport van zuurstof in levende systemen (uitwerking van figuur 2).
- C.** Begrippenkader voor transport van voeding in levende systemen (uitwerking van figuur 2).
- D.** Begrippenkader voor transport van energie in levende systemen (uitwerking van figuur 2).
- E.** Begrippenkader voor transport van stikstof in levende systemen (uitwerking van figuur 2).
- F.** Formules in het ‘dagelijks’ leven door het FI en de SLO (Team W12-16, 1992).
- G.** Reken- en wiskundige vaardigheden bij biologie, natuurkunde en scheikunde in het examenprogramma vwo (OCenW, 1998a) en informatievaardigheden voor biologie, natuurkunde, scheikunde (OCenW, 1998a) en wiskunde (OCenW, 1998b).
- H.** Het voorkomen van natuurwetenschappelijke contexten in wiskundeboeken.
- I.** Exponentiële verbanden in lesmethoden van de bètavakken.
- J.** Overzicht van het werken met grafieken in de methoden van de bètavakken.
- K.** Overzicht van expliciet ingaan op ‘verbanden’ in schoolboeken.

Bijlage A. Overzicht van de deelnemers aan dit SONaTe-project.Scholen en docenten*St. Bonifatius College, Utrecht*

P. Boddeke
K. Hooyman
G. Janssen
L. Koster

Katholieke Scholengemeenschap De Breul, Zeist

A. Dorrestein
H. Hummelen
J. Noij
M. Platteel

Gereformeerde Scholengemeenschap Randstad, Rotterdam

H. van Loon
K. Mollema
C. Rijke
J. Schaeffer
W. Sonneveld

Montessori Lyceum Amsterdam, Amsterdam

L. Bolsman
E. Gijben
M. Stapel

Pieter Nieuwland College, Amsterdam

H. van Dijk

Denktank:

C. van Bart
J. Koolstra
H. van Riet

Centrum voor Didactiek van de Wiskunde en Natuurwetenschappen*Biologie*

K. Boersma
A. Jambroes-Willebrand

Natuurkunde

H. Eijkelhof
A. Mooldijk

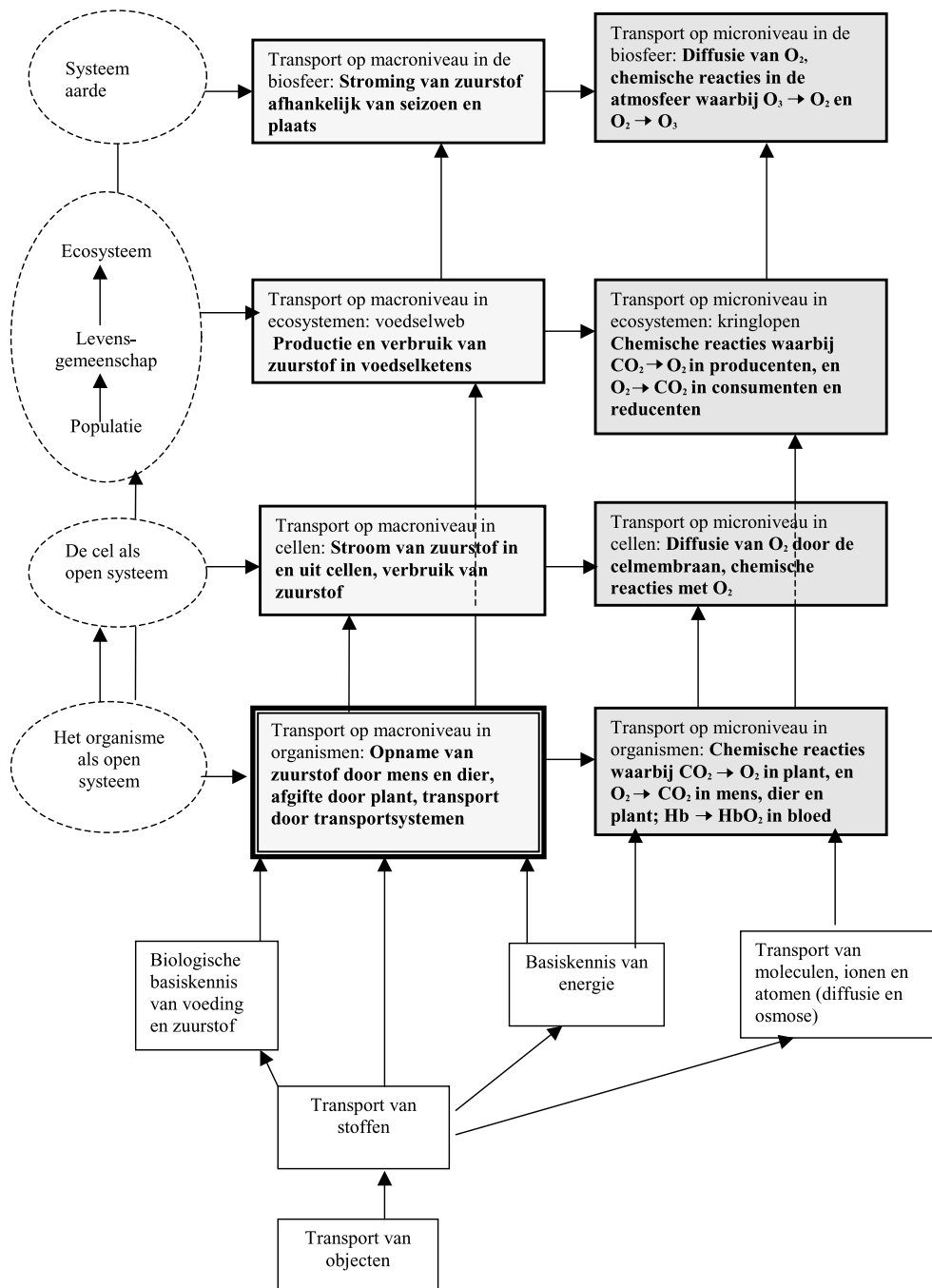
Scheikunde

R. Genseberger
G. Zegers

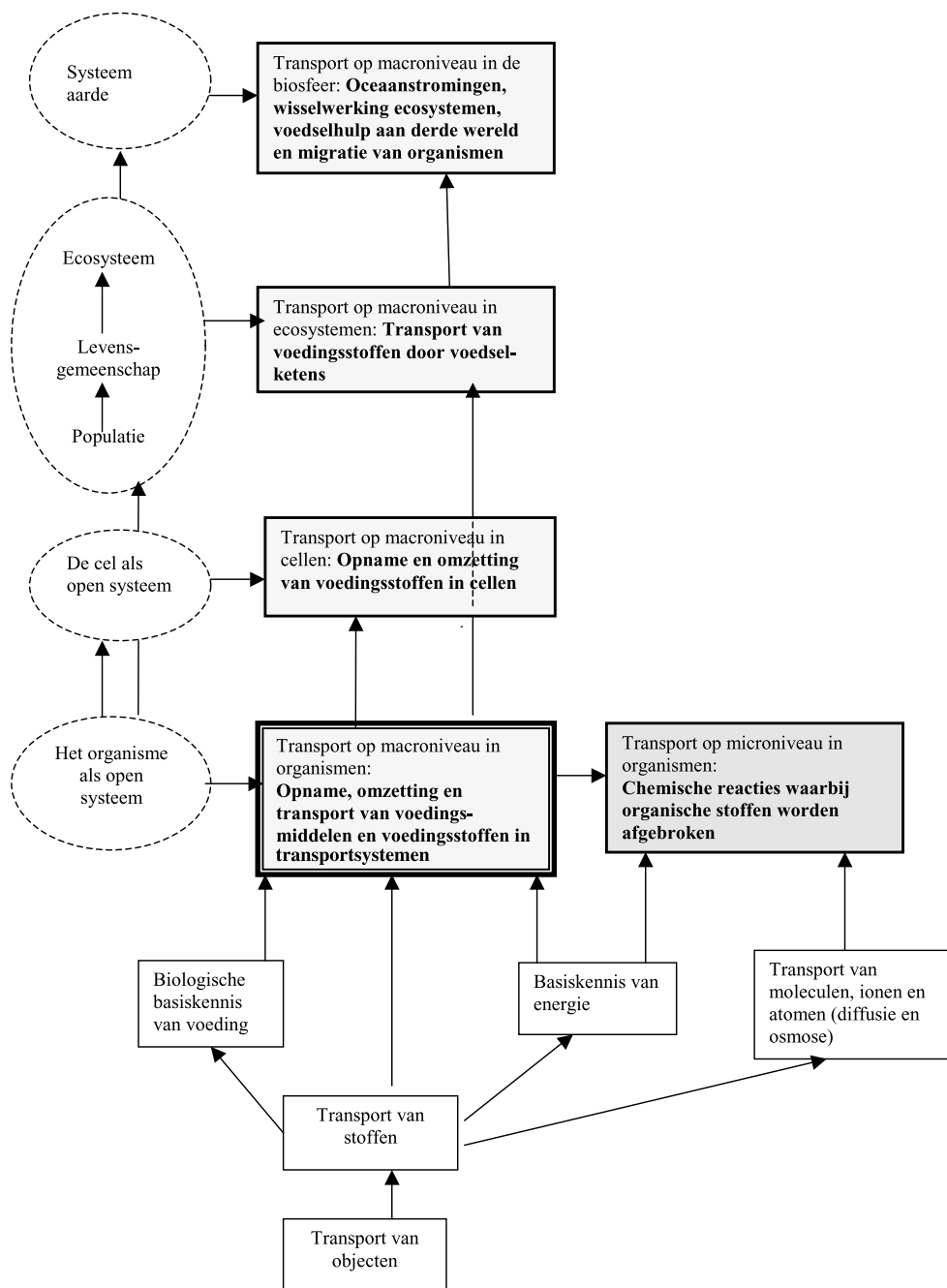
Wiskunde

H. van der Kooij
M. Wijers

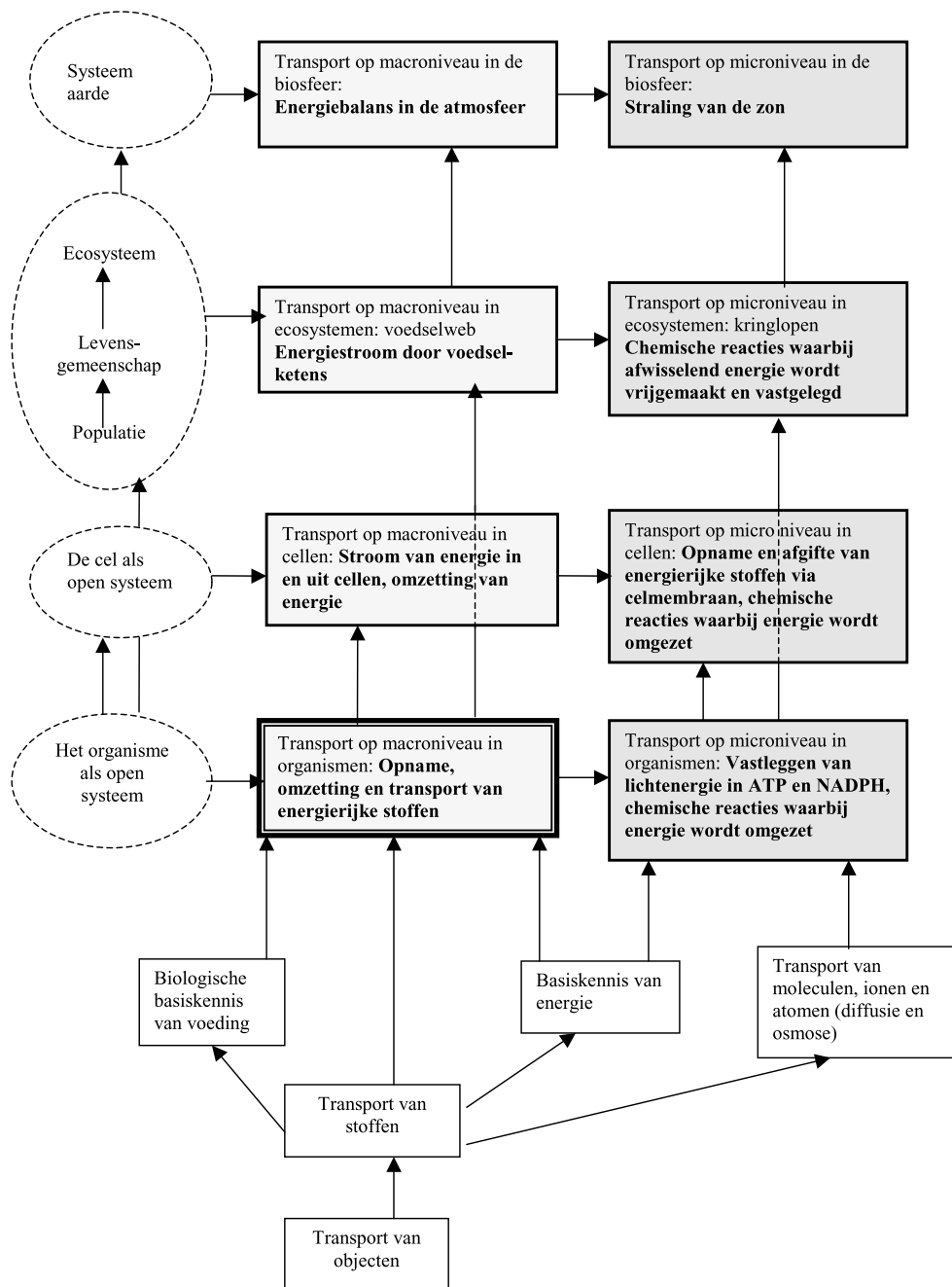
Bijlage B. Begrippenkader voor transport van zuurstof in levende systemen (uitwerking van figuur 2).



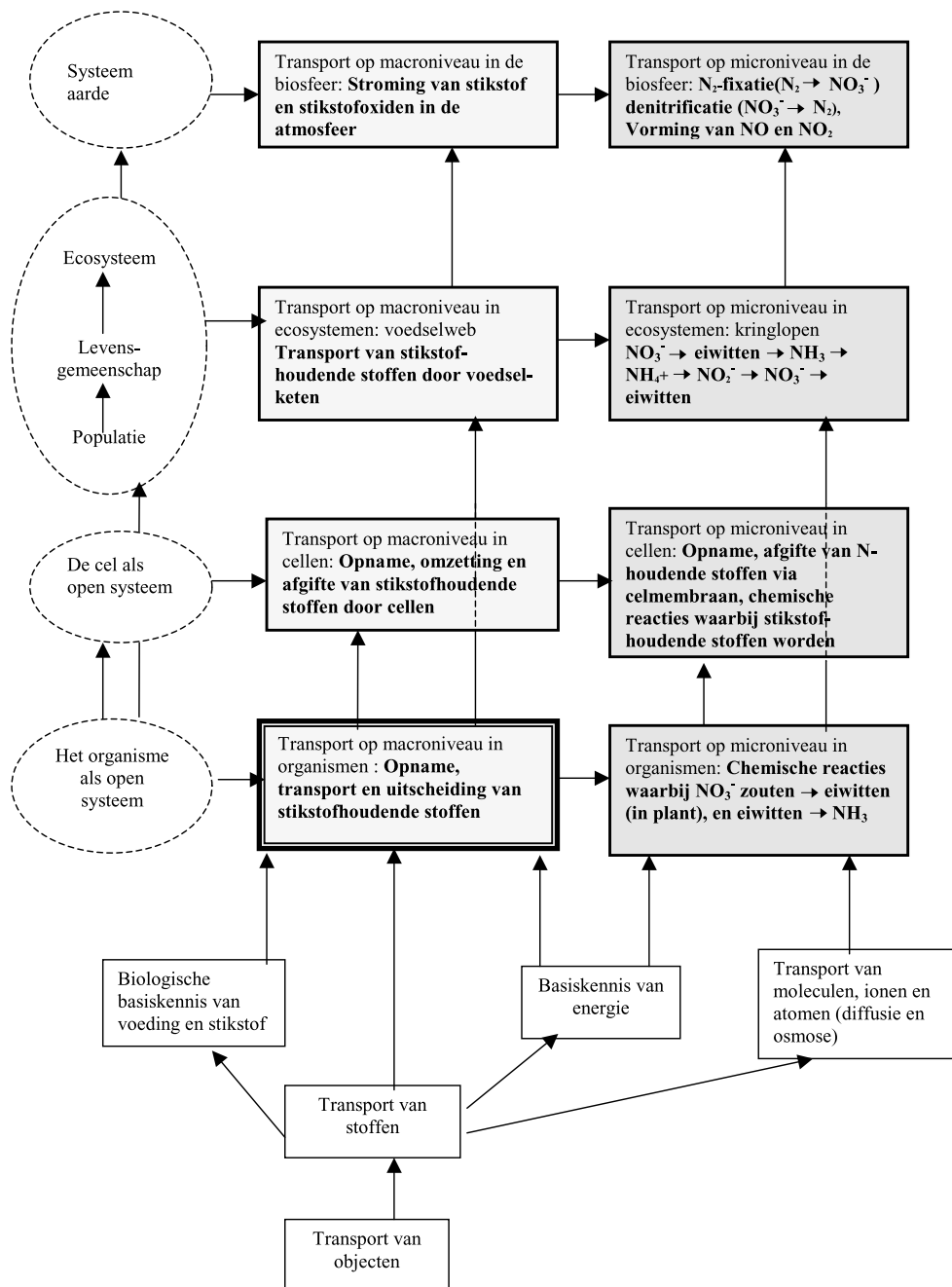
Bijlage C. Begrippenkader voor transport van voeding in levende systemen (uitwerking van figuur 2).



Bijlage D. Begrippenkader voor transport van energie in levende systemen (uitwerking van figuur 2).



Bijlage E. Begrippenkader voor transport van stikstof in levende systemen (uitwerking van figuur 2).



Bijlage F. Formules in het ‘dagelijks’ leven door het FI en de SLO (Team W12-16, 1992).

Formules

Welke formules komen mensen tegen in het dagelijks leven en wat doen ze er dan mee? Voor een algebraprogramma, dat wil aansluiten op wat mensen tegen kunnen komen, zijn dit essentiële vragen. Ons antwoord daarop bestaat uit: *een wild boeket formules*.

Een wild boeket formules

Hieronder volgt een lijstje van formules uit diverse toepassingsgebieden, waarmee leerlingen te maken kunnen krijgen in het dagelijks leven en in hun beroep. Er komen geen speciale functies, integralen, afgeleiden en dergelijke in voor. Voor de rest is het lijstje tamelijk willekeurig, maar wel karakteristiek voor het niveau waartoe ons leerplan toegang moet bieden.

a	De wet van Ohm	$U = I \cdot R$
b	Massa m van bol met straal R en dichtheid ρ	$m = 4/3 \pi R^3 \cdot \rho$
c	Vuistregel voor de levensduur in jaren T van een zoogdier met massa m	$T = 11,8 m^{0,20}$
d	Bevolking na t jaar, beginaantal N , groeifactor 1,2	$B = N \cdot 1,2^t$
e	Luchtweerstand W van een voorwerp bij snelheid v . Constante c hangt af van voorwerp en luchtdruk	$W = c \cdot v^2$
f	Elektrische weerstand als spanning en stroom bekend zijn	$R = U / I$
g	Lenzenformule. Verband tussen brandpunt- (f), voorwerp- (v) en beeldafstand (b)	$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{v}$
h	Doorbuiging h van een balk met dikte a , breedte b , lengte l , elasticiteitsmodulus E , onder een last G .	$h = \frac{Gl^3}{4a^3bE}$
i	Stopafstand als som van reactieafstand en remafstand van stoppende auto met snelheid v . Vuistregel: v in km/h, A in m	$A = 0,15v + (\frac{v}{10})^2$
j	Verband tussen Celsius en Fahrenheit	$F = C \cdot 1,8 + 32$
k	Prijs van gas	prijs = vastrecht + gebruik x kubprijs
l	Oppervlakte van cilinder met straal R en hoogte h	$Opp = 2 \pi R^2 + 2 \pi Rh$

Enkele kenmerken

Belangrijker dan de verschillen zijn voor ons de overeenkomsten tussen deze formules, want die zijn bepalend voor wat echt in het leerplan voorkomt.

In het oog springende kenmerken zijn onder andere:

a Het merendeel van de formules bevat méér dan twee variabelen.

Dat ligt voor de hand: samenhangen in de realiteit beperken zich zelden tot één grootheid en één andere grootheid. Elke variabele verwijst via een geschikte naam (of beschrijving) naar een grootheid in de context waar de formule betrekking op heeft.

b Een groot deel van de formules bestaat uit één component waarin alleen producten, delingen en machten voorkomen. De machten zijn bijna altijd geheel. Dit soort formules geeft vaak aan hoe de verschillende karakteristieken van de situatie waar de formule op slaat, elk een bepaalde factor bijdragen. De formule is opgebouwd uit factoren. Zo is in de formule van de doorbuiging te zien dat het gewicht lineair bijdraagt, de lengte echter in de derde macht. De dikte en breedte dragen weer anders bij; het is in verband met het doorbuigen beter een plank over een sloot twee keer zo dik dan twee keer zo breed te nemen.

c Plussen en minnen zijn betrekkelijk schaars. Als er een plus voorkomt beschrijven de delen aan weerszijden van de plus een eigen stuk van de situatie waarop de formule betrekking heeft; de aard van de situatie is duidelijk dan zo dat die bijdragen opgeteld moeten worden. Neem bijvoorbeeld de oppervlakte van de cilinder: som van gebogen deel en uiteinden.

d Lineaire verbanden komen veel voor. Het is de eenvoudigste samenhang in de wereld om ons heen die er is: twee grootheden die gelijk met elkaar opgaan, verschillend slechts in een verhoudingsfactor, zoals in de wet van Ohm, en soms nog iets verschoven ten opzichte van elkaar, zoals in de formule die Fahrenheit in Celsius uitdrukt. Een manier van kijken naar $W = c \cdot v^2$ is: de weerstand is evenredig met het kwadraat van de snelheid. Op die manier is er ook in dat voorbeeld van lineariteit sprake. In het algemeen zullen we dat in deze tekst zo niet doen, we beperken ons bij lineariteit tot de eerder genoemde karakteristieken van directe evenredigheid en verschuiving.

De bovengenoemde punten gaan over de relatie van de formule met de context. Er zijn nog andere, meer uiterlijke kenmerken:

e Notaties variëren (onder andere woorden of letters voor variabelen, verschillende vermenigvuldigtekens, enzovoort), maar worden vaak gericht op duidelijke samenhang met de context. Soms gaat dat zover dat twee formules eigenlijk hetzelfde verband beschrijven ($R = U/I$ en $U = I \cdot R$), maar in verschillende situaties verschillend worden genoteerd.

f Er zijn families van formules te ontdekken: de lineaire ($U = I \cdot R$); eenvoudige machtsverbanden ($W = c \cdot v^2$), exponentiële verbanden ($B = N \cdot 1,2^t$)

g Negatieve exponenten worden vermeden door ze door delingen te vervangen. Zie de lenzenformule en de doorbuigingsformule.

Bijlage G. Reken- en wiskundige vaardigheden bij biologie, natuurkunde en scheikunde in het examenprogramma vwo (OCenW, 1998a) en informatievaardigheden voor biologie, natuurkunde, scheikunde (OCenW, 1998a) en wiskunde (OCenW, 1998b).

scheikunde	natuurkunde	biologie
Reken / wiskundige vaardigheden		
9 basisrekenvaardigheden uitvoeren: een (grafische) rekenmachine gebruiken; rekenen met verhoudingen, procenten, machten, wortels; gewogen gemiddelde berekenen.	9 basisrekenvaardigheden uitvoeren: een (grafische) rekenmachine gebruiken; rekenen met verhoudingen, procenten, machten, wortels; de oppervlakte berekenen van een driehoek, cirkel en bol; het volume berekenen van een cilinder en een bol; absolute waarde.	9 basisrekenvaardigheden uitvoeren: een (grafische) rekenmachine gebruiken; rekenen met verhoudingen, procenten, machten, wortels.
10 berekeningen uitvoeren met bekende grootheden en relaties en daarbij de juiste formules en eenheden hanteren.	10 berekeningen uitvoeren met bekende grootheden en relaties en daarbij de juiste formules en eenheden hanteren: formules zoals vermeld bij de vakinhoudelijke subdomeinen.	10 berekeningen uitvoeren met bekende grootheden en relaties en daarbij de juiste formules en eenheden hanteren.
11 wiskundige technieken toepassen: omwerken van wiskundige betrekkingen; rekenen met evenredigheden (recht en omgekeerd); oplossen van lineaire en eenvoudige tweedegraadsvergelijkingen met twee onbekenden oplossen. berekeningen maken met logaritmen met grondtal 10;	11 wiskundige technieken toepassen: omwerken van eenvoudige wiskundige betrekkingen; rekenen met evenredigheden (recht en omgekeerd); oplossen van lineaire en tweedegraadsvergelijkingen; twee lineaire vergelijkingen met twee onbekenden oplossen; stelling van Pythagoras toepassen; sinus- cosinus- en tangensfunctie toepassen; vectoren optellen, aftrekken, ontbinden en vermenigvuldigen met een scalar; berekeningen bij ontbinden alleen bij twee onderling loodrechte richtingen; berekeningen van grootte en richting bij samenstellen van vectoren alleen bij twee onderling loodrechte assen; grafieken tekenen met behulp van een functievoorschrift; interpoleren en extrapoleren in grafieken, tabellen en diagrammen; de grafiek tekenen en het functievoorschrift opstellen bij rechtevenredige verbanden; raaklijn tekenen aan een kromme en de richtingscoëfficiënt bepalen; de oppervlakte onder een grafiek schatten, benaderen of door integreren bepalen; het differentiëren van polynomen, e-machten, goniometrische functies en rationale functies; gebruik van enkel- en dubbellog papier; relaties van de vorm $y=ax^2$, $y=ax^{-1}$, $y = ax^{-2}$ en $x^{-1}+y^{-1}= \text{constant}$ door coördinatentransformatie weergeven als grafieken met een rechte lijn; radiaal als hoekmaat; benadering van sinus en tangens voor kleine hoeken; $\log x$, $\ln x$, e^{ax} , e^{bx} , a^x , en x^a .	11 wiskundige technieken toepassen: omwerken van eenvoudige wiskundige betrekkingen; rekenen met evenredigheden (recht en omgekeerd); kansrekening: productregel.

12 afgeleide eenheden herleiden tot eenheden van het SI met behulp van omzettingstabellen.	12 afgeleide eenheden herleiden tot eenheden van het SI.	12 afgeleide eenheden herleiden tot eenheden van het SI met behulp van omzettingstabellen.
13 uitkomsten schatten en beoordelen.	13 uitkomsten schatten en beoordelen.	13 uitkomsten schatten en beoordelen.
14 uitkomsten van berekeningen weergeven in een aanvaardbaar aantal significante cijfers: een uitkomst mag één significant cijfer meer of minder bevatten dan op grond van de nauwkeurigheid van de vermelde gegevens verantwoord is.	14 uitkomsten van berekeningen weergeven in een aanvaardbaar aantal significante cijfers: een uitkomst mag één significant cijfer meer of minder bevatten dan op grond van de nauwkeurigheid van de vermelde gegevens verantwoord is.	14 uitkomsten van berekeningen weergeven in een aanvaardbaar aantal significante cijfers: een uitkomst mag één significant cijfer meer of minder bevatten dan op grond van de nauwkeurigheid van de vermelde gegevens verantwoord is.

Informatievaardigheden			
scheikunde	natuurkunde	biologie	wiskunde B
			1 artikelen of berichten uit (nieuws)media of vakliteratuur waarin wiskundige presentaties, redeneringen of berekeningen voorkomen, kritisch analyseren.
15 informatie verwerven en selecteren uit schriftelijke, mondelinge en audiovisuele bronnen, mede met behulp van ICT.	15 informatie verwerven en selecteren uit schriftelijke, mondelinge en audiovisuele bronnen, mede met behulp van ICT.	15 informatie verwerven en selecteren uit schriftelijke, mondelinge en audiovisuele bronnen, mede met behulp van ICT.	2 informatie verwerven en selecteren uit schriftelijke, mondelinge en audiovisuele bronnen, mede met behulp van ICT.
17 benodigde gegevens halen uit grafieken, tekeningen, simulaties, schema's, diagrammen en tabellen en deze gegevens interpreteren, mede met behulp van ICT: • onder andere het in tabellen opzoeken van grootheden, symbolen, eenheden en formules.	17 benodigde gegevens halen uit grafieken, tekeningen, simulaties, schema's, diagrammen en tabellen en deze gegevens interpreteren, mede met behulp van ICT: • onder andere het in tabellen opzoeken van grootheden, symbolen, eenheden en formules.	17 benodigde gegevens halen uit grafieken, tekeningen, simulaties, schema's, diagrammen en tabellen en deze gegevens interpreteren, mede met behulp van ICT: • onder andere het in tabellen opzoeken van grootheden, symbolen, eenheden en formules.	4 benodigde gegevens halen en interpreteren uit grafieken, tekeningen, simulaties, schema's, diagrammen en tabellen, mede met behulp van ICT.
18 gegevens weergeven in grafieken, tekeningen, schema's, diagrammen en tabellen, mede met behulp van ICT.	18 gegevens weergeven in grafieken, tekeningen, schema's, diagrammen en tabellen, mede met behulp van ICT.	18 gegevens weergeven in grafieken, tekeningen, schema's, diagrammen en tabellen, mede met behulp van ICT.	5 gegevens weergeven in grafieken, tekeningen, schema's, diagrammen en tabellen, mede met behulp van ICT.
21 informatie en meetresultaten analyseren, schematiseren en structureren, mede met behulp van ICT.	21 informatie en meetresultaten analyseren, schematiseren en structureren, mede met behulp van ICT.	21 informatie en meetresultaten analyseren, schematiseren en structureren, mede met behulp van ICT.	8 informatie analyseren, schematiseren en structureren.
22 de betrouwbaarheid beoordelen van informatie en de waarde daarvan vaststellen voor het op te lossen probleem of te maken ontwerp.	22 de betrouwbaarheid beoordelen van informatie en de waarde daarvan vaststellen voor het op te lossen probleem of te maken ontwerp.	22 de betrouwbaarheid beoordelen van informatie en de waarde daarvan vaststellen voor het op te lossen probleem of te maken ontwerp.	9 de betrouwbaarheid beoordelen van informatie en de waarde daarvan vaststellen voor het op te lossen probleem of te maken ontwerp.
			11 voorbeelden noemen van het gebruik van wiskunde in andere vakgebieden, beroepen of kunst.

In het wiskunde B examenprogramma zijn twee subdomeinen te vinden waar expliciet iets gezegd wordt dat direct betrekking lijkt te hebben op wat er bij de andere vakken met variabelen gebeurt.

Subdomein: **Functies, grafieken, vergelijkingen en ongelijkheden**

De kandidaat kan

- 4 een in de context beschreven samenhang vertalen in een functievoorschrift.
- 5 op grafieken transformaties uitvoeren als verschuiven en rekken en de samenhang met de bijbehorende verandering van het functievoorschrift beschrijven.
- 6 functies combineren (optellen, aftrekken, schakelen) en de samenhang met de bijbehorende grafieken beschrijven.
- 7 een tweede-gradspolynoom in één variabele ontbinden in lineaire factoren.
- 8 een algoritme gebruiken voor het oplossen van een tweede-gradsvergelijking.
- 9 vergelijkingen oplossen met numerieke, grafische of elementair-algebraïsche methoden.
- 10 de rekenregels voor machten en logaritmen (inclusief grondtalverandering) gebruiken.
- 11 gebruik maken van logaritmische schaalverdelingen.
- 12 ongelijkheden oplossen met de grafische methode.
- 13 de begrippen absolute waarde en entier (integer) hanteren.

Domein Cg: Discrete analyse

Subdomein: **Verandering**

De kandidaat kan

- 14 vaststellen op welke intervallen er sprake is van een constant, een stijgend of een dalend verloop van de grafiek van een functie.
- 15 vaststellen of een stijging/daling toenemend of afnemend is.
- 16 vaststellen of er minima en maxima zijn en uit een grafiek aflezen hoe groot die zijn.
- 17 veranderingen beschrijven met behulp van differenties, bijvoorbeeld Δx .
- 18 bij een gegeven functie of grafiek een toenamediaagram tekenen en daaruit conclusies trekken.
- 19 veranderingen beschrijven en vergelijken met behulp van differentiequotiënten.
- 20 differentiequotiënten berekenen als een functie gegeven is door een formule of grafiek.
- 21 differentiequotiënten interpreteren als maat voor gemiddelde verandering op een interval en als helling van een koorde.
- 22 bij afnemende stapgrootte differentiequotiënten interpreteren als benadering van de helling (steilheid) van de grafiek in een bepaald punt.
- 23 van een gegeven grafiek de bijbehorende hellinggrafiek beschrijven en met een computer numeriek benaderen.
- 24 uit een gegeven hellinggrafiek het verloop van de oorspronkelijke grafiek afleiden.
- 25 relaties leggen tussen contexten, bijbehorende formules of functies en veranderingsgedrag.

Onderdelen van 4 t/m 13 kom je in de natuurwetenschappelijke vakken ook min of meer tegen. Van het subdomein veranderingen is ook veel tenminste in aanleg aanwezig bij de natuurwetenschappen. Daar is aansluiting te vinden tussen de vakken.

Bijlage H. Het voorkomen van natuurwetenschappelijke contexten in wiskundeboeken.

Het onderzoek is beperkt tot de methode Moderne Wiskunde (deel A1/B1) (Bos, M. et al., 1998), omdat in de andere wiskundemethoden de contexten niet of nauwelijks direct gekoppeld zijn aan natuurwetenschappen.

Hoofdstuk 1 Grafieken en functies

Het maken van grafieken bij functievoorschriften onder andere met behulp van de Grafische Rekenmachine. Vooral formules met variabelen x en y komen voor. Daarnaast o.a.

Opg. 9 Remweg afhankelijk van snelheid. Kwadratisch verband

Opg. 13 Afkoeling van kop thee afhankelijk van tijd. Exponentieel verband.

Opg. 18 Hoogte uit raam gegooid vuurpijl afhankelijk van tijd. Derde macht.

Opg. 21 Hoogte gegooid steen afhankelijk van tijd. Kwadratisch.

G-1 Volume smeltend kubusvormig ijsblokje afhankelijk van tijd. Derde macht.

G-2 Windsnelheid af te leiden uit afmetingen omgeblazen muur. Meerdere grootheden.

Leerlingen maken berekeningen met de formules; zoeken kenmerken als domein/bereik; hoogste/laagste punt; maken grafieken.

Hoofdstuk 2 Algebra

Rekenen met functievoorschriften bij oplossen van vergelijkingen en ongelijkheden. Vooral kale formules in x en y .

Hoofdstuk 3 Veranderingen

Aanzet tot differentiëren via gebruik toenamediagrammen, differentiequotiënt, helling en vergelijking van raaklijn. Veel contexten waarbij de vragen gaan over *snelheid*.

Opg. 1/2 Waterhoogten in grafiek en tabel. Periodiek verband.

Opg. 4 Grafiek over gewicht in tijd van drogende bladeren in bio-practicum. Afnemend verband; totaal gladgestreken vraagstellingen waarin de context geen rol speelt.

Opg. 13/15 Waterhoogte afhankelijk van tijd in bizarre vazen.

Opg. 17 Grafiek tijdrit wielrenner afstand-tijd. Bereken gemiddelde snelheid

Opg. 18/19 Trainingsrit racefiets beschreven met $d(t)$ afgelegde afstand, tijd t . Vragen over snelheid.

Opg. 20 Hoogte met katapult geschoten steen tegen de tijd. Vragen over snelheid.

E-2 Grafieken verwachte bevolking Europa tegen de tijd bij verschillende vruchtbaarheidscijfers.

G-3 Concentratie geneesmiddel in bloed na injectie, in tijd. $C(t) = 8t/(t^2+4)$.

G-5 Tabel met gemiddelde snelheden in tijdsintervallen tijdens hardlooppwedstrijd. Maak afstand-tijd grafiek.

G-6 Exponentieel model (formule) voor groei inwonersaantal China. Vraag naar toenamesnelheid.

G-7 Formule voor cirkelvormige verspreiding druppel olie op glad oppervlak. Straal $= 1 + 3\sqrt{\text{tijd}}$. Vragen over snelheid.

G-8 Groei van populatie konijnen in derdegraads formule in t . Ook snelheid.

Hoofdstuk 4 Exponentiële functies

Uitdiepen van onderwerp exponentiële functies uit onderbouw. Onder andere rekenregels voor machten; vorm grafiek; oplossen vergelijkingen en ongelijkheden. In dit hoofdstuk komen relatief veel contextopgaven voor, waaronder vrij veel economische. Hieronder de aan de natwet. gerelateerde.

I-3 Aantal vissen in meer afhankelijk van de tijd. Vraag naar toenames en groeipercenages.

Opg. 3 Groei bacteriekolonie 15% per kwartier. Maak formule en bereken ermee.

Opg. 4 Formule voor de hoeveelheid lucht in poreuze fietsband tegen de tijd. Berekeningen.

Opg. 5 Afname insectensoort 7% per jaar. Berekeningen, maak functievoorschrift.

Opg. 6&9 Formule voor aantal Salmonellabacteriën t uur na meting. Negatieve en gebroken exponenten.

Opg. 10 Algensoort verviervoudiging per week. Maak functievoorschrift en bereken.

Opg. 16 t/m 19 Kale contexten, bijvoorbeeld: 'bepaalde diersoort aantal verdubbelt in 3 jr'; 'inwoneraantal groeit exponentieel'.

Opg. 20 Exponentiële groei van de watervaren Salvina. Maak functievoorschrift en bereken.

Opg. 21 Formule voor hoeveelheid gif in tank na t minuten spoelen. Plot grafiek, snelheden.

Opg 31 '*Eau de toilette vervluchtigt exponentieel: per half etmaal verdwijnt 7/8 deel. Bereken de halveringstijd.*'

Opg. 33 Formule voor afname hoeveelheid draaggas in de tijd. Grafiek, vergelijkingen.

Opg. 35 Verdunning van zoutoplossing. Maak formule, grafiek.

Opg. 36 Afname lichtintensiteit in troebel meertje 75% per meter. Vergelijking maken en oplossen.

In tussentoets en extra oefening komen vergelijkbare contexten voor.

G-2 Tabel met afname schuimkraaghoogte op glas bier. Formule, snelheid.

G-3 Concentratie verdovingsmiddel in lichaam hond neemt exponentieel af. Hoeveel mg nodig. (Echt als probleem gesteld).

G-4 C14 methode beschreven en toegepast.

G-6 Afkoelingswet van Newton globaal en formule voor temperatuur van koffie.

Extra A Over bevolkingsgroei (voor wiskunde A).

Hoofdstuk 5 Periodieke functies

In dit hoofdstuk worden onder andere sinus en cosinus als functie ingevoerd, daartoe eerst radialen als hoekmaat. Verder sinusoiden, transformaties en vergelijkingen.

I Gaat in zijn geheel over getijdenbewegingen, met echte en gemodelleerde data.

Opg. 13 Grafiek van vereenvoudigd model van bloeddruk. Kenmerken aflezen.

Opg. 23&31 Waterhoogte $H(t)=\cos t$ in bepaalde badplaats en $h(t)=1.85\sin 0,5t$ in Oostende. Kenmerken noemen en verschuiven van grafieken.

Opg. 37 Model voor hoeveelheid lucht in longen tegen tijd gegeven in exponentiële formule. Kenmerken noemen, vergelijkingen oplossen en verschuiven.

T-7 Formule Waterhoogte. Grafiek aflezen, probleem oplossen.

G-2 Grafiek daglengte per maand. Aflezen.

G-6 Uitwijking slinger afhankelijk van tijd in formule. Kenmerken en grafiek.

Extra-B B1: Trillingen: oscilloscoopbeeld van toongenerator wordt 'onderzocht', gaat onder andere over instellen van tijdbasis.

B2: over toonhoogte (bepaald door zijn frequentie)

Hoofdstuk 6 Machtsfuncties

Machtsfuncties uitgebreid naar gebroken en negatieve exponenten. Kenmerken en oplossen van vergelijkingen. Met formules wordt af en toe geredeneerd, maar niet in termen van soort afhankelijkheid. Wel soms ‘als .. groter wordt, wat gebeurt er dan met ...?’.

Instap Gaat in zijn geheel over roeiers. Formule $TK=cL^2V^3$. Totale kracht afhankelijk van lengte boot en topsnelheid en van type boot (c). Later nog andere formule waarin aantal roeiers verwerkt is.

Opg. 8 Formule voor hoogte gelanceerde raket afhankelijk van de tijd. Vergelijkingen oplossen.

Opg. 15 Roeiersformule. Grafiek en berekeningen (vergelijkingen).

Opg. 18 Formule voor verband tussen oppervlakte Galapagos eiland en aantal plantensoorten.

$S = 28,6A^{0,32}$. Onder andere ‘globaal’ redeneren over formule en vergelijkingen oplossen.

Opg. 26 Formule voor versnelling torusvormig ruimtestation afhankelijk van omwentelingstijd. Ook hier ‘globale’ vragen, onder andere: “wat weet je van t als het station heel snel draait?” en ‘als het station steeds langzamer draait, wat gebeurt er dan met de versnelling?’

T-3 Formule voor verband tussen oppervlakte leefgebied en aantal vogelsoorten.

Berekeningen, beetje redeneren.

E-6 Formule voor verband bij zoogdieren tussen hersengewicht en lichaamsgewicht. Rekenen.

G-1 !! Onderzoek verband tussen afstand tot zon en omlooptijd van planeten in zonnestelsel. Gegevens staan in tabel. Later gegeven: $T = c \cdot A^{1,5}$. De constante c moet berekend worden.

G-5 ! Formule voor verband tussen lichaamsgewicht zoogdieren (in kg!!) en energie nodig om 1 km af te leggen (uitgedrukt in ml zuurstof per kg). Enkele globale interpretatievragen, berekeningen (vergelijkingen).

Complexe opdrachten

Over gewichtsvermindering vleermuizen afhankelijk van verstreken tijd na eten van vers bloed. Grafiek gegeven. Afleesvragen dan: type formule zoeken machtsfunctie of exponentieel verband.

Versimpeld model over draaiing planeten om zon: sinusoïde voor afstand planeet tot zon, afhankelijk van tijd.

Formule voor benodigde snelheid van vliegende voorwerpen om in de lucht te blijven

afhankelijk van gewicht, vleugeloppervlak en luchtdichtheid. $v = \sqrt{\frac{G}{0,003 \cdot d \cdot S}}$

Berekeningen ermee: G en S vastzetten, ‘als d 6 keer zo klein wat gebeurt er dan met v ?’
Grafiek tekenen.

Hoofdstuk 7 Logaritmische functies

Introductie logaritme als exacte oplossingen van een exponentiele vergelijking en in termen van groeitijden. Rekenregels. Ook logaritmische schaal.

I-2 Exponentiële groei waterplant. Formule maken en grafiek. Tijden berekenen.

I-3 Afkoeling water, gegeven enkele meetwaarden ‘veronderstel dat de temperatuur exponentieel afneemt’. Formule maken en grafiek. Tijden berekenen.

I-4 Bacteriekoloniegroei. Dezelfde soort vragen als bij I-3.

Opg. 1 Groei van door waterplanten bedekt oppervlak. Formule en grafiek maken, aflezen en oplossen.

Opg. 6 Bacteriegroei exponentieel. Formule, grafiek, vergelijkingen oplossen.

In een aantal opgaven die volgen komt de bacteriegroeicontext zeer kaal voor, eigenlijk alleen maar als denkmodel.

Opg. 15 *‘Een batterij verliest bij gebruik 4% van zijn lading per uur.’*

Opg. 29 Seismogram afgebeeld. Schaal van Richter. Formule waarin logaritme zit, voor kracht van aardbeving afhankelijk van grootste afwijking in seismogram en tijd van trilling met grootste afwijking en afstand tot meetstation.

Opg. 30 Grafiek op logaritmisch papier van antistofconcentratie afhankelijk van de tijd. Interpreten.

Opg. 32! Figuur (uit natuurkundeboek?) over verband frequentie in Hertz van elektromagnetische straling en golflengte in meter. Dubbellogaritmische schaal.

T-1 Bacteriepopulatie

T-3 Halveringstijd Radium-228.

T-7 Grafiek van groei oppervlakte waterplanten (logaritmische schaal).

G-1 Afbraak geneesmiddel in bloed. Halfwaardetijd, vergelijkingen oplossen.

G-5 Cesium-137 met een halfwaardetijd van 30 jaar.

G-6 Tabel met geschatte energiebehoeften

A-3 Grafiek op logaritmisch papier van verloop aantal rupsen van grijze lariksvlinder tijdens een plaag.

Hoofdstuk 8 Standaardfuncties

Meest eenvoudige vorm van alle in voorgaande hoofdstukken geïntroduceerde soorten functies. Transformaties op de grafieken ervan. Er komen vooral veel ‘kale’ opgaven voor. Een enkele keer komen contexten terug in zeer bescheiden vorm.

Opg. 5 Afname Krypton-85; strontium-90 en Radium –228. Formules en grafiek maken.

T-4 Uitwijking slinger benaderd met sinusfunctie.

G-5 Concentratie geneesmiddel in bloed (exponentiële afname).

Hoofdstuk 9 Hellinggrafieken

Vervolg van hoofdstuk 3, maar nu wordt de hellinggrafiek geïntroduceerd en soms hoort daarbij een functievoorschrift. Dit is voorbereiding op het differentiëren. Vooral kale opgaven. In de contexten komen meestal grootheden voor die afhankelijk zijn van de tijd (populatieomvang, waterhoogte etc.). De vragen (in context) gaan altijd over de ‘groei’ snelheid.

Instap Achtervolging Giraffe door Cheetah met tijd-afstand grafiek. Wiskundig model en vragen over snelheid.

Opg. 3 Grafiek temperatuurverloop in de tijd. Vragen over snelheid van verandering,

Opg. 10 Formule voor vrije val op aarde. Snelheid.

Opg. 20 Grafiek waterhoogte afhankelijk van tijdstip. Stijgsnelheid bepalen.

Opg. 26 Omvang insectenpopulatie in exponentiële formule afhankelijk van tijd.

Groeisnelheid.

Opg. 30 Grafiek van ontwikkeling temperatuur van standaardbrand afhankelijk van de tijd. Toenamesnelheid.

T-1 Grafiek waterhoogte.

T-5 Formule waterhoogte (goniometrische functie).

T-6 Gemiddeld drooggewicht om groei komkommerplanten mee te beschrijven. Daarbij formule.

E-4 Steen van brug laten vallen, hoogte afhankelijk van tijd in formule.

G-2 Afstand-tijdgrafiek beschreven met derdegraadsformule.

G-4 Grafiek van verloop griepepidemie. Aantal slachtoffers tegen de tijd (s-curve).

Hoofdstuk 10 Rijen

Rijen (getallen) als een andere manier om naar groeiprocessen te kijken. Met name handig als het met functies lastig is. Recursieformules worden ingevoerd. Veel kale opgaven; ook wel wat economische (rente etc.) en meetkundige contexten (fractals).

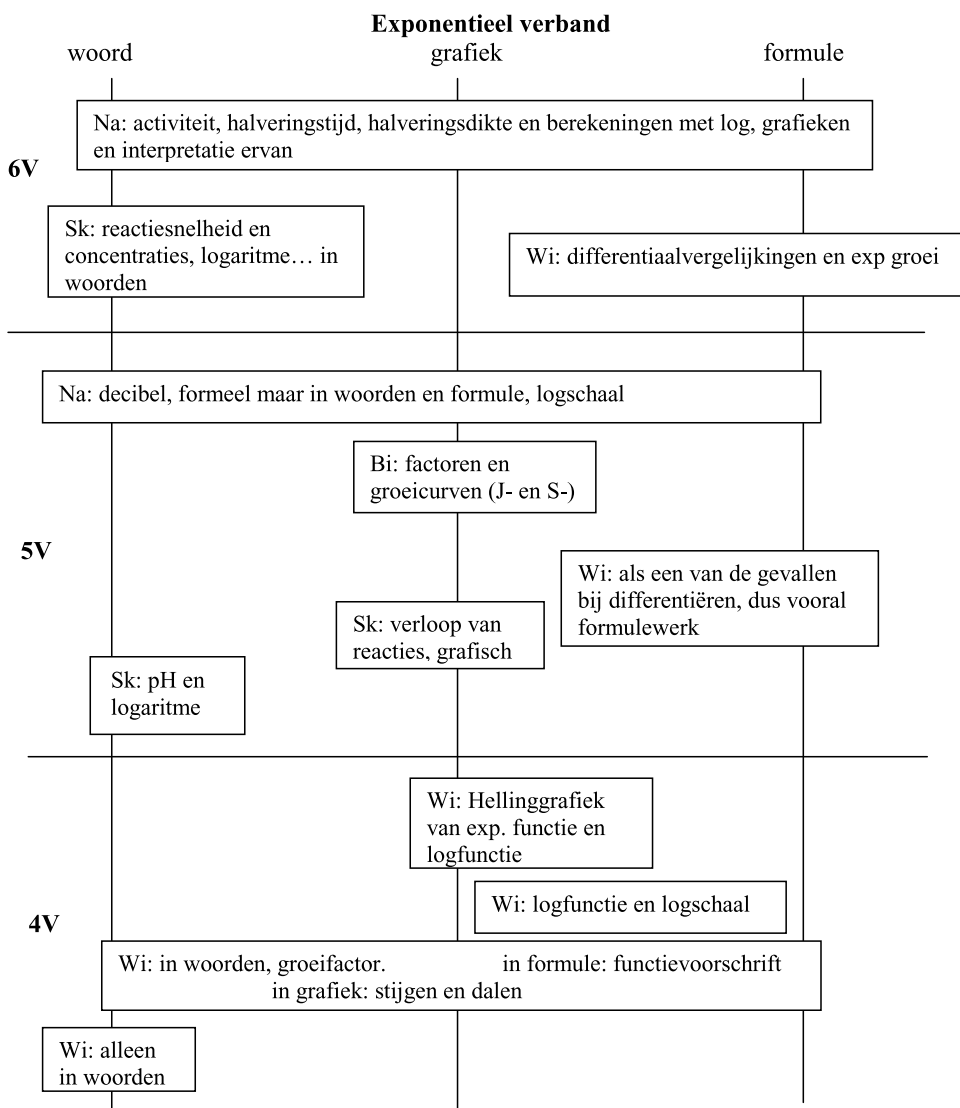
Opg. 4 Invloed van jacht op grootte van walvispopulatie. Recursievergelijking opstellen, wat gebeurt er uiteindelijk? Kan populatie constant blijven of groeien?

Opg. 31 Schematische tekening lichtopname in lagen bladeren van planten.

Onderzoeksopdracht naar model van Verhulst 'elke populatie heeft theoretische bovengrens afhankelijk van de omgeving'. Geremde groei.

Bijlage I. Exponentiële verbanden in lesmethoden van de bètavakken.

Verticaal wordt globaal weergegeven wanneer behandeling in de les plaatsvindt. Horizontaal schuift de behandeling van vooral intuïtief en kwalitatief (links) naar kwantitatief ofwel formeel (rechts), hier uitgedrukt in de termen woord, grafiek en formule.



Bijlage J. Overzicht van het werken met grafieken in de methoden van de bètavakken.

Verticaal is de behandeling van de onderdelen in de tijd uitgezet. Horizontaal schuift de behandeling van vooral intuïtief en kwalitatief (links) naar kwantitatief ofwel formeel (rechts), hier uitgedrukt in de termen woord, grafiek en formule. Uitwerking van bijlage K.

	woord	grafiek	formule
6V	Bi: trends bij mens en milieu in diagrammen	Na: grafisch halveringstijd	
	Na: ijkdiagrammen van sensoren bij automatisering	Wi: afgeleide functies bij differentiëren; geen toepassingen	
5V	Bi: grafisch verband tussen factoren en groei	Na: trillingen en golven in grafiek interpreteren, in formule zetten	
	Sk: energiediagrammen		
	Sk: titreren en verloop in diagram		
	Bi: energiediagrammen bij endotherme en exotherme reacties		
4V		Na: interpreteren diagrammen met helling en oppervlak	
	Bi: homeostase, interpreteren diagrammen		Wi: kenmerken grafieken van standaardfuncties
	Bi: interpreteren diagrammen hormoonspiegel e.d.		
		Wi: veranderingen zichtbaar in diagram	
		Na: meetresultaten onderzoeken, interpreteren en in formule zetten	
			Wi: grafieken bij functies

Bijlage K. Overzicht van expliciet ingaan op ‘verbanden’ in schoolboeken.

	Na1	Sk1	Bi12	WiB1
6v-sem 2	warmte en arbeid gaswetten; ijkdiagrammen van sensoren	pH , buffers berekenen; stereochemie		
6v-sem 1	activiteit en hoeveelheid stof, machtsfuncties; halveringsdikte ; spectra (energieniveauschema) Druk, kracht en oppervlak	chemische cel, potentiaaldiagram ; reactiesnelheid en –vergelijking; $s=k*[A]*[B]$ (logaritme)	mens en milieu, diagrammen en trends ; extern en intern milieu; ecosystemen met kringloop en biosfeer	differentiaal-vergelijkingen
5v-sem 2	trillingen, Dopplereffect; f, v en λ ; I en A bij staande golven; decibel en intensiteit en dB(A) logaritme . temperatuur en kleur	zuurconstante; chemisch evenwicht, rekenen met reactieconstante en evenwichtsconstante, T als parameter; rendement van reacties; energiediagrammen maken en lezen	metabolisme met processen en parameters; ecologie, grafische verbanden tussen factoren en groei , S-curve en J-curve; evenwicht, verband tussen diersoorten (vossen - konijnen); ecosystemen	functies en formules; parameters en meerdere grootheden; differentiëren; integreren
5v-sem 1	arbeid en energie $W=F \cdot s \cdot \cos(\alpha)$; hoekafhankelijkheid ; vermogen, rendement; energie als hoeveelheidbegrip; evenredigheid Q en t en m ; rendement van energieomzettingen, interpreteren diagrammen , helling en oppervlak verband tussen E_z en E_k bij beweging	pH en logaritme; titreren ; Reacties, snelheid, soort, parameters, reactie-evenwicht, verloop van de reacties grafisch ; algemene gaswet rekenen aan reacties, concentraties, molen en grammen (veel gehalte en verhoudingen)	energieomzettingen, exotherme en endotherme reacties, energiediagrammen , parameters bij reacties; glucoseproductie en gebruik;	klein beetje vectoren , zoals in examenprogramma
4v-sem 2	evenredigheid F en a , rol constante m . vectorontbinding en optelling , verband F en hoek, krachtevenwicht, moment van een kracht; optica: lenzenformule	verhoudingen (massa, volume) de mol en massa	genetica; Homeostase en evenwicht; diagrammen erbij	logschaal (intro); functievoorschrift bij standaardgrafiek bepalen; hellinggrafiek, verloop van een grafiek: stijgen, dalen
4v-sem 1	Verbanden $x, 1/x, x^2, 1/x^2$, meetresultaten onderzoeken en interpreteren , evenredigheid; U en I evenredig, veranderende constante R $E=P \cdot t$; Eenparige beweging evenredigheid van s met t , met t^2	machten van tien; grootheden, eenheden; schatten van hoeveelheden; significantie	diffusie, osmose principe; diagrammen hormoonspiegel, levensverwachting	grafieken bij functies ; veranderingen in diagrammen , raaklijn; exponentiele functies ; periodieke functies; logaritmische functies ,
	<i>Newton (Kortland et al., 1998)</i>	<i>Chemie (Pieren et al., 1998)</i>	<i>Biologie voor jou (Smits & Waas, 1998b; 2000a; 2000b; 2001)</i> <i>Biologie Overal (Lagerwaard-Fijten et al., 1998; 1999; 2000)</i>	<i>Moderne Wiskunde (Boer et al., 1998; 2000; Bos, D. et al., 1998; Bos, M. et al., 1998; 1999)</i>

Gebruikte lettertypen:

(interpreteren van) diagrammen
exponentiële functies en logaritmen

verhoudingen en evenredigheid
vectoren