

Naar een didactiek van probleemoplossen Een uitwerking voor het domein: chemisch rekenen

O. de Jong en A.H. Verdonk
Vakgroep Chemiedidactiek
CD- β , Universiteit Utrecht

Summary

The present article deals with an educational study of problem solving in secondary school chemistry (grade 10). The study focusses on a domain-specific topic: stoichiometric calculations. Textbook guidelines for solving problems can be interpreted as a result of a reflection of experts (authors of textbooks, teachers) on their methods. However, students can be considered as novices. This evokes the question to what extent differences occur between the prescribed methods to solve problems and the methods which students prefer to use.

In order to answer this question, a number of prescribed procedures and strategies is analysed. Subsequently, a problem oriented course in stoichiometry is developed. Students should construct as much as possible their own ways of problem solving. Their methods are analysed and compared with prescribed methods in textbooks. As a result of this comparison, some proposals are made to innovate education in problem solving, especially stoichiometric calculations.

1. Inleiding

'Lehrer sind Menschen die uns helfen Probleme zu beseitigen, die wir ohne sie nicht hätten'. Deze hartekreet, afgedrukt op een Berlijnse poster met een grote foto van een schoolklas er onder, geeft ietwat ironisch aan dat (Duitse) leerlingen moeilijkheden ervaren bij het leren oplossen van problemen. Wie met Nederlandse leerlingen in het middelbaar onderwijs praat, hoort al gauw klachten over het ervaren van een aanpakimpasse en over moeilijkheden met het selecteren en toepassen van bruikbare vakinhouden. Maar ook van de kant van docenten zijn er klachten te beluisteren. Zo klagen docenten er vaak over dat hun leerlingen onvoldoende kunnen 'lezen en rekenen'. Bovendien ervaren zij dat hun uitleg en herhaald voordoen lang niet altijd helpt. Kortom, probleemoplossen wordt niet alleen lastig gevonden om te leren maar ook om te onderwijzen.

In dit artikel wordt een aanzet gegeven voor een didactiek van probleemoplossen, dat wil zeggen een aanzet, gericht op onderwijs in probleemoplossen,

die gefundeerd is op empirisch onderzoek en reflectie op vakinhoud van onderwijs. Om die reden is gekozen voor een uitwerking naar een specifiek vakdomein, in dit geval 'chemisch rekenen'. Daarmee wordt een onderwerp bedoeld uit het leerplan scheikunde voor bovenbouw havo en vwo dat betrekking heeft op stoichiometrie, de leer van verhoudingen waarin hoeveelheden van stoffen bij reacties betrokken zijn. Als belangrijke maat van deze hoeveelheden fungeert het begrip mol.

Probleemoplossen zal hier worden opgevat als het toepassen van kennis. Met deze omschrijving wordt aangegeven dat er aan probleemoplossen zowel een vaardigheidsaspect kleeft, getuige het werkwoord toepassen, als een kennisaspect. Problemen gaan ergens over en dat betekent dat er bij het oplossen van vakinhoudelijke problemen ook vakinhouden in het geding zijn. Hierdoor kan probleemoplossen bijdragen aan (voortgezette) vakbegripsontwikkeling. Immers, indien een (reeds gekend) vakbegrip functioneert in een nieuwe (probleem)context, kan het oplossen van het betreffende probleem leiden tot ontwikkeling van een nieuwe (of aanvullende) betekenis van het begrip voor de probleemoplosser. Zo kan probleemoplossen ook bijdragen aan (voortgezette) ontwikkeling van vakwerkwijzen.

De opbouw van dit artikel is als volgt. In §2 komen enkele kernbegrippen betreffende het oplossen van vakinhoudelijke problemen aan de orde. Binnen dit kader wordt een centrale vraagstelling geformuleerd die gericht is op verschillen tussen voorgeschreven werkwijzen in leerboeken en favoriete werkwijzen van leerlingen. In §3 vindt een analyse plaats van voorschriften voor chemisch rekenen in gangbare leerboeken havo/vwo. Een didactisch onderzoek naar favoriete werkwijzen van leerlingen bij dit onderwerp komt aan bod in §4 en §5, waarna in §6 nagegaan wordt in welke mate er sprake is van aansluiting tussen voorgeschreven en favoriete werkwijzen. In de afsluitende §7 worden criteria geformuleerd voor het inrichten van onderwijs in probleemoplossen, met name chemisch rekenen.

2. Oplossen van vakinhoudelijke problemen in het onderwijs

Oplossen van vakinhoudelijke problemen: enkele kernbegrippen

Hierna volgen enkele kernbegrippen aangaande probleemoplossen, voornamelijk beschreven vanuit cognitief-psychologisch kader. Deze invalshoek kan volgens ons van zeker nut zijn voor het beschrijven van werkwijzen van leerlingen en docenten betreffende het oplossen van vakinhoudelijke problemen.

In het gangbare onderwijs in de natuurwetenschappelijke vakken is een relatief grote plaats ingeruimd voor het oplossen van opgaven, waarbij opgaven voornamelijk fungeren als oefenmiddel en toetsmiddel.

Het oplossen van opgaven is te beschouwen als probleemoplossen zodra degene die zich voor de taak gesteld ziet een opgave op te lossen niet onmiddellijk weet welke serie handelingen noodzakelijk is voor het volbrengen van de oplostaak. Het probleemkarakter van een opgave is dus groter naarmate er meer sprake is van een zoekproces.

Bij dit zoekproces speelt kennis van de oplosser een belangrijke rol. Aan dit proces en aan bijbehorende kennis zijn talrijke publicaties gewijd (zie voor een overzicht: Boekaerts, 1983; De Jong, 1986). Een veel voorkomende indeling van kennissoorten luidt (zie bijv. Anderson, 1982; Larkin, 1980):

- Declaratieve kennis (kennis van begrippen, regels, etc.).
- Procedurele kennis (vakinhoudelijk).
- Strategische kennis (vakonafhankelijk).

Deze indeling is overigens enigszins problematisch omdat de aangegeven kennissoorten niet strikt van elkaar te onderscheiden zijn. Dat geldt zeker voor het onderscheid tussen declaratieve en procedurele kennis.

Een patroon van oplosstappen waarbij zowel declaratieve kennis als procedurele kennis van veel belang is, noemen we in het vervolg een *vakinhoudelijke werkwijze*. Een reeks oplosstappen waarbij het vooral gaat om strategische kennis, noemen we hierna een *strategische werkwijze*. In beide gevallen gaat het overigens om een analytisch onderscheid! Daarmee is het mogelijk een indeling te maken van aanwijzingen die in het gangbare onderwijs aan leerlingen worden gegeven, namelijk *vakinhoudelijke richtlijnen* en *strategische richtlijnen*.

Bij het beschrijven van het proces van probleemoplossen is er een indeling te maken in een aantal oplosstrategische fasen. Een klassiek onderscheid luidt (Polya, 1945, 1990): analyse van een probleemstelling, planning van een werkwijze, uitvoering van een werkplan en evaluatie van een resultaat.

Volgens Newell en Simon (1972) is de probleemoplosser tijdens de analysefase bezig zich een mentaal beeld te vormen van de probleemstelling door het ontwikkelen van een interne probleemrepresentatie. Bij het opbouwen van deze representatie maakt de oplosser gebruik van zijn/haar kennisbestand (declaratief, procedureel, strategisch). De opgebouwde probleemvoorstelling stuurt in belangrijke mate het verloop van het oplosproces, maar ondergaat zelf ook veranderingen door het oplosproces. Bij alle veranderingen speelt het kennisbestand van de probleemoplosser weer een belangrijke rol.

Docenten en leerlingen als probleemoplossers

Het is gebruikelijk om docenten te beschouwen als experts in het oplossen van opgaven in leerboeken; leerlingen als beginners. Deze dichotomie draagt echter een enigszins kunstmatig karakter.

Zo zal een docent die is overgegaan op een leerboek met een voor hem/haar onbekend type opgaven zich aanvankelijk veel meer als een beginnend probleemoplosser gedragen. Bovendien doen zich zowel binnen de groep docenten als binnen de groep leerlingen verschillen in expertise voor. De aanduiding expert en beginner voor resp. docent en leerling draagt dus een enigszins globaal karakter. In het kader van dit artikel is het volgende onderscheid tussen experts/docenten en beginners/leerlingen van belang.

Voor experts bestaat het oplossen van opgaven in leerboeken voornamelijk uit het uitvoeren van routinehandelingen. Zij voeren deze handelingen veelal in 'verkorte' vorm uit (Gal'perin, in: Van Parreren en Carpay, 1980, p. 33). Met andere woorden, tijdens het oplosproces zullen kennis en vaardigheden die zij gebruiken voor het vinden van een oplossing grotendeels impliciet blijven. Zo zijn docenten in staat, na analyse, in één oogopslag een adequate oplosroute te overzien. Daarnaast zijn zij in staat, na de uitvoeringsfase, snel vast te stellen wat de waarde van een gevonden antwoord is. Indien nodig zijn docenten ook in staat hun verkorte handelingen, met name bij planning en evaluatie, te expliciteren en meer uitvoerig uit te voeren. Voor leerlingen ligt dat uiteraard meestal geheel anders en hebben veel opgaven in leerboeken een zeker probleemkarakter.

Wat betreft het opbouwen van een probleemrepresentatie zijn ook belangrijke verschillen tussen experts en beginners gerapporteerd (Chi e.a., 1982; Larkin e.a., 1980). Zo zijn experts geneigd al snel op zoek te gaan naar onderliggende verbanden tussen gegevens; zij speuren naar een 'dieptestructuur' van een probleemstelling. Beginners daarentegen beperken zich in eerste instantie veel meer tot een analyse van afzonderlijke gegevens; zij richten zich aanvankelijk vooral op een 'oppervlaktestructuur' van een probleemstelling.

Kortom, tussen docenten en leerlingen bestaan belangrijke verschillen wat betreft het oplossen van opgaven in leerboeken.

Aan de hand van de beschreven verschillen willen we de eerder genoemde klachten van docenten over het oplosgedrag van hun pupillen van enig commentaar voorzien. De klachten over gebrekkig 'lezen en rekenen' verwijzen naar tekorten die niet alleen van procedurele aard zijn (taal- en wiskundig), maar ook van strategische aard, namelijk gebreken in analyse en uitvoering. Dat juist deze twee oplosfasen, binnen een strategiecontext, op de voorgrond staan, is te verklaren vanuit een neiging van docenten om aan analyse en uitvoering het meest bewust en uitvoerig aandacht te besteden bij hun eigen aanpak van opgaven. Met hun kritiek gaan docenten er echter grotendeels aan voorbij dat leerlingen ook worstelen met beide andere strategische fasen (planning en evaluatie); dat geldt met name voor planning,

gezien hun regelmatig terugkerende aanpakimpasse en verwarring. De klachten van docenten worden door hen vaak geformuleerd in termen als 'leerlingen schieten tekort in ...' Het gebruik van deze terminologie wijst er op dat docenten betrekkelijk weinig aandacht hebben voor de eigen wijze waarop leerlingen, als beginners, bezig zijn met opgaven oplossen, bijv. het opbouwen van een 'oppervlaktestructuur' in de analysefase.

Kortom, verschillen tussen docenten en leerlingen als probleemoplossers dragen niet bij aan een beter begrip bij docenten aangaande moeilijkheden van leerlingen met het oplossen van opgaven in leerboeken.

Globale vraagstelling

Ter ondersteuning van leerlingen bevatten veel leerboeken in de natuurwetenschappelijke vakken een aantal voorschriften voor een aanpak van opgaven. De inhoud van deze voorschriften vatten wij op als een neerslag van collectieve ervaringen van leerboekauteurs en docenten, experts in het oplossen van opgaven in leerboeken. Dat hoeft echter niet te betekenen dat de verstrekte richtlijnen even goed bruikbaar zijn voor beginners als leerlingen, mede gezien verschillen in referentiekader van waaruit leerlingen en docenten opgaven oplossen. Dit roept de vraag op *in hoeverre vakinhoudelijke en strategische voorschriften in leerboeken aansluiten op werkwijzen die leerlingen zelf prefereren*. In de volgende paragraaf zal deze vraag verder worden uitgewerkt voor het domein chemisch rekenen in bovenbouw havo en vwo.

3. Voorschriften voor chemisch rekenen

Trends in voorschriften

De opkomst van stoichiometrische opgaven in leerboeken, zo'n 100 jaar geleden, is gepaard gegaan met het opnemen van aanwijzingen voor het oplossen van dergelijke opgaven. Toenmalige leerboeken voor het voortgezet onderwijs bevatten impliciete voorschriften in de vorm van modeluitwerkingen van representatieve opgaven (zie bijv. Horn, 1892, p. 71). Ongeveer 40 jaar geleden werd een begin gemaakt met het (aanvullend) aanbieden van expliciete voorschriften (zie bijv. Groen et al., 1956, p. 61).

Tot enkele jaren terug droegen de voorschriften in alle leerboeken een overwegend vakinhoudelijk en algoritmisch karakter. Een karakteristieke aanwijzing luidt bijvoorbeeld: 'Bereken met behulp van de molverhouding het aantal mol gevraagde stof' (Pieren e.a., 1988a, p. 55). Tegenwoordig bevatten sommige leerboeken havo/vwo daarnaast nog voorschriften die vakonafhankelijk en heuristisch van aard zijn. Een representatieve aanwijzing luidt bijvoorbeeld: 'Controleer of je antwoord niet strijdig is met wat je mag verwachten' (Pieren e.a., 1993a, p. 63).

De geschetste ontwikkeling laat zien dat er ten aanzien van onderwijs in chemisch rekenen in toenemende mate belang wordt gehecht aan het geven van vakinhoudelijke richtlijnen; aandacht voor het geven van strategische richtlijnen is in opkomst.

Inhoud van vakinhoudelijke voorschriften

De vakinhoudelijke voorschriften in leerboeken bestaan uit een aantal aanwijzingen, met als twee meest belangrijke richtlijnen:

- Noteren van een reactievergelijking.
- Opstellen en uitwerken van een stoichiometrische evenredigheid.

Een stoichiometrische evenredigheid is samengesteld uit (meestal) twee verhoudingen van hoeveelheden van reactanten en/of producten. De ene verhouding kan worden afgeleid uit de genoteerde reactievergelijking, de andere verhouding uit gegeven en gevraagde hoeveelheden in de tekst van een opgave.

Ruim 100 jaar geleden bevatten alle leerboeken voor het voortgezet onderwijs de aanwijzing een evenredigheid te noteren die is uitgedrukt in gram.¹ Ook na invoering in eindexamenprogramma's van het begrip grammolekuul (1932) en later het begrip mol (1964), bleef een aantal leerboeken nog lange tijd dit type evenredigheid voorschrijven (zie bijv. Van Keulen e.a., 1983, p. 69).² Tegenwoordig bevatten de acht meest gangbare leerboeken voor bovenbouw havo en/of vwo *alle de richtlijn een evenredigheid in mol te noteren*.³

De gesignaleerde verschuiving in voorgeschreven type evenredigheid, van gram naar mol, weerspiegelt een trend waarbij steeds meer nadruk gelegd wordt op een theoretisch beschrijvingskader van stoichiometrie van stoffen. In kringen van leerboekauteurs wordt hiervoor onder meer de volgende argumentatie gegeven (Pieren e.a., 1988b, p. 15):

'In het (oplos)schema is de molverhouding het belangrijkste. Sommigen lijkt het handiger uit de reactievergelijking direct de massaverhouding af te leiden. Dit is echter lang niet bij alle opgaven toepasbaar of handig (...). Bovendien accentueert het centraal stellen van de molverhouding de basis van het chemisch rekenen: het verband tussen de stoffen wordt door de reactievergelijking gegeven en deze staat in aantal mol, hoeveelheid stof.'

Hoewel het gebruik van een evenredigheid in mol aantrekkelijk kan zijn voor experts als leerboekauteurs (en docenten), hoeft dat niet zonder meer te gelden voor beginners als leerlingen. Per slot van rekening is het mogelijk ook zonder gebruik te maken van mol een stoichiometrische verhouding af te leiden uit de reactievergelijking, zoals dat ruim 100 jaar geleden gebruikelijk was, namelijk in gram (via een deeltjesmassaverhouding).

Inhoud van strategische voorschriften

Van de genoemde acht meest gangbare leerboeken havo/vwo bevatten drie leerboeken strategische aanwijzingen, zij het in verschillende mate.⁴ Daarnaast is enkele jaren terug door de SLO een afzonderlijk instructieboekje voor leerlingen op de markt gebracht dat een heuristiek bevat voor het oplossen van scheikundige opgaven (Jansen en Hondebrink, 1991). Samengenomen zijn de voorgeschreven strategische oplosstappen te formuleren als:

- Analyse: Ga na wat gegeven is en wat gevraagd.
- Planning: Maak een plan alvorens te gaan rekenen, begin zo nodig met het gevraagde.
- Uitvoering: Schrijf een uitwerking in volledige zinnen op.
- Evaluatie: Controleer een antwoord.

Uit de gegeven toelichtingen blijkt dat de analyse vooral gericht dient te zijn op het goed lezen van een opgave, gevolgd door het maken van een (schematisch) overzicht van gegevens en gevraagde. Het werkplan dient te worden opgesteld aan de hand van de voorgeschreven vakinhoudelijke richtlijnen, waarbij het belang benadrukt wordt van het 'terugwerken' van gevraagde naar gegevens in geval van moeilijke opgaven. De uitvoering mag niet op een wiskundesom lijken qua beknoptheid en bij de controle dient te worden nagegaan of een antwoord aansluit op de gestelde vraag en niet strijdig is met hetgeen verwacht mocht worden.

De beschreven aanwijzingen vatten wij op als het resultaat van een reconstructie van (ideaal) oplosgedrag van experts als leerboekauteurs en docenten, waarbij ook impliciete ('verkorte') oplosstappen, voor zover van belang, expliciet zijn uitgeschreven (zie ook: Larkin e.a., 1980). Het resulterende voorschrift kan zinvol zijn in de ogen van experts, maar daarmee staat nog niet vast dat leerlingen er door worden aangesproken en er naar handelen.

Toegespitste vraagstelling

De voorgaande beschrijving van voorschriften onderstreept het belang van de vraag naar aansluiting tussen voorgeschreven werkwijzen in leerboeken en werkwijzen die bij leerlingen 4-havo/4-vwo favoriet zijn.

Wat vakinhoudelijke werkwijzen aangaat, zal de vraag naar aansluiting worden toegespitst op een oplosstap die van cruciaal belang is, namelijk *het opstellen van een stoichiometrische evenredigheid*. Wat strategische werkwijzen aangaat, zal de vraag naar aansluiting worden toegespitst op gebieden waar leerlingen het minst gewend zijn om oplosstappen expliciet uit te voeren, namelijk op het gebied van analyse en van planning. Concreet gaat het om de volgende oplosstappen: *opstellen van een overzicht van gegevens en gevraagde, samenstellen van een werkplan en beginnen met het gevraagde*. In de volgende paragrafen zullen eerst gegevens over favoriete werkwijzen

van leerlingen worden gepresenteerd, toegespitst op de genoemde vakinhoudelijke en strategische oplosstappen. Dan volgt een beantwoording van de vraag naar aansluiting met voorgeschreven werkwijzen in leerboeken.

4. Favoriete vakinhoudelijke werkwijzen bij chemisch rekenen

Onderzoek naar het favoriete type evenredigheid

Nagegaan is welk type evenredigheid door leerlingen 4-havo/4-vwo wordt opgesteld, indien zij *geen richtlijn* betreffende deze oplosstap krijgen voorgeschreven. Om dat laatste te realiseren, is onderwijs in mol en stoichiometrie ontworpen, waarbij vakinhoudelijke richtlijnen zijn vervangen door stoichiometrische proeven met bijbehorende vragen. De proeven dienen onder meer als hulpmiddel bij de ontwikkeling van vakinhoudelijke werkwijzen; de bijbehorende vragen fungeren als impliciete hints en bevatten geen suggesties voor het gebruik van een type evenredigheid. Na de proeven volgt een aantal opgaven van verschillend type.

Het betreffende onderwijs is in de praktijk beproefd in de vorm van een zelfinstruerend lespakket met opdrachten waaraan leerlingen zelfstandig in groepjes werken. Bij elke opdracht dienen de groepjes intern overleg te voeren tot consensus is bereikt. Op deze wijze worden leerlingen gestimuleerd zoveel mogelijk samen vakinhoudelijke werkwijzen te ontwikkelen. De groepjes behoren hun uitwerkingen steeds schriftelijk vast te leggen. Bovendien dienen zij halverwege het pakket hun werkwijze tweemaal schriftelijk te verwoorden. Eenmaal na een serie opgaven waarbij gegeven en gevraagde hoeveelheden van reactanten en/of producten zijn uitgedrukt in mol ('mol-mol' opgaven) en eenmaal na een serie door hen opgeloste 'gram-gram' opgaven.

De schriftelijke uitingen van de groepjes leerlingen zijn verzameld en geanalyseerd. Op deze wijze zijn gegevens over het opgestelde type evenredigheid verzameld bij ongeveer 150 groepjes leerlingen⁵. De leerlingen waren afkomstig van acht scholen, verspreid over diverse regio's van het land. Meer informatie over het ontwikkelde onderwijs en het bijbehorende onderzoek is te vinden bij De Jong (1990).

Het favoriete type evenredigheid

Uit de uitgevoerde analyses blijkt dat lang niet alle groepjes zich beperken tot één bepaald type evenredigheid.⁶ Bij opgaven waar gegeven en gevraagde hoeveelheden zijn uitgedrukt in mol, wordt door een meerderheid een evenredigheid in mol opgesteld. Een voorbeeld daarvan is weergegeven in figuur 1. Maar bij opgaven waar hoeveelheden zijn uitgedrukt in gram, is die voorkeur minder groot en wordt er meer een evenredigheid in gram opgesteld. Bij een aantal 'gram-gram' opgaven komt dat bij een meerderheid van

de groepjes voor. Van dat laatste geeft figuur 1 eveneens een voorbeeld. Voor opgaven met een mengkarakter blijkt te gelden dat bij 'mol-gram' opgaven de voorkeur meestal veel lijkt op die bij 'mol-mol' opgaven, terwijl de voorkeur bij 'gram-mol' opgaven meestal meer overeenkomt met die bij 'gram-gram' opgaven.⁷

Opgave 1 ('mol-mol')

Riet wil een bariumchloride-oplossing maken waarvan de chloorionen-concentratie

0,30 mol/l is. Hoeveel mol bariumchloride heeft zij nodig als zij 3,0 l oplossing wil maken ?

Opgave 2a ('gram-gram', versie havo)

Hoeveel gram zuurstof is nodig voor de volledige verbranding van 40,0 gram koolstof ?

Opgave 2b ('gram-gram', versie vwo)

Hoeveel gram zuurstof is nodig voor de verbranding van 80,0 gram koolstof tot koolstofmonoxide ?

	'mol-mol' opgave		'gram-gram' opgave	
	Leerlingengroepjes			
	Havo	Vwo	Havo	Vwo
	(N=74)	(N=87)	(N=72)	(N=84)
Type evenredigheid				
- Evenredigheid in mol	92 %	94 %	29 %	35 %
- Evenredigheid in gram	8 %	6 %	71 %	65 %

Fig. 1. Favoriet type evenredigheid, opgesteld bij het oplossen van resp. een 'mol-mol' en een 'gram-gram' opgave

Uit de resultaten blijkt ook dat *het wisselend gebruik van een type evenredigheid* aansluit op hetgeen de groepjes zelf hebben verwoord na afloop van een aantal door hen opgeloste opgaven (zie fig. 2).

Tenslotte kan er op gewezen worden dat de verschillen in werkwijze tussen de havo-groepjes en de vwo-groepjes niet noemenswaardig groot zijn.

	Alle opgaven opgaven Leerboeken (N=8)	'mol-mol' opgaven Havo (N=74)	'gram-gram' opgaven Vwo (N=85)	'gram-gram' opgaven Havo (N=76)	'gram-gram' opgaven Vwo (N=88)
Type evenredigheid					
- Evenredigheid in mol	100 %	92 %	91 %	26 %	30 %
- Evenredigheid in gram	0 %	8 %	9 %	74 %	70 %

Fig.2. Voorgeschreven en door leerlingen verwoord type evenredigheid

5. Favoriete strategische werkwijzen bij chemisch rekenen

Onderzoek naar favoriete oplosstappen bij analyse en planning

Nagegaan is welke strategische oplosstappen (in de categorie: analyse en planning) door leerlingen 4-havo/4-vwo worden gehanteerd, indien zij *geen richtlijnen* betreffende dit soort oplosstappen krijgen voorgeschreven. Dat laatste is gerealiseerd in het eerder beschreven zelfinstruerende lespakket.

Als onderzoeksmateriaal hebben gediend schriftelijke uitwerkingen van opgaven en verwoordingen van eigen werkwijzen, verzameld bij de eerder genoemde (ongeveer) 150 groepjes leerlingen.

Ook is nagegaan welke strategische oplosstappen door leerlingen 4-havo/4-vwo worden gehanteerd, indien zij *vrijblijvend richtlijnen krijgen voorgeschoteld*, dat wil zeggen vrijgelaten worden om daar al dan niet mee aan de slag te gaan. Om dat laatste te realiseren, is gebruik gemaakt van een variant van het genoemde lespakket. De ontwikkelde versie is weliswaar op dezelfde leest geschoeid, zo is er weer groepswork en ontbreken voorgeschreven vakinhoudelijke werkwijzen, maar ditmaal kunnen de groepjes gebruik maken van suggesties voor een oplosstrategie.

Deze strategie bestaat uit de onderdelen aanpak, berekening en controle en is daar kortweg aangeduid als ABC-vuistregels (zie fig. 3). Het aanpakdeel verwijst allereerst naar een analysestap, het opstellen van een overzicht van gevraagde en gegevens. Daarnaast wordt een planningsstap genoemd, het samenstellen van een zogeheten ketting van deelstapjes. Het samenstellen van een dergelijke ketting kan op willekeurige plaatsen van start gaan, al naar gelang behoefte en voorkeur van leerlingen, bijv. vanuit het gevraagde, vanuit gegevens of ergens 'onderweg'.

Er is dus geen bijzondere nadruk op het werken vanuit het gevraagde. De aangeboden opzet biedt leerlingen tevens de mogelijkheid losse invallen betreffende in hun ogen veelbelovende oplosstapjes te combineren tot een samenhangend geheel.

- A = AANPAK** *• Maak een overzicht van het gevraagde/de gegevens*
 • Knoop het gevraagde en de gegevens aan elkaar via een 'ketting' van deelstapjes
- B = BEREKENING** *• Werk de deelstapjes uit*
- C = CONTROLE** *• Eenheden juist? Significante cijfers juist?*
 Antwoord zinvol?

Fig.3. ABC-strategie voor leerlingen

Het zelfinstruerende lespakket met de ABC-strategie is op dezelfde wijze in de praktijk beproefd als eerder beschreven. Het voornaamste onderzoeksmateriaal bestaat uit schriftelijke antwoorden van leerlingen, in dit geval afkomstig van ongeveer 100 groepjes. De leerlingen waren ditmaal afkomstig van zes scholen, verspreid over diverse regio's van het land. Voor meer informatie over de lespakketten en het onderzoek wordt weer verwezen naar De Jong (1990).

Favoriete oplosstappen bij analyse en planning

Wat het lespakket zonder richtlijnen betreft, daar blijkt uit de analyses dat ca. tien procent van de groepjes begint met het opstellen van een overzicht van gegevens en gevraagde, terwijl de overige groepjes beginnen met het opschrijven van oplosstapjes van meer vakinhoudelijke aard. Wat het plannen van uitwerkingen betreft, blijkt dat vrijwel alle groepjes werken vanuit gegevens naar het gevraagde. Andere strategische oplosstappen aangaande analyse en planning worden door vrijwel geen enkel groepje beschreven.

Wat het lespakket met de ABC-strategie aangaat, daar blijkt uit de analyses dat *een overzicht van gegevens en gevraagde is opgesteld door ongeveer tweederde van de groepjes*, gemiddeld over de opgaven. Wat planning van uitwerkingen betreft, blijkt dat *een ketting van deelstapjes is samengesteld door ongeveer éénderde van de groepjes*, gemiddeld over de opgaven. Een ketting is steeds genoteerd na een gegevens/gevraagde-overzicht en na een reactievergelijking.

Naarmate de leerlingen meer opgaven uit het pakket hebben opgelost, daalt globaal gesproken het aantal groepjes dat een overzicht en/of ketting produceert. Deze daling doet zich het sterkst voor bij de vwo-groepjes.

In figuur 4 is te vinden welk maximum en minimum percentage groepjes zich met het A-deel van de ABC-strategie hebben bezig gehouden.

	Gebruik		Waardering	
	Max. en min.		% Score: (erg) nuttig	
	Leerlingengroepjes		Leerlingen (indiv.)	
	Havo (N=63)	Vwo (N=41)	Havo (N=173)	Vwo (N=156)
Aanpak-onderdeel				
Opstellen overzicht				
gevraagde/gegevens	87 %-> 52 %	90 %-> 43 %	75 %	58 %
Opstellen ketting van				
deelstapjes	55 %-> 29 %	57 %-> 20 %	70 %	43 %

Fig.4. Gebruik en waardering ABC-strategie (A-deel)

Na afloop van het onderwijs is de mening van de leerlingen gepeild over het ervaren nut van het A-deel van de ABC-strategie via een vragenlijst met een 5-punts antwoordschaal en de mogelijkheid een gegeven score nader toe te lichten. Voor de score (erg) nuttig zijn de verwerkte antwoorden weergegeven in figuur 4. Daaruit blijkt dat bijna driekwart van de havo-leerlingen en ongeveer de helft van de vwo-leerlingen het opstellen van overzicht en ketting (erg) nuttig vindt. De leerlingen die deze mening zijn toegedaan, voeren daarvoor voornamelijk argumenten aan in termen van efficiëntie, zoals:

'want het is overzichtelijker dan dat je gewoon ergens begint te rekenen'.

De leerlingen die er een neutrale mening op na houden of het A-deel (erg) nutteloos vinden, uiten zich echter meer in de trant van:

'want bij moeilijke vraagstukken weet je dan wat je precies moet berekenen, maar bij een makkelijk vraagstuk is het meestal tijdverlies'.

Uit de genoteerde overzichten en kettingen blijkt dat *het 'terugwerken' vanuit het gevraagde nauwelijks voorkomt*. Bij het opstellen van een overzicht beginnen vrijwel alle groepjes met een opsomming van stofnamen en hoeveelheden die gegeven zijn, dan pas volgt het gevraagde. Bij het opstellen van een ketting is de aanpak niet veel anders. Als eerste schakel van een ketting is vrijwel steeds het omwerken van gegevens genoteerd of het afleiden van een verhouding uit een reactievergelijking.

6. Aansluiting tussen voorschriften en favoriete werkwijzen?

Voorgeschreven en favoriet type evenredigheid

Op grond van de beschreven resultaten is de vraag te beantwoorden in hoeverre er aansluiting is tussen voorgeschreven en favoriet type stoichiometrische evenredigheid. Uit de verzamelde gegevens blijkt dat er sprake is van

een *onvoldoende aansluiting*. De gangbare leerboeken schrijven een bepaald type evenredigheid voor, een evenredigheid in mol, terwijl het grootste deel van de groepjes een voorkeur heeft voor een wisselende werkwijze, waarbij het gebruikte type evenredigheid afhangt van het type opgave (zie fig. 2).

De wisselende voorkeur van deze groepjes kan verklaard worden door er van uit te gaan dat de termen 'gram' en 'mol' in de tekst van een opgave een belangrijke signaalfunctie vervullen met betrekking tot het oplosgedrag. Bekend is dat vooral beginnende probleemoplossers geneigd zijn in eerste instantie aan de slag te gaan met signaaltermen ('oppervlakte-analyse'), in tegenstelling tot experts die al snel op zoek gaan naar onderliggende concepten ('diepte-analyse') (Chi e.a., 1982).

Het kleinste deel van de groepjes heeft een voorkeur voor het gebruik van één type evenredigheid. Deze groepjes kiezen vermoedelijk voor het voordeel van een zekere mate van houvast. Dat hun voorkeur grotendeels uitgaat naar een evenredigheid in mol, hetgeen wel aansluit op de betreffende richtlijn, heeft waarschijnlijk veel te maken met het feit dat mol een centraal begrip is in de lessenserie over stoichiometrie.

Wat het gangbare onderwijs betreft, kan geconcludeerd worden dat het van belang is leerlingen veel meer vrij te laten in het gebruik van een bepaald type evenredigheid. Het ligt voor de hand onderwijs zodanig te herzien dat beide typen evenredigheid min of meer simultaan worden aangeboden. Toch hebben we ook tegen deze opzet een aantal bezwaren, voornamelijk vanwege het sterk 'uitleggende' karakter dat dergelijk onderwijs dan nog steeds heeft. In §7 zullen we daar verder op ingaan.

Voorgescreven en favoriete oplosstappen bij analyse en planning

Op grond van de beschreven resultaten is ook de vraag te beantwoorden in hoeverre er aansluiting is tussen voorgeschreven en favoriete oplosstappen op het gebied van analyse en van planning. Uit de verzamelde gegevens blijkt allereerst dat er sprake is van een *voorwaardelijke aansluiting* in geval van het opstellen van een gegevens/gevraagde-overzicht (analyse) en het samenstellen van een werkplan in de vorm van een ketting van deelstapjes (planning).

In beide gevallen worden de genoemde oplosstappen voornamelijk uitgevoerd indien deze vrijblijvend worden aangeboden en als daar bovendien echt behoefte aan is, namelijk in het geval van lastige opgaven. Het dalend gebruik van overzicht en ketting wijst daarop. Immers, door oefening zullen leerlingen de aangeboden opgaven, die grotendeels tot dezelfde categorie horen, gaandeweg steeds makkelijker vinden. Daarbij zullen zij steeds meer vertrouwd raken met door hen zelf ontworpen vakinhoudelijke werkwijzen.

Daardoor zal hun specifieke expertise groeien, maar tegelijkertijd hun behoefte aan een meer algemene werkwijze afnemen. Deze ontwikkeling is vooral van toepassing op 'goede' leerlingen, vandaar dat het verschijnsel zich sterker voordoet bij de leerlingengroepjes uit vwo dan uit havo.

Een dalende behoefte aan een oplosstrategie bij stijgende ervaring met het oplossen van opgaven van min of meer dezelfde soort, is ook elders gekonstateerd, namelijk bij heuristisch vwo-onderwijs in wiskunde (Van Streun, 1989, p. 81) en bij soortgelijk onderwijs in natuurkunde (Van den Berg, 1983, p. 166).

Voorts blijkt uit de resultaten dat er voor het vormgeven van een analysestap meer animo bestaat dan voor het vormgeven van een planningsstap. Een betrekkelijk lage acceptatie-graad van het opstellen van een werkplan is elders eveneens gesignaleerd, namelijk bij heuristisch wo-onderwijs in technische natuurkunde (De Jong, 1986, p. 81).

Samengevat kan enigszins voorzichtig geconcludeerd worden dat een meerderheid van de groepjes leerlingen het vormgeven van analyse en planning, voorgeschreven in leerboeken, weliswaar (erg) nuttig vindt, maar daar voornamelijk toe overgaat bij lastig ogende opgaven. Alleen in dat geval vinden deze groepjes de noodzakelijke investering in tijd en moeite gerechtvaardigd. Hun werkwijze is te betitelen als een 'minimax-aanpak', een benadering waarbij een minimum aan inspanning leidt tot een maximum aan resultaat.

Uit de verzamelde gegevens blijkt voorts dat er sprake is van een *ontbrekende aansluiting* met betrekking tot de in leerboeken voorgeschreven stap van het werken vanuit het gevraagde. De favoriete werkwijze van de leerlingengroepjes blijkt echter te bestaan uit het werken vanuit de gegevens. Deze voorkeur is te verklaren vanuit het feit dat het 'terugwerken' voor de groepjes een te sterke afwijking vormt van hun tot dan toe gebruikelijke oplosstrategie.

Wat het gangbare onderwijs betreft, kan geconcludeerd worden dat onderwijs in analyse en planning vooral van belang kan zijn voor de wat zwakkere leerlingen, vooral bij het havo.

Daarbij is het volgens ons van belang dat leerlingen voldoende vrijheid krijgen om opgaven volgens eigen voorkeur aan te pakken, dat geldt met name voor de strategie van het terugwerken vanuit het gevraagde. De vraag is nu welke inrichting van onderwijs daaraan zinvol kan bijdragen. Daarover meer in de volgende paragraaf.

7. Naar een didactiek van probleemoplossen (chemisch rekenen)

Criteria voor onderwijs in probleemoplossen (chemisch rekenen)

In het gangbare onderwijs 4-havo/4-vwo staat een rechtstreekse overdracht van werkwijzen op de voorgrond. De samenstelling van de voorschriften wordt bepaald door hetgeen docenten en leerboekauteurs noodzakelijk achten. Een aantal richtlijnen in leerboeken blijkt echter onvoldoende toegesneden te zijn op werkwijzen die leerlingen zelf bij voorkeur hanteren. Deze discrepantie kan voor leerlingen een belangrijke bron van knelpunten opleveren.

Naast leermoeilijkheden doet zich echter ook een belangrijk onderwijsknelpunt voor. Dat heeft te maken met de eerder genoemde tendens om steeds meer richtlijnen in leerboeken op te nemen, in combinatie met een vroegtijdige behandeling er van. Door deze ontwikkeling dreigt er in het huidige onderwijs veel nadruk gelegd te worden op het leren (gebruiken) van kant-en-klare voorschriften, voornamelijk van vakinhoudelijke aard. Deze teneur staat echter nogal op gespannen voet met plannen voor nieuw bovenbouwonderwijs havo/vwo, waar zaken als leren leren, zelfstandig werken en probleemoplossen hoog in het vaandel staan. Zo is in een recente nota van de Stuurgroep Profiel Tweede Fase VO (1994, p. 50) te lezen:

'Onderwijs dat beoogt dat de leerling een actievere rol krijgt (de leerling als motor van zijn/haar eigen leerproces), moet die leerling eerder en consequenter dan nu het geval is, medeverantwoordelijk maken voor dat leerproces.'

Uitspraken als deze wijzen er op dat de huidige onderwijspraktijk onvoldoende is toegesneden op te verwachten ontwikkelingen. De vraag is nu welke onderwijsopzet een zinvolle bijdrage kan leveren aan leren probleemoplossen, toegespitst op chemisch rekenen. Deze vraag zal worden beantwoord aan de hand van vijf kerncriteria voor een onderwijsinrichting (zie fig. 5). Elk criterium wordt hierna kort toegelicht.

-
1. Vervang 'uitleggend' onderwijs door meer 'ontwikkeland' onderwijs.
 2. Laat het oplossen van problemen geen doel op zich zijn, maar middel tot vorming van begrippen en werkwijzen.
 3. Laat leerlingen reflecteren op hun aanpak van problemen, mede aan de hand van uitgevoerde proeven.
 4. Ondersteun leerlingen zo nodig met een (algemene) oplosstrategie.
 5. Geef docenten een interactieve nascholing in probleemoplossen.
-

Fig. 5. Vijf kerncriteria voor onderwijs in probleemoplossen (chemisch rekenen)

1. Vervang 'uitleggend' onderwijs door meer 'ontwikkeland' onderwijs

Na voorgaande rapportage zal het niet verbazen dat onze voorkeur uitgaat naar onderwijs met een minder uitleggend karakter. We bepleiten onderwijs waar meer aandacht is voor activiteiten van leerlingen zelf. Zo is het vanuit een 'constructivistische' visie (zie bijv. Bodner, 1986) zinvol, dat leerlingen, via geschikte opdrachten en in samenspraak met elkaar, zoveel mogelijk zelf werkwijzen ontwikkelen voor het oplossen van problemen. Daarbij is het van belang dat een ontwikkeling van werkwijzen gekoppeld blijft aan begripsontwikkeling (zie criterium 2).

Voor onderwijs in chemisch rekenen houdt het genoemde criterium in dat vakinhoudelijke voorschriften in leerboeken vervangen worden door stoichiometrische proeven met bijbehorende vragen en opgaven, evenals door opdrachten om te reflecteren op de eigen probleemaanpak (zie criterium 3).

2. Laat het oplossen van problemen geen doel op zich zijn, maar middel tot vorming van begrippen en werkwijzen

In het gangbare onderwijs blijken opgaven vrijwel uitsluitend een functie te vervullen als oefenmiddel en toetsmiddel (proefwerk, eindexamen). Dit kan leiden tot een zekere 'sommencultuur', waarbij het oplossen van opgaven als een doel op zich wordt beschouwd. Opgaven kunnen echter ook dienst doen als *middel* tot vorming van begrippen en werkwijzen (in samenhang).

Bij deze vorming zijn drie fasen te onderscheiden: oriëntering, ontwikkeling en verwerking (Van Dormolen, 1981, p. 86). In de oriënteringsfase gaat het om een verkenning van contexten waarbinnen vorming van begrippen en werkwijzen een zinvolle rol speelt. De ontwikkelingsfase is gericht op een verheldering van een aantal kenmerken van begrippen en werkwijzen. In de verwerkingsfase gaat het om het hanteren van begrippen en werkwijzen in een vertrouwde context (oefening) of in een nieuwe context (toepassing).

Voor chemisch rekenen betekent het genoemde kerncriterium een afwijking van de gangbare onderwijsopzet. Daar is sprake van een rechtstreekse overdracht van betekenissen van het begrip mol, waarbij een deeltjes/stof-context voorop staat, gevolgd door het verstrekken van een voorschrift voor het oplossen van stoichiometrische opgaven. Het is echter ook mogelijk het begrip mol te ontwikkelen vanuit een reactiecontext, dat wil zeggen vanuit relaties tussen hoeveelheden van reactanten en/of producten, zodat stoichiometrische problemen van meet af aan centraal staan. Zo kan het oplossen van een opgave een noodzakelijke voorwaarde zijn voor het uitvoeren van een stoichiometrische proef. Hierdoor wordt tevens een koppeling met een oriëntatie op en ontwikkeling van een vakinhoudelijke werkwijze mogelijk gemaakt.

3. Laat leerlingen reflecteren op hun aanpak van problemen, mede aan de hand van uitgevoerde proeven

Bij 'ontwikkeland' onderwijs worden geen 'kant-en-klare' vakinhoudelijke procedures voorgeschreven. In plaats daarvan krijgen leerlingen de gelegenheid via geschikte taken, zoals proeven met bijbehorende opgaven, zelf vakinhoudelijke werkwijzen op te bouwen. Dit kan worden bevorderd door hen in kleine zelfstandige groepjes, bijv. in tweetallen, te laten werken aan taken uit een zelfinstruerend lespakket. Hierdoor kunnen zij in samenspraak met elkaar komen tot een verwoording van hun eigen oplosprocedure. Deze reflectie kan via generalisatie uiteindelijk leiden tot het opstellen van een bepaald vakinhoudelijk voorschrift. Zo nodig kan bijstelling plaatsvinden aan de hand van vervolgo opdrachten.

Voor onderwijs in chemisch rekenen kan het genoemde criterium inhouden dat er stoichiometrische proeven worden aangeboden waarbij berekeningen aan de hand van meetgegevens en een op te stellen reactievergelijking noodzakelijk zijn voor het beantwoorden van de probleemstelling waarop de proef betrekking heeft. Vragen bij de proeven doen mede dienst als impliciete hints voor het ontwikkelen van vakinhoudelijke werkwijzen, overigens zonder suggesties voor het gebruik van een type evenredigheid. De proeven worden gevolgd door opgaven. Voor het oplossen van deze opgaven worden leerlingen verwezen naar hun berekeningen bij voorafgaande proeven. Tenslotte wordt de leerlingen gevraagd hun werkwijze zelf te verwoorden.

4. Ondersteun leerlingen zo nodig met een (algemene) oplosstrategie

Aanvullende ondersteuning bij probleemoplossen is mogelijk door leerlingen enkele algemene hints aan te bieden in de vorm van een heuristiek. Deze kunnen zowel betrekking hebben op analyse van een probleem als op planning, uitvoering en evaluatie van een oplossing.

Daarbij is het van belang leerlingen zoveel mogelijk vrij te laten, bijvoorbeeld door het aantal aanwijzingen klein te houden. Door het aanbieden van algemene hints wordt bereikt dat leerlingen actief kunnen blijven zoeken naar een specifieke oplossing, terwijl ze tevens een handvat hebben voor het oplossen van andersoortige problemen.

Voor onderwijs in chemisch rekenen kan een (algemene) oplosstrategie als de eerder genoemde ABC-aanpak (fig. 3) goede diensten bewijzen. Daarbij is van belang dat algemene hints niet van meet af aan voorgeschreven worden, maar pas aangeboden in geval van ondervonden moeilijkheden met probleemoplossen.

5. *Interactieve nascholing van docenten in probleemoplossen*

Ook bij 'ontwikkeland' onderwijs spelen docenten een belangrijke rol. Met een aantal aspecten zullen docenten minder vertrouwd zijn, zoals het begeleiden van groepjes leerlingen die bezig zijn zelf werkwijzen te ontwikkelen. Nascholing kan dus een nuttige functie vervullen.

Goede ervaringen zijn opgedaan met een nascholingsopzet waarbij chemie-docenten gevraagd werd 'ontwikkeland' onderwijs in chemisch rekenen daadwerkelijk in praktijk te brengen en daarover tijdens scholingsbijeenkomsten te rapporteren. Een intensieve uitwisseling van ervaringen leidde tot een nauwe wisselwerking tussen lespraktijk en nascholingsinhoud. Er was sprake van 'interactieve' nascholing. Uit bijbehorend onderzoek (De Jong, 1992) kwam naar voren dat docenten meer zicht kregen op aanpakgedrag van hun leerlingen en zich meer bekwaam achtten om onderwijs in probleemoplossen te verzorgen. Wel bleken zij tamelijk ambivalent te staan tegenover het gebruik van heuristieken (als vervangers van algoritmen).

Tenslotte

De waarde van de genoemde vijf kerncriteria voor onderwijs in chemisch rekenen is inmiddels via onderzoek vastgesteld (De Jong, 1990), maar het is van veel belang dat ook nagegaan wordt welke waarde zij hebben voor onderwijs in andere domeinen binnen het schoolvak scheikunde. Dat geldt ook voor andere (exacte) vakken. Overigens kan worden opgemerkt dat met name onderzoek van zogeheten realistisch wiskunde-onderwijs al een eind op streek is (zie bijv. De Lange, 1987; Streefland, 1988). Voortschrijdende samenwerking tussen didactici van verschillende vakken is evenzeer van belang, mede met het oog op een verdere ontwikkeling van een didactiek van probleemoplossen.

Noten

1. Voorgeschreven werd uit de reactievergelijking een deeltjesmassaverhouding af te leiden en deze om te zetten in een gramverhouding. Gegeven hoeveelheden van reactanten en/of producten waren uitgedrukt in gram.
2. Voorgeschreven werd uit de reactievergelijking een deeltjesaantalverhouding af te leiden, deze om te zetten in mol en vervolgens om te rekenen in gram. Voorzover gegeven hoeveelheden van reactanten en/of producten waren uitgedrukt in mol, dienden deze ook omgerekend te worden in gram.
3. Carelsen, e.a. (1992); Pieren e.a. (1993a, 1993b); Reiding e.a. (1992a, 1992b); Storm van Leeuwen (1992); Van Antwerpen e.a. (1986, 1987).
4. Pieren et al. (1993a, 1993b); Storm van Leeuwen (1992).
5. Het preciese aantal groepjes, grotendeels duo's, fluctueert enigszins per opgave, omdat in sommige gevallen een uitwerking ontbrak op de ingeleverde antwoordvellen.
6. Voor niet-chemisch geschoolde lezers volgt hier een voorbeeld van beide soorten evenredigheden, uitgewerkt voor opgave 2a ('gram-gram').
Een evenredigheid in gram is samen te stellen uit de volgende verhoudingen:

(uit reactieverg.) $12,0 \text{ u (C)} : 32,0 \text{ u (O}_2\text{)} = 12,0 \text{ g (C)} : 32,0 \text{ g (O}_2\text{)}$

(uit tekst opgave) $40,0 \text{ g (C)} : ? \text{ g (O}_2\text{)}$. Het berekende aantal gram is tevens eindantwoord. Een evenredigheid in mol is samen te stellen uit de volgende verhoudingen: (uit reactieverg.) $1 \text{ mol (C)} : 1 \text{ mol (O}_2\text{)}$ en (uit tekst opgave) $(40,0/12,0) \text{ mol (C)} : ? \text{ mol (O}_2\text{)}$. Het berekende aantal mol dient nog te worden omgerekend in aantal gram.

7. Met de term 'mol-gram' opgave wordt een opgave bedoeld waarbij gegeven hoeveelheden reactanten en/of producten zijn uitgedrukt in mol en gevraagde hoeveelheden reactanten en/of producten zijn uitgedrukt in gram (eenheden al dan niet voorzien van een voorzetsel). De betekenis van de term 'gram-mol' opgave is omgekeerd.

Literatuur

- Anderson, J.R. (1982). Acquisition of Cognitive Skills. *Psychological Review*, 89, 369-406.
- Antwerpen, A.P. van, et al. (1986). *Scheikunde voor voortgezet onderwijs* 2v. Zeist: NIB (tweede druk).
- Antwerpen, A.P. van, et al. (1987). *Scheikunde voor voortgezet onderwijs* 2h. Zeist: NIB (tweede druk).
- Berg, J.S. van den (1983). *Natuurkunde-vraagstukken-oplossen*. Eindhoven. (dissertatie).
- Bodner, G.M. (1986). Constructivism: a theory of knowledge. *Journal of Chemical Education*, 63, 873-878.
- Boekaerts, M. (1983). Probleemoplossen: een eclecticische benadering. *Tijdschrift voor Onderwijsresearch*, 8, 193-217.
- Carelsen, F.J., et al. (1992). *Scheikunde voor nu en straks 4hv*. Zutphen: Thieme.
- Chi, M.T.H., R. Glaser & E. Rees (1982). Expertise in problem solving. In R.J. Stenberg, (Ed.), *Advances of the psychology of human intelligence*, (pp.7-75), Hillsdale: Erlbaum.
- Dormolen, J. van (1981). *Didactiek van de wiskunde*. Utrecht: Bohn, Scheltema & Holkema.
- Groen, J., H. Hamann & J.W. Schuijl (1956). *Inleiding tot de scheikunde*. z.p.: Nederlands Instituut voor Bedrijfspaedagogie
- Horn, D. (1892). *Leerboek der Scheikunde voor H. B. Scholen met 3-jarigen cursus, Gymnasia, Handelsscholen, Kweekscholen, enz.* 's Gravenhage: Joh. Ykema.
- Jansen, G. & J. Hondebrink (1991). *Hoe pak ik een probleem aan?* Enschede: SLO.
- Jong, O. de (1990). *Rekenen aan reacties, een didaktische studie van chemische berekeningen in begin bovenbouw havo/vwo*. Utrecht. (dissertatie).

- Jong, O. de (1992). Interactive teacher training, implications for an inservice course in teaching problem solving. In J.H.C. Vonk et al. (Eds.), *New prospects for teacher education in Europe II*, (pp.131-141), Utrecht: WCC.
- Jong, T. de (1986). *Kennis en het oplossen van vakinhoudelijke problemen*. Eindhoven. (dissertatie).
- Keulen, H.P. van, L.F.J. van Gastel & R.H. Smit (1983). *Chemie in theorie en praktijk 2v*. 's Gravenhage: Nijgh & Van Ditmar Educatief.
- Lange, J. de (1987). *Mathematics, insight and meaning*. Utrecht: OW & OC. (dissertatie).
- Larkin, J.H. (1980). Teaching problem solving in physics, the psychological laboratory and the practical classroom. In D. T. Tuma & F. Reif (Eds.) *Problem solving and education: issues in teaching and research*, (pp. 111-125), New York: Erlbaum.
- Larkin, J.H., et al. (1980). Expert and novice performance in solving physics problems. *Science*, 208, 1335-1342.
- Newell A. & H.A. Simon (1972). *Human problem solving*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Parreren C.F. & J.A.M. Carpay (1980). *Sovjetpsychologen over onderwijs en cognitieve ontwikkeling*. Groningen: Wolters-Noordhoff
- Pieren, L.O.F., et al. (1988a). *Chemie 5havo*. Groningen: Wolters-Noordhoff (tweede druk).
- Pieren, L.O.F., et al. (1988b). *Chemie 5havo docentoelichting*. Groningen: Wolters-Noordhoff (tweede druk).
- Pieren, L.O.F., et al. (1993a). *Chemie 5havo*. Groningen: Wolters-Noordhoff (derde druk).
- Pieren, L.O.F., et al. (1993b). *Chemie 4vwo*. Groningen: Wolters-Noordhoff (derde druk).
- Polya, G. (1990, oorspr. 1945). *How to solve it?* Londen: Penguin Books.
- Reiding, J., P.W. Franken & M.A.W. Kabel-van den Brand (1992a). *Chemie Overal 4h*. Culemborg: Educaboek (tweede druk).
- Reiding, J., P.W. Franken & M.A.W. Kabel-van den Brand (1992b). *Chemie Overal 4v*. Culemborg: Educaboek (tweede druk).
- Storm van Leeuwen, J.W. (1992). *Scheikunde 4v*. Groningen: Wolters-Noordhoff.
- Streefland, L. (1988). *Realistisch breukenonderwijs*. Utrecht: OW & OC. (dissertatie).
- Streun, A. van (1989). *Heuristisch wiskunde-onderwijs*. Groningen. (dissertatie).
- Stuurgroep Profiel Tweede Fase Voortgezet Onderwijs (1994). *Tweede fase, scharnier tussen basisvorming en hoger onderwijs*. Zoetermeer: Min.O&W.