

Proefschrift Marc van Mil

Learning and Teaching the Molecular Basis of Life

Bespreking door:

Michiel Dam

ICLON, Universiteit Leiden

Samenvatting

Op 2 juli 2013 promoveerde Marc van Mil aan de Universiteit Utrecht op het proefschrift met de titel *Learning and Teaching the Molecular Basis of Life*. In het proefschrift wordt allereerst een aantal knelpunten geconstateerd bij het onderwijzen van moleculaire processen en celleer in de bovenbouw van het vwo. Daarna wordt toegewerkt naar het ontwerpen van een lessenserie, waarvan de effecten worden gemeten. Het – persoonlijk getinte – proefschrift start met een aantal op elkaar voortbouwende hoofdstukken waarin de opzet, methodieken en implicaties worden besproken en samengevat, gevolgd door drie papers in artikelvorm.

In het eerste hoofdstuk start Van Mil met een persoonlijk schrijven over hoe hij betrokken raakte bij de reizende DNA-labs en zijn onderzoek naar de sterke en zwakke punten daarvan (wat gelijk het eerste paper is). Van Mil constateert hierin op basis van grootschalig vragenlijstonderzoek dat leerlingen na een bezoek van het reizende DNA-lab en de daarin behandelde lessenserie over kanker, veel vooropgezette cognitieve en affectieve doelen behalen. Denk hierbij aan een grotere interesse voor het onderwerp en een beter begrip van de processen die een rol spelen bij kanker. Hij benoemt echter ook twee aandachtspunten uit de evaluatie: 1) de ondermaatse aandacht voor ethische oordeelsvorming rond genetisch onderzoek, en 2) de missende onderlinge samenhang tussen de behandelde biologische concepten en tussen de organisatieniveaus in de biologie.

In het tweede hoofdstuk belicht Van Mil dit tweede aandachtspunt vanuit vakdidactisch werk van – de bij hetzelfde instituut gepromoveerde – Marie-Christine Knippels en Roald Verhoeff. Daarna wordt de term 'emergentie' gedefinieerd en gebruikt als basis voor verder ontwerp. Allereerst schetst Van Mil opnieuw het probleem van moleculair en cellulair onderwijs en de combinatie met het gestructureerd indelen in biologische organisatieniveaus: het omhelst maar een gedeeltelijke en onsamenhangende verklaring voor hogere orde eigenschappen. Deze probleemstelling mist volgens Van Mil in het werk van Knippels (2002), die in haar promotieonderzoek vooral duidelijk maakte dat leerlingen zich bewust moeten worden van de verschillende organisatieniveaus. De verklaring van *hoe* een onderliggend organisatieniveau leidt tot gebeurtenissen in een hoger niveau lijkt vol-

gens Van Mil hierbij echter te missen. Ook het promotieonderzoek van Verhoeff (2003), dat de horizontale en verticale samenhang respectievelijk binnen en tussen de organisatieniveaus beschrijft, lijkt volgens Van Mil tekort te schieten om de geconstateerde leemte te verhelpen. Hoewel de aanpak van Verhoeff het systeemdenken verhoogt, draagt deze volgens Van Mil nog steeds niet bij aan het oplossen van het probleem dat leerlingen processen niet kunnen verklaren aan de hand van gebeurtenissen in lagere organisatieniveaus en ook blijven vasthouden aan de gegeven functies van bijvoorbeeld organellen, zonder na te denken waarom (als gevolg van wat) dit eigenlijk gebeurt.

Een belangrijke uitspraak in dit proefschrift is dan ook dat in het voortgezet biologieonderwijs teveel de nadruk ligt op het aanleren van de losse onderdelen en hun functies, terwijl het juist om een samenhangend systeem draait. En wat een systeem onderscheidt van een verzameling onderdelen is (zelf)organisatie. In het proefschrift gebruikt Van Mil hierbij voor het eerst de term 'emergentie', wat hij, naar Wimsatt (2000), uitlegt als "een organiserend principe dat gebaseerd is op een mechanistische verklaring van de interactie tussen de onderdelen van het systeem".

In het derde en vierde hoofdstuk wordt dit principe van het mechanistisch verklaren van celbiologische processen verder uitgewerkt en onderbouwd door literatuur (wat ook is uitgewerkt in het tweede paper). Op basis van een breed scala aan filosofische en biologisch gerelateerde literatuur concludeert Van Mil dat wetenschappers veelal afbeeldingen en animaties gebruiken om dergelijke mechanistische verklaringen te geven, waarbij ze vijf heuristieken gebruiken: 1) ze stellen *hoe*-vragen, 2) ze verdelen activiteiten op basis van hun functie, 3) ze hypothetiseren mechanistische schema's, 4) ze voorspellen moleculaire eigenschappen vanuit activiteiten en vice versa, en 5) ze hypothetiseren en voorspellen organisatie in een mechanisme. Bij deze heuristieken wordt enerzijds bestaande biologische kennis gebruikt en wordt anderzijds de kennis van het ene organisatieniveau gebruikt in het daaropvolgende niveau, samen vanuit een bepaald organisatieniveau de activiteiten en organisatie in andere niveaus voorspellend. Wat volgt is de probleemstelling dat leerlingen deze heuristieken vaak niet beheersen en dientengevolge plaatjes en animaties vaak foutief lezen.

Om te onderzoeken in hoeverre leerlingen met de juiste ondersteuning wel in staat zijn om biologische celprocessen mechanistisch te verklaren, heeft Van Mil in hoofdstuk 6 (en het derde paper) een lessenserie ontworpen en uitgevoerd, waarna hij de effecten ervan heeft onderzocht. De onderzoeksvragen hadden de volgende focus: effecten op de samenhang tussen cellulaire activiteiten en moleculaire interacties, effecten op het gebruik van moleculair mechanistisch redeneren en in hoeverre leerlingen vonden dat eventueel mechanistisch redeneren hen hielp om de moleculaire en cellulaire concepten te verbinden.

De lessenserie is ontworpen vanuit drie invalshoeken: 1) top-down, waarbij leerlingen vanuit hogere organisatieniveaus vragen stellen en hypothetiseren over de gebeurtenissen in lagere organisatieniveaus, 2) oorzakelijk redeneren, waarbij leerlingen chemische

en fysische principes gebruiken om causale verbanden te zoeken tussen gebeurtenissen in de verschillende organisatieniveaus, en 3) bottom-up, waarbij leerlingen vanuit een lager organisatieniveau mechanistische verklaringen geven over de daaropvolgende organisatieniveaus. Er zijn verschillende data verzameld, zoals observaties, video- en audio-opnamen, leerlingenwerk ($n = 12$), (uitgeschreven) interviews en opnamen van een groepsdiscussie na afloop van de lessenserie. In de analyse is gebruik gemaakt van de eerder genoemde heuristieken, alsook van logische redeneerstappen en kwalitatieve verschillen tussen voor- en nameting.

De conclusies (in een overzichtelijke tabel, p.163) laten zien dat leerlingen bijvoorbeeld het afdalen vanuit hogere naar lagere organisatieniveaus erg behulpzaam vinden bij het inzien dat gebeurtenissen in een hoger organisatieniveau een oorzaak hebben in lagere organisatieniveaus als bijvoorbeeld de cel. Ook het gebruik van de *hoe*-vraag blijkt te leiden tot het begrip van activiteiten in onderliggende organisatieniveaus. Er zijn echter ook wat knelpunten. Dat blijkt bijvoorbeeld uit de observatie dat, hoewel leerlingen door de lessenserie gaan inzien dat moleculen betrokken zijn bij de activiteiten, ze het lastig vinden om te begrijpen hoe moleculen daadwerkelijk activiteiten veroorzaken. De conclusie betreffende het daadwerkelijk gebruik van mechanistisch redeneren is dat leerlingen in vergelijking met de voormeting meer mechanistische vragen stellen en dat deze vragen ook aantonen dat leerlingen de cellulaire gebeurtenissen beter onderverdelen in activiteiten. Ook het gebruik van intentionele verklaringen voor gebeurtenissen in biologische afbeeldingen en animaties nam af. De laatste onderzoeksvraag betref de vraag of leerlingen vonden dat mechanistisch redeneren moleculaire en cellulaire concepten verbond. Vanuit de resultaten concludeert Van Mil dat leerlingen in beginsel niet echt een probleem zagen tussen 'wat cellen doen' en 'wat moleculen doen', waarbij leerlingen wel aangaven dat deze manier van redeneren hen hielp om meer bewust te zijn van het 'hoe', in plaats van 'zo is het gewoon'.

In het laatste hoofdstuk geeft Van Mil een aantal theoretische en praktische implicaties. Zo bekritiseert hij de huidige biologiecurricula, waarbinnen onderwerpen als genetica, celbiologie en moleculaire biologie verspreid en in losse hoofdstukken worden behandeld. Teneinde moleculair mechanistisch redeneren te bevorderen, zouden deze onderwerpen met meer samenhang onderwezen dienen te worden, alsook het geven van de benodigde natuurkundige en scheikundige kennis. Ook de kennis en kunde van de huidige docent zou tekortschieten voor het onderwijzen van moleculair mechanistisch redeneren. Van Mil pleit dan ook voor meer aandacht voor dit principe in docentenopleidingen. Een andere implicatie is dat het principe van mechanistisch redeneren ook voor andere onderwerpen in de biologie een rol zou kunnen spelen, bijvoorbeeld de werking van de longen, of zelfs een rol zou kunnen spelen in andere bètavakken.

Commentaar

Dit proefschrift laat een sterke redeneerketen zien, die leidt tot concrete en heldere aanbevelingen voor het aanleren van celbiologische processen in de klassenpraktijk. Wat mij ook opvalt, is de innovatieve manier van kijken naar deze processen en de sterke rol van interacties in de samenhang tussen organisatieniveaus en biologische concepten. Van Mil komt tot het mechanistische redeneren vanuit het verbinden van vorm en functie, en dat lijkt een goede aanvulling op het eerdere werk van Verhoeff (2003) en Knippels (2002). Het lijkt dan ook een leemte te vullen in de Utrechtse traditie van het systeemdenken en samenhang.

Er zijn echter ook verbeterpunten. Zo is het proefschrift eigenlijk maar voor een klein deel empirisch en heeft het veel aandacht voor het verbinden van theorieën vanuit andere hoeken als wetenschapsfilosofie, psychologie en evolutionair denken. Dit correspondeert met bredere ontwikkelingen in de wetenschap, waarin blijkt dat, met de toegenomen interesse in de complexiteit van wetenschappelijke processen, veel verschillende velden van wetenschapsbeoefening met elkaar verbonden worden. De basisvraag van de wetenschap is die naar het 'waarom', en die waarom-vraag kan voor een complex proces verschillende vormen hebben. Zo beschrijft Riedl (1997) op basis van werk van de filosoof Aristoteles vier vormen van deze waarom-vraag, waarvan de vraag naar betekenis of doel (*causa finalis*) eigenlijk een tijd lang geen rol leek te spelen in wetenschappelijke verklaringen. Veel eerder werden waarom-vragen gesteld die hun focus hadden op onderliggende materie of vormende principes. In dit proefschrift vindt deze vraag naar betekenis of doel wel een duidelijke plaats (deze wordt in stelling zeven ook wel de waartoe-vraag genoemd) en wordt concreet vanuit de top-down benadering verwerkt in het lesmateriaal. Veel aandacht gaat echter uit naar verklaringen van het 'waarom' die volgen vanuit interacties binnen het organisatieniveau van moleculen en hoe deze tot gebeurtenissen in de bovenliggende organisatieniveaus leiden. Mijn vraag is of het niet meer had geloond om nog meer te werken vanuit de vraag naar het 'waartoe'. Om een antwoord te vinden op deze vraag zal ik in de volgende alinea allereerst op een iets hoger abstractieniveau naar het 'waarom' van dit proefschrift kijken.

In dit proefschrift wordt allereerst het 'waarom' geschetst vanuit een aanleiding: de constatering dat leerlingen weinig samenhang zien tussen zowel de biologische concepten als de organisatieniveaus in de biologie. Verdere opbouw van het proefschrift vindt echter met name plaats vanuit vormende principes en de 'waartoe'-gedachte. Dit 'waartoe' lijkt te bestaan uit twee elementen: een leemte opvullen in de vakdidactische literatuur over samenhang en interactie tussen onderdelen, alsook docenten in het voortgezet onderwijs helpen om leerlingen deze vormen van samenhang meer te laten zien. Nu lijkt mij het eerste doel wel behaald, gezien de sterke lijn van redeneren en het innovatieve plaatsen van het mechanistisch redeneren in de vakdidactische literatuur. Voor het tweede doel ligt dit volgens mij iets anders. Er wordt namelijk geconstateerd dat 'docenten' en 'leerlingen' momenteel biologische plaatjes veelal foutief lezen en interpreteren. Blijk-

baar hebben ook docenten met een wetenschappelijke opleiding een leemte in hun kennis en/of kunde waardoor ze deze fouten maken. Ook de in het onderzoek deelnemende leerlingen (twaalf gemotiveerde, kundige en vrijwillige vwo-leerlingen van voorloperscholen in de regio van de Universiteit Utrecht) geven aan dat ze de (scheikundige en natuurkundige) kennis missen om het voorgestelde mechanistisch redeneren op een juiste wijze uit te voeren. Hiermee wordt er een probleem geduid voor het aanleren van deze strategie en de implementatie ervan in het schoolvak biologie. Wanneer deze selectieve steekproef leerlingen aangeeft de kennis te missen voor het opdoen van de kunde en docenten beschikbaar ook tekortschietende kennis en kunde hebben, is het de vraag of met scholing een goede borging en implementatie bereikt kan worden, als het al opgenomen kan worden in het curriculum.

Terug naar de vraag of het niet meer had geloond nog meer te werken vanuit de vraag naar het 'waartoe'. Wanneer namelijk de kennis en/of kunde tekortschiet, dan zal het simpelweg aanbieden ervan weinig effect sorteren en resulteren in het simpelweg stampen van feiten, wat veelal wordt gezien als *rote learning* (Mayer, 2002). Wanneer leerlingen meer vanuit een betekenisvolle taak of systeem zouden terugredeneren naar wat dan de vorm en functie van onderdelen zou moeten zijn, dan wordt er meer voorkennis van de leerlingen gevraagd, waarmee ook gelijk mogelijke misconcepten worden aangepakt. Tegelijk ligt dit ook heel dicht aan tegen het hypothetiseren, wat een belangrijke activiteit van expert-wetenschappers is wanneer ze mechanistische verklaringen geven. Ook ligt dit heel dicht aan tegen het door Janssen (1999) voorgestelde en onderzochte *ontwerpend leren*. In deze benadering krijgen leerlingen optimale ontwerpen aangeboden, bijvoorbeeld van een orchidee of de werking van het immuunsysteem, waarna ze terugredeneren naar de onderdelen en dan vanuit de benodigde functies naar de vorm van de onderdelen. Van Mil schrijft hierover dat hij Janssen (1999) aanvult door middel van het aanbieden van moleculaire en fysische kennis, zodat er niet alleen gestart hoeft te worden vanuit het optimale ontwerp en de functie, maar ook vanuit onderliggende organisatieniveaus omhoog (p. 57). De vraag is echter of het vanuit dit proefschrift nu duidelijk wordt of het starten met het aanbieden van kennis – zoals in dit onderzoek moleculaire en fysische kennis – zonder leervraag of betekenis zal leiden tot rijke leerervaringen of het kopelen aan voorkennis.

Het voorgaande lijkt met name te gaan over de gebruikersvaliditeit en de uitwerking in de klassenpraktijk. Wanneer het gaat over de interne validiteit, dan beoogde Van Mil met dit proefschrift een 'proof-of-principle' te leveren. Hoewel de sterke redeneerketen die leidt tot het opzetten van moleculair mechanistisch redeneren veel goedmaakt, wil ik hierbij toch de volgende kanttekeningen zetten: 1) de analyse van de stappen die leerlingen al dan niet uitvoeren zou kunnen worden verbeterd, bijvoorbeeld met behulp van hardopdenksessies van een aantal leerlingen of een inhoudsanalyse van leerlingenwerk, 2) het onderzoek zou uitgebreid kunnen worden naar veel meer leerniveaus en leerjaren om iets te kunnen zeggen over de generaliseerbaarheid van deze techniek, en 3) het onderzoek

zou ook uitgevoerd kunnen worden bij de organisatieniveaus van orgaanstelsel of ecosysteem, in plaats van het hier onderzochte molecuul- en celniveau.

Ten slotte nog een opmerking over de eindtermen van biologie, waarin het vorm-functiedenken opgenomen is in de syllabus onder het kopje biologische vakvaardigheden. Wanneer het mechanistisch redeneren daadwerkelijk zal leiden tot een toename in samenhang tussen biologische concepten en organisatieniveaus in de biologie, dan zal er meer nadruk moeten komen te liggen op dit onderwerp in de syllabus en zal er ook meer aandacht voor moeten zijn in onderwerpen als bijvoorbeeld cellen. Het bewegen van docenten in het veld (*activities that lead to colliding*), aangevuld met spontane interacties (*binding*) met docent-onderzoekers, zal op deze wijze mooi kunnen leiden tot een verandering van vorm van curriculum (*changing shape*) en tot een vruchtbare uitwerking in de klassenpraktijk.

Literatuur

- Janssen, F. (1999). *Ontwerpend leren in het biologieonderwijs. Beproefd en uitgewerkt voor immunologie*. Utrecht: CD-β Press.
- Knippels, M.C.P.J. (2002). *Coping with the Abstract and Complex Nature of Genetics in Biology Education*. Utrecht: CD-β Press.
- Mayer, R.E. (2002). Rote versus meaningful learning. *Theory into Practice*, 41(4), 226-232.
- Riedl, R. (1997). From four forces back to four causes. *Evolution and Cognition*, 3(2), 148-158.
- Verhoeff, R.P. (2003). *Towards Systems Thinking in Cell Biology Education*. Utrecht: CD-β Press.
- Wimsatt, W.C. (2000). Emergence as non-aggregativity and the biases of reductionism. *Foundations of Science*, 5(3), 269-297.