

F. J. J. M. Janssen

Ontwerpend leren in het biologieonderwijs

Uitgewerkt en beproefd
voor immunologie in het voortgezet onderwijs



Ontwerpend Leren in het Biologieonderwijs



**Uitgewerkt en beproefd
voor immunologie in het voortgezet onderwijs**

CD-B WETENSCHAPPELIJKE BIBLIOTHEEK

Onder redactie van:

P.L. Lijnse
A. Treffers
W. de Vos
A.J. Waarlo

- 1 Didactiek in Perspectief - P.L. Lijnse, W. de Vos, eds.
- 2 Radiation and Risk in Physics Education - H.M.C. Eijkelhof
- 3 Natuurkunde-onderwijs tussen Leefwereld en Vakstructuur - R.F.A. Wierstra
- 4 Een Onverdeelbare Eenheid - M.J. Voegelzang
- 5 Betrokken bij Evenwicht - J.H. van Driel
- 6 Relating Macroscopic Phenomena to Microscopic particles: A Central Problem in Secondary Science Education - P.L. Lijnse, P. Licht, W. de Vos, A.J. Waarlo, eds.
- 7 Kwaliteit van Kwantiteit - H.E. Elzenga
- 8 Interactieve Video in de Nascholing Reken-wiskunde - F. van Galen, M. Dolk, E. Feijs, V. Jonker, N. Ruesink, W. Uittenbogaard
- 9 Realistic Mathematics Education in Primary Schools - L. Streefland, ed.
- 10 Ontwikkeling in Energieonderwijs - A.E. van der Valk
- 11 Methoden in het Reken-wiskundeonderwijs - K. Gravemeijer, M. van den Heuvel-Panhuizen, G. van Donselaar, N. Reusink, L. Streefland, W. Vermeulen, E. te Woerd, D. van de Ploeg
- 12 De Volgende Opgave van de Computer - J. Zuidema en L. van der Gaag
- 13 European Research in Science Education - P.L. Lijnse, ed.
- 14 Realistic Mathematics Education - K. Gravemeijer
- 15 De Grafische Rekenmachine in het Wiskundeonderwijs - L.M. Doorman, P. Drijvers, M. Kindt
- 16 Making sense - Simulation-of-Research in Organic Chemistry Education - H. van Keulen
- 17 Perspectives on Research in Chemical Education - O. de Jong, P.H. van Roon, W. de Vos, eds.
- 18 A Problem-Posing Approach to Teaching the Topic of Radioactivity - C.W.J.M. Klaassen
- 19 Assessment and Realistic Mathematics Education - M. van den Heuvel-Panhuizen
- 20 Teaching structures in chemistry - An Educational Structure for Chemical Bonding - G.M. van Hoeve-Brouwer
- 21 Regulatie en homeostase als onderwijsthema: een biologie-didactisch onderzoek - J. Buddingh'
- 22 Over Natuurkundedidactiek, Curriculumontwikkeling en Lerarenopleiding - P.L. Lijnse en T. Wubbels
- 23 Integratie en Toepassing van Biologische Kennis - Ontwikkeling en Onderzoek van een Curriculum rond het thema 'Lichaamsprocessen en Vergift' - H. Roebertsen
- 24 Het thema 'reproductie' in het schoolvak biologie - P.C.F. Reygel
- 25 Teaching Electrochemical Cells - A study on Teachers Conceptions and Teaching Problems in Secondary Education - J.J.C. Acampo
- 26 The role of Context and Models in the Development of Mathematical Strategies and Procedures - K. Gravemeijer
- 27 Thermodynamica leren onderwijzen - W.H. Kaper
- 28 Interessegeoriënteerd Natuur- en Scheikundeonderwijs - Een studie naar onderwijsontwikkeling op de Open Schoolgemeenschap Bijlmer - R. Genseberger
- 29 Flexibilization of mental arithmeticsstrategies on a different knowledge base - The empty number line in a realistic versus gradual program design - A.S. Klein
- 30 A Problem Posing Approach to Teaching an Initial Particle Model - M.J. Vollebregt
- 31 Met het oog op integratie - Een studie over integratie van leerstof uit de natuurwetenschappelijke vakken in de tweede fase van het voortgezet onderwijs - C. Beeftink
- 32 Verschillen tussen meisjes en jongens bij het vak rekenen-wiskunde op de basisschool - Eindrapport MOOJ-onderzoek - M. van den Heuvel-Panhuizen en H.J. Vermeer
- 33 Van vormleer naar realistische meetkunde - Een historisch-didactisch onderzoek van het meetkundeonderwijs aan kinderen van vier tot veertien jaar in Nederland gedurende de negentiende en twintigste eeuw - E.W.A. de Moor
- 34 Ontwerpend leren in het biologieonderwijs - Uitgewerkt en beproefd voor immunologie in het voortgezet onderwijs - F.J.J.M. Janssen

Ontwerpend Leren in het Biologieonderwijs

**Uitgewerkt en beproefd
voor immunologie in het voortgezet onderwijs**



Learning Biology by Designing

**Exemplified and tested for the topic
of immunology in secondary education**

(with a summary in English)

Proefschrift

**ter verkrijging van de graad van doctor
aan de Universiteit Utrecht
op gezag van de Rector Magnificus, Prof. dr. H.O. Voorma,
ingevolge het besluit van het College voor Promoties
in het openbaar te verdedigen
op maandag 22 november 1999 des middags te 12.45 uur**

door

**Ferdinandus Johannes Joseph Marie Janssen
geboren op 19 september 1967, te Tegelen**

Promotor: Prof. Dr. P.A. Voogt
Co-promotor: Dr. A.J. Waarlo

Faculteit Biologie
Universiteit Utrecht

Janssen, Ferdinandus Johannes Joseph Marie

**Ontwerpend leren in het biologieonderwijs - Uitgewerkt en beproefd voor immunologie
in het voortgezet onderwijs / F.J.J.M. Janssen - Utrecht: CD-β Press, Centrum voor Didactiek van
Wiskunde en Natuurwetenschappen, Universiteit Utrecht (CD-β Wetenschappelijke Bibliotheek, nr. 34).
Proefschrift Universiteit Utrecht.- Met lit. opg. - Met samenvatting in het Engels.**

ISBN: 90-73346-41-X

Trefw.: biologieonderwijs /ontwerpen / immunologie / zelfstandig leren

Omslag en vormgeving: Nanja Toebak, afd. Beeldverwerking & Vormgeving, Universiteit Utrecht
Copyright: Fred Janssen, Utrecht 1999

CD-β Press, Utrecht

*To be educated is not to have arrived at a destination;
it is to travel with a different view.*

R.S. Peters (1964, p. 110)

Inhoudsopgave

1	Inleiding	9
2	Biologie leren en onderwijzen	13
2.1	Een visie op leren en onderwijzen	13
2.1.1	Constructivisme	14
2.1.2	Positiebepaling binnen het constructivisme	17
2.1.3	Probleemstellend onderwijs	22
2.1.4	Meester-gezel model	23
2.1.5	Typering van de gewenste methode voor kennisontwikkeling	24
2.1.6	Analyse van bestaande methoden voor kennisontwikkeling in het biologieonderwijs	26
2.2	Een visie op organismen	29
2.2.1	Mechanicisme, vitalisme en organicisme	30
2.2.2	Het idee van een organisme als optimaal ontwerp in een historische context	32
2.2.3	Ontwerpen in biologisch onderzoek	35
2.2.4	Kritiek op ontwerpen in biologisch onderzoek	38
2.3	Ontwerpend leren	41
2.3.1	Een ontwerpheuristiek voor leerlingen	41
2.3.2	Doelstellingen van ontwerpend leren	44
2.3.3	Inrichting en uitvoering van ontwerpend leren	46
2.3.4	Ontwikkeling van scenario's	51
3	Scenario van 'Het immuunsysteem in zes stappen'	53
3.1	Overzicht van de zes stappen	53
3.2	Stap 1	60
3.3	Stap 2	64
3.4	Stap 3	70
3.5	Stap 4	78
3.6	Stap 5	93

3.7	Stap 6	102
3.8	Leren werken met de ontwerpheuristiek	115
4	Resultaten van 'Het immuunsysteem in zes stappen'	121
4.1	Beschrijving en verantwoording van het onderzoek	121
4.2	Stap 1	128
4.3	Stap 2	131
4.4	Stap 3	138
4.5	Stap 4	144
4.6	Stap 5	154
4.7	Stap 6	160
4.8	Leren werken met de ontwerpheuristiek	168
4.9	Leerlingen over ontwerpend leren	181
4.10	Samenvatting	185
5	Ontwerpend leren	191
5.1	Een ontwerpheuristiek voor leerlingen	191
5.2	Doelstellingen van ontwerpend leren	194
5.3	Inrichting en uitvoering van ontwerpend leren	196
5.4	Ontwikkeling van scenario's	207
5.5	Conclusie	211
6	Slotbeschouwing	213
6.1	Scenario voor het immunologieonderwijs	213
6.2	De domeinspecifieke onderwijsbenadering ontwerpend leren	215
6.3	Opbrengst van het onderzoek	223
	Literatuurlijst	227
	Samenvatting	233
	Summary	239
	Dankwoord	245
	Curriculum Vitae	247

1

Inleiding

In 1993 is het onderwerp immunologie opgenomen in het examenprogramma biologie voor het VWO. Uit een enquêteonderzoek¹ bleek dat veel docenten behoefte hadden aan beproefd lesmateriaal over dit onderwerp. Dit was de directe aanleiding voor de vakgroep Didactiek van de Biologie om een promotieonderzoek op dit onderwerp te richten. Het immuunsysteem zorgt er voor dat binnengedrongen ziekteverwekkers, zoals bacteriën en virussen, onschadelijk worden gemaakt. Het is een complex biologisch systeem bestaande uit vele interagerende subsystemen op verschillende organisatieniveaus. Leerlingen moeten bijvoorbeeld weten hoe een ziekteverwekker kan worden herkend (moleculair niveau), hoe de verschillende celtypen samenwerken bij het onschadelijk maken van een ziekteverwekker (cellulair niveau), in welke organen deze cellen zich ontwikkelen (orgaanniveau) en op welke plekken deze cellen zich in het lichaam bevinden bij het uitvoeren van hun functies (organismaal niveau). Het is daarom niet vreemd dat veel docenten het moeilijk vinden om immunologie te onderwijzen.

Eén van de doelen van dit onderzoek is het ontwikkelen van immunologieonderwijs voor leerlingen van 5 en 6 VWO. Voor dit onderwijs formuleerde ik aanvankelijk de volgende globale doelstelling: leerlingen hebben inzicht in de functie en werking van het immuunsysteem. Dit betekent dat leerlingen niet alleen de diverse subsystemen en hun functies moeten kennen, maar ook hun onderlinge interacties op de verschillende organisatieniveaus. Bij nader inzien vond ik deze doelstelling toch ontoereikend. Leerlingen zouden ook moeten kunnen aangeven waarom de verworven kennis adequaat is. Kennis is immers geen absolute waarheid maar is altijd feilbaar. Ze moet daarom ook niet als een dogma worden overgedragen, maar met verantwoording van redenen (Schwab, 1962). Bovendien zouden leerlingen een methode moeten leren waar-

¹ Uitgevoerd door de vakgroep Didactiek van de Biologie (n=170).

mee ze zelfstandig kennis kunnen ontwikkelen over biologische systemen: een methode die ze stuurt bij het formuleren van problemen over biologische systemen, bij het zoeken naar voorlopige oplossingen en bij het toetsen hiervan. Met andere woorden, leerlingen zouden ook biologisch moeten leren denken (vgl. Schwab, 1962). Deze doelstelling sluit goed aan bij de vernieuwde tweede fase van het biologieonderwijs, waarin leerlingen worden voorbereid op het zelfstandig verwerven van kennis (Timmermans, 1996).

In veel biologieonderwijs worden bovengenoemde doelstellingen niet of onvoldoende gerealiseerd. Veelal wordt kennis over biologische systemen kant-en-klaar aangeboden door een schoolboek of een docent, waarna toepassingsvragen volgen (Anderson & Roth, 1989; Kuiper, 1993). Leerlingen krijgen dus alleen de eindresultaten van wetenschappelijk onderzoek aangeboden. Schwab (1962) heeft dit type onderwijs gekarakteriseerd als een 'rethoric of conclusions'. Leerlingen leren zo niet hun kennis te verantwoorden en leren evenmin hoe ze zelf kennis over biologische systemen kunnen ontwikkelen. Onderzoek laat bovendien zien dat dergelijk onderwijs vaak leidt tot misconcepten en gefragmenteerde kennis (Wandersee et al., 1994). Een verklaring die men hiervoor geeft, is dat leerlingen veelal onvoldoende worden gestimuleerd hun voorkennis bij te stellen of uit te breiden (zie hoofdstuk 2).

Wellicht zouden de eerder genoemde doelstellingen kunnen worden gerealiseerd door in het onderwijs niet met kennis, maar met problemen te beginnen. Vervolgens zouden leerlingen zelf een bijdrage kunnen leveren aan de ontwikkeling van kennis als oplossing voor dit probleem. Dit idee is niet nieuw, het ligt ten grondslag aan vele onderwijsvernieuwingen (DeBoer, 1991; Tamir, 1996). In de jaren zestig heeft men getracht dit idee op grote schaal uit te werken. De resultaten bleken echter tegen te vallen omdat er onvoldoende rekening werd gehouden met de voorkennis van de leerlingen (Tamir, 1996).

Vanaf het eind van de jaren zeventig is met de komst van het constructivisme hiervoor meer aandacht gekomen. Constructivisten gaan er vanuit dat het onderwijs zo moeten worden ingericht dat leerlingen in staat worden gesteld hun voorkennis in de gewenste richting uit te breiden of bij te stellen (Duit, 1994). Binnen deze traditie zijn waardevolle richtlijnen ontwikkeld voor de inrichting van onderwijs waarin leerlingen zelf een bijdrage leveren aan hun kennisontwikkeling. In hoofdstuk 2 zullen deze worden besproken. Deze richtlijnen zijn vakoverstijgend geformuleerd. Dit heeft als voordeel dat ze breed toepasbaar zijn. Een nadeel is echter dat ze onvoldoende concrete handvatten bieden voor de inrichting van het biologieonderwijs in het algemeen en voor het immunologieonderwijs in het bijzonder.

Deze vaststelling leidde er toe dat een tweede, aan het eerste gelijkwaardige, doel voor dit onderzoek is geformuleerd. Voordat begonnen wordt met het ontwikkelen van een lessenserie over het immuunsysteem, zal eerst een onder-

wijsbenadering moeten worden ontwikkeld die hiervoor concrete richtlijnen verschaft. Idealiter zouden de richtlijnen zo moeten worden geformuleerd dat ze ook geldend zijn voor andere onderwerpen uit het biologieonderwijs waarin men leerlingen zelf een bijdrage wil laten leveren aan hun kennisontwikkeling. Nu wordt er in het biologieonderwijs een grote verscheidenheid aan onderwerpen behandeld. Een onderwijsbenadering die richtlijnen voor al deze onderwerpen bevat, zou weer onvoldoende richtinggevend zijn. Ik wil daarom een onderwijsbenadering ontwikkelen die betrekking heeft op een specifiek domein van de biologie, i.c. de functie en werking van biologische systemen van moleculair tot en met organismaal niveau. Hiertoe behoort ongeveer tachtig procent van de onderwerpen die in het biologieonderwijs worden behandeld (Timmermans, 1996).

Het doel van dit onderzoek is dus tweeledig: het ontwikkelen van een domeinspecifieke onderwijsbenadering en van een lessenserie over immunologie. Voor dit onderzoek zijn dan ook de volgende twee hoofdvragen geformuleerd:

• *Welke domeinspecifieke onderwijsbenadering verschaft concrete richtlijnen voor de inrichting van het biologieonderwijs waarin leerlingen zelf een bijdrage leveren aan hun kennisontwikkeling?*

• *Hoe, en met welk resultaat verloopt het onderwijsleerproces, wanneer het immunologieonderwijs volgens deze domeinspecifieke onderwijsbenadering wordt ingericht?*

Middels ontwikkelingsonderzoek tracht ik beide vragen te beantwoorden (Gravemeijer, 1994; Lijnse, 1995). In dit onderzoek kunnen twee fasen worden onderscheiden. Eerst wordt op grond van literatuuronderzoek de domeinspecifieke onderwijsbenadering zo ver mogelijk uitgewerkt. Ideeën hiervoor ontleen ik aan vakoverstijgende onderwijsbenaderingen die binnen de constructivistische traditie zijn ontwikkeld. Het ontbreekt echter in deze traditie, onder meer, aan methoden voor de ontwikkeling van kennis over biologische systemen. Hiervoor ga ik te rade bij een eeuwenoude traditie in de biologie, waarin organismen als optimale ontwerpen worden beschouwd. Kennis over optimale ontwerpen kan worden verkregen door ze 'opnieuw' te ontwerpen. Integratie en bewerking van globale richtlijnen uit de constructivistische traditie en uit de biologie leiden tot een eerste formulering van de domeinspecifieke onderwijsbenadering. Deze noem ik ontwerpend leren omdat leerlingen kennis ontwikkelen over een biologisch systeem door het 'opnieuw' te ontwerpen.

In de tweede fase van het onderzoek geeft ontwerpend leren richting aan de ontwikkeling van een scenario voor het immunologieonderwijs. In dit scenario worden het beoogde onderwijsleerproces en de beoogde leerresultaten gedetailleerd beschreven en verantwoord. Vervolgens wordt het onderwijs uit-

gevoerd en geëvalueerd. Deze evaluatie leidt tot bijstelling van het scenario. Ontwikkeling, uitvoering en evaluatie van het scenario leidt tevens tot beproeving en nadere uitwerking van ontwerpend leren. De domeinspecifieke onderwijsbenadering en het scenario worden dus in een cyclisch proces van doordenken en beproeven in relatie tot elkaar ontwikkeld. In dit onderzoek wordt deze cyclus twee keer doorlopen. Omdat de domeinspecifieke onderwijsbenadering in dit onderzoek alleen voor immunologie wordt uitgewerkt en beproefd, behoudt deze voor andere onderwerpen uit het domein nog het karakter van een hypothese.

De opbouw van dit proefschrift is als volgt. In hoofdstuk 2 wordt de constructivistische traditie en het idee van organismen als optimale ontwerpen verkend, dit resulteert in een eerste formulering van de onderwijsbenadering ontwerpend leren. Het scenario voor het immunologieonderwijs wordt in hoofdstuk 3 gepresenteerd. In hoofdstuk 4 wordt nagegaan of het beoogde onderwijsleerproces en de beoogde leerresultaten zijn gerealiseerd. In hoofdstuk 5 wordt beschreven welke bijdrage de ontwikkeling, uitvoering en evaluatie van het scenario heeft geleverd aan de verdere uitwerking van ontwerpend leren. In hoofdstuk 6 worden de belangrijkste conclusies van dit onderzoek samengevat en bediscussieerd en worden enkele aanbevelingen voor vervolgonderzoek geformuleerd.

2

Biologie leren en onderwijzen

In dit hoofdstuk worden richtlijnen geformuleerd voor de inrichting van biologieonderwijs waarin leerlingen zelf een bijdrage leveren aan hun kennisontwikkeling. Hiervoor wordt eerst een constructivistische visie op leren en onderwijzen verkend (2.1). Binnen deze traditie zijn waardevolle vakoverstijgende richtlijnen ontwikkeld. Het ontbreekt echter, onder meer, aan een methode die leerlingen voldoende sturing geeft bij het ontwikkelen van kennis over biologische systemen. Richtlijnen hiervoor ontleen ik aan een traditie in de biologie waarin organismen worden beschouwd als optimale ontwerpen (2.2). Integratie en bewerking van de ideeën ontleend aan beide tradities resulteert in een beschrijving van de domeinspecifieke onderwijsbenadering ontwerpended leren (2.3).

2.1 Een visie op leren en onderwijzen

In 2.1.1 wordt een constructivistische visie op leren en onderwijzen getypeerd en geplaatst ten opzichte van het traditionele overdrachtsonderwijs en het zelfontdekkend leren uit de jaren zestig. Een constructivistische visie op leren en onderwijzen kan op vele manieren worden uitgewerkt. Er bestaan dan ook vele constructivistische onderwijsbenaderingen. In 2.1.2. bepaal ik eerst mijn positie met betrekking tot een drietal dimensies waarin constructivistische onderwijsbenaderingen van elkaar kunnen verschillen. Op grond van deze positiebepaling worden twee onderwijsbenaderingen geselecteerd die richting kunnen verschaffen aan de inrichting van biologieonderwijs: probleemstellend onderwijs (2.1.3) en het meester-gezel model (2.1.4). Tevens wordt nader gespecificeerd aan welke eisen de methode voor kennisontwikkeling moet voldoen (2.1.5). Een analyse van bestaande methoden voor kennisontwikkeling laat zien dat de gewenste methode (nog) ontbreekt (2.1.6).

2.1.1 Constructivisme

Constructivisten gaan er vanuit dat leren kan worden beschouwd als het actief construeren van kennis op grond van wat men al weet (Duit, 1994). Onderwijs dient dan ook zo te worden ingericht dat leerlingen worden gestimuleerd hun voorkennis uit te breiden of bij te stellen in de gewenste richting. Karakteristieken van het constructivisme treffen we al aan bij de filosoof Socrates (Nola, 1997). Socrates onderwees zijn leerlingen door systematisch vragen te stellen. Hij trachtte op deze wijze een proces van reflectie op gang te brengen en zo leerlingen te helpen hun al aanwezige, maar fragmentarische kennis, te ordenen en zo tot inzicht te komen. Solomon (1994) laat in haar overzicht het huidige constructivisme beginnen in de tweede helft van de jaren zeventig met een artikel van Driver en Easley (1978). Sindsdien is het constructivisme uitgegroeid tot het dominante paradigma binnen de onderwijskunde en de vakdidactiek.

Het constructivisme kan worden beschouwd als een reactie op het traditionele overdrachtsonderwijs enerzijds en inductieve varianten van zelfontdekkend leren uit de jaren zestig anderzijds (Millar & Driver, 1987; Matthews, 1994). De kritiek van constructivisten op beide vormen van onderwijs wordt hieronder kort besproken. In het traditionele overdrachtsonderwijs wordt de leerling veelal beschouwd als passieve ontvanger van kennis. De docent gaat er vanuit dat de leerling kennis overneemt zoals deze wordt aangeboden. Als er al rekening wordt gehouden met voorkennis van de leerlingen, dan bedoelt men hiermee veelal de kennis die leerlingen eerder op school is aangeboden. Onderzoek toont aan dat de resultaten van een dergelijke vorm van onderwijs vaak tegenvallen (Eylon & Linn, 1988; Wandersee et al., 1994). Leerlingen blijken na afloop van de lessen vaak over kennis te beschikken die afwijkt van de wetenschappelijk geaccepteerde kennis ('misconcepten'). Zo blijken bijvoorbeeld veel leerlingen na afloop van evolutie-onderwijs nog steeds Lamarckiaanse denkbepelden te hanteren (Janssen & Voogt, 1997). Zij zijn van mening dat eigenschappen die tijdens het leven zijn verworven kunnen worden doorgegeven aan de nakomelingen. In het onderstaande fragment wordt dit geïllustreerd. Het betreft hier een eerstejaarsstudent medische biologie aan een Amerikaanse universiteit.

Question: If this fairskinned girl grew up in Africa what would you predict would happen to the color of her skin?

Student: She'd get sunburnt, then tanned.

Question: If she then married someone of her own race and they lived in Africa and had children born in Africa, what would you predict their children's skin would be like at birth?

Student: The kids could be slightly darker at birth.

(Brumby, 1984, p. 493).

Constructivisten verklaren het voorkomen van misconcepten als volgt. Leerlingen hebben vaak al ideeën gevormd over een onderwerp voordat ze hier onderwijs over hebben gehad. Voor biologie zijn onder meer leerlingdenkbeelden over fotosynthese, evolutie, genetica, kringlopen en bloedsomloop in kaart gebracht (Mintzes et al., 1991; Wandersee et al., 1994). Deze denkbeelden wijken soms af van de wetenschappelijk geaccepteerde kennis. De aangeboden kennis wordt door de leerlingen geïnterpreteerd in het licht van deze bestaande preconcepten. Daarbij kan het voorkomen dat de voorkennis niet of slechts gedeeltelijk wordt bijgesteld.

Traditioneel overdrachtsonderwijs kan ook leiden tot fragmentarische kennis (Eylon & Linn, 1988; Anderson & Roth, 1989; Roebertsen, 1996; Nunez & Banet, 1997). Het onderzoek van Roebertsen toont bijvoorbeeld aan dat leerlingen van 4 VWO de reeds verworven kennis over lichaamsprocessen (opname, transport, afbraak, opslag en uitscheiding van stoffen) en de daarbij betrokken organen nauwelijks hebben geïntegreerd. Dit komt deels doordat deze kennis ook in het onderwijs gefragmenteerd wordt aangeboden. Daarnaast blijken leerlingen zelf ook vaak weinig relaties te leggen tussen de aangeboden kennis en de reeds aanwezige voorkennis. Traditioneel overdrachtsonderwijs kan dus leiden tot misconcepten en fragmentarische kennis doordat leerlingen onvoldoende worden gestimuleerd hun voorkennis uit te breiden of bij te stellen.

Het constructivisme kan ook worden beschouwd als een reactie op bepaalde vormen van zelfontdekkend leren in de jaren zestig. In die periode zijn in Amerika grote curriculumprojecten van start gegaan waarin zelfontdekkend leren een belangrijke plaats innam (Bruner, 1960; DeBoer, 1991). De curriculum golf kwam goed op gang na de lancering van de Spoetnik door de Russen. Amerikanen dreigden hun vooraanstaande plaats op wetenschappelijk-technologisch gebied te verliezen en hadden daarom enerzijds behoefte aan natuurwetenschappers en anderzijds aan burgers die de wetenschap een warm hart toedroegen. Men vond dat het toenmalige onderwijs hieraan onvoldoende bijdroeg. Leerlingen werden veelal alleen geconfronteerd met de eindresultaten van wetenschappelijk onderzoek. Ze leerden niet hoe kennis werd ontwikkeld en waarom deze adequaat was. Zelfontdekkend leren werd beschouwd als een mogelijke oplossing voor deze problemen. Wanneer leerlingen zelf een bijdrage leveren aan het opstellen en toetsen van hypothesen, leren ze waarom kennis adequaat is en leren ze tevens hoe kennis kan worden ontwikkeld. Bovendien verwachtte men dat hierdoor de intrinsieke motivatie van leerlingen zou toenemen. De ontdekking zelf vormt immers de beloning van de denkactiviteit (Bruner, 1960).

De resultaten van zelfontdekkend leren vielen echter tegen. Leerlingen bleken veelal niet de gewenste theorieën te ontdekken en waren minder gemotiveerd dan verwacht (Ausubel, 1968; Hodson, 1993; Matthews, 1994; Tamir,

1996). De tegenvallende resultaten werden aan verschillende factoren toegeschreven: leraren waren onvoldoende op deze manier van lesgeven voorbereid, de tijd ontbrak en de benodigde hulpmiddelen waren niet altijd voorhanden. Bovengenoemde auteurs hebben bovendien gewezen op een fundamentele misvatting over kennisontwikkeling die aan veel projecten ten grondslag lag. Men ging er vanuit dat leerlingen wanneer ze de kans zouden krijgen onbevooroordeeld waarnemingen te verrichten, hier vervolgens theorieën uit zouden kunnen afleiden. Deze inductieve methode was al eerder door wetenschapsfilosofen bekritiseerd. Zij hebben er onder meer op gewezen dat onbevooroordeeld waarnemen niet mogelijk is. Waarnemingen worden altijd gekleurd door ons verwachtingspatroon (onze voorkennis). Volgens Popper (1972) stellen inductivisten de menselijke geest ten onrechte voor als een emmer die door het openen van de zintuigen volloopt met feiten. Popper daarentegen is van mening dat de menselijke geest beter als een zoeklicht kan worden beschouwd. Onze voorkennis functioneert als een zoeklicht dat zijn licht uitstraalt over de omgeving. In dat licht nemen we de werkelijkheid waar. Wanneer onze voorkennis verandert, nemen we andere dingen waar.

Bij inductieve varianten van zelfontdekkend leren wordt er weinig of geen rekening mee gehouden dat leerlingen over andere voorkennis beschikken dan de docent. Leerlingen weten daardoor ook vaak niet waar ze naar moeten kijken, of kijken naar andere dingen dan de docent. Bovendien kunnen de waarnemingen anders worden geïnterpreteerd. Het is daarom ook niet vreemd dat leerlingen niet in staat bleken de beoogde kennis te ontwikkelen. Tenslotte krijgen leerlingen bij inductieve varianten van zelfontdekkend leren een verkeerd beeld van de wetenschappelijke methode.

Constructivisten wijzen dus op een gemeenschappelijke oorzaak voor de tegenvallende resultaten van traditioneel overdrachtsonderwijs en inductieve varianten van zelfontdekkend leren. In beide gevallen wordt de leerling beschouwd als een passieve ontvanger van informatie. In het ene geval van aangeboden kennis, in het andere geval van opgedane ervaringen. In beide gevallen wordt onvoldoende rekening gehouden met het gegeven dat de voorkennis van de leerling bepaalt welke informatie wordt geselecteerd en hoe deze wordt geïnterpreteerd. Constructivisten zijn daarom van mening dat het onderwijs zo moet worden ingericht dat leerlingen worden gestimuleerd hun voorkennis in de gewenste richting uit te breiden of bij te stellen. Dit uitgangspunt kan echter op vele manieren worden uitgewerkt en met vele andere ideeën worden verbonden (zie voor overzichten van verschillende benaderingen in het constructivisme o.a. Guzetti et al., 1993; Duit, 1994; Matthews, 1994; Phillips, 1995). Om concrete richtlijnen te verkrijgen voor de inrichting van het biologieonderwijs zullen dus nadere keuzen moeten worden gemaakt.

2.1.2 Positiebepaling binnen het constructivisme

Ik zal mijn positie nader bepalen met betrekking tot een drietal dimensies waarin constructivistische onderwijsbenaderingen van elkaar kunnen verschillen. De eerste dimensie betreft de status die men aan wetenschappelijke kennis toekent (fallibilisme of relativisme). De tweede dimensie betreft de mate waarin leerlingen zelf een bijdrage moeten leveren aan de ontwikkeling van kennis (overnemen of overlaten). De derde dimensie betreft de rol die de sociale omgeving speelt bij ontwikkeling van kennis (individueel of sociaal). Deze positiebepaling leidt tot een nadere karakterisering van het gewenste onderwijs.

Fallibilisme of relativisme?

Het constructivisme is in de eerste plaats een visie op leren en onderwijzen. In principe volgen hieruit geen uitspraken over de status van kennis (Ernest, 1993). Constructivisten onderschrijven echter in het algemeen de kritiek van wetenschapsfilosofen op de inductieve methode. Deze afwijzing van de inductieve methode heeft echter ook consequenties voor de status die men aan kennis toekent. Dit is als volgt in te zien. De inductieve methode was het antwoord van Francis Bacon op de vraag hoe we ware kennis over de wereld kunnen verwerven (Popper, 1972). Volgens Bacon kunnen we die verkrijgen door onze theorieën te bouwen op een onfeilbare basis van waarnemingen. Wanneer echter waarnemingen altijd door verwachtingen worden gekleurd dan kunnen we niet met een onfeilbare basis beginnen. Maar dit betekent ook dat we bij het toetsen van theorieën niet over een onafhankelijke scheidsrechter beschikken. Wetenschapsfilosofen hebben er bovendien op gewezen dat elke theorie boven de feiten uitstijgt. Dit betekent dat er altijd meerdere theorieën mogelijk zijn om bepaalde feiten te verklaren.

Met het afwijzen van een inductieve methode van kennisverwerving wordt daarom tenminste het ideaal van onfeilbare kennis verlaten (Popper, 1972). We weten niet met zekerheid of de theorieën die we construeren, waar zijn. Zowel de theorieën als de waarnemingen kunnen fouten bevatten. Kennis is dus feilbaar. De fallibilist is van mening dat we door het opsporen van onze fouten de waarheid steeds beter kunnen benaderen (Popper, 1962). Sommige wetenschapsfilosofen en -sociologen gaan een stap verder. Zij geven het ideaal op dat in de wetenschap naar ware kennis wordt gestreefd. Anderen zijn zelfs van mening dat er onafhankelijk van ons geen werkelijkheid bestaat. Niet alleen onze theorieën maar ook de werkelijkheid zelf is een individuele of sociale constructie. Dit leidt tot een relativistische visie op kennis. De relativist is van mening dat er geen manier is om te bepalen of de ene theorie beter de waarheid benadert dan de andere (Popper, 1962). Elke menselijke constructie is daarom evenveel waard. Door verschillende auteurs is gewezen op relativistische tendensen in de constructivistische literatuur (Matthews, 1994; Osborn, 1995; Ogborn, 1997).

The common constructivist move is from the uncontroversial, almost selfevident premises stating that knowledge is a human creation, that it is historically and culturally bound, and that it is not absolute, to the conclusion that knowledge claims are either unfounded or relativist.

(Matthews, 1994, p. 143)

Ik kies hier voor een fallibilistische visie op kennis. Wetenschappelijk geaccepteerde kennis is noch de absolute waarheid noch een willekeurige constructie die evenveel waard is als een andere. Wetenschappelijk geaccepteerde kennis kan fouten bevatten, maar is voorlopig wel de best beproefde kennis waarover we beschikken. Ik ben dan ook van mening dat het zinvol is dat leerlingen hun kennis in de richting van deze wetenschappelijk geaccepteerde kennis uitbreiden of bijstellen. Leerlingen dienen dus een kritische houding aan te nemen ten aanzien van hun eigen kennis, maar ook ten aanzien van de wetenschappelijk geaccepteerde kennis. Deze mag niet als een absolute waarheid worden onderwezen (vgl. Schwab, 1962). Ik zou het onderwijs dan ook zo willen inrichten dat leerlingen zelf leren inzien *waarom* ze hun kennis zouden moeten bijstellen of uitbreiden.

Overlaten of overnemen?

Uit een constructivistische visie op leren en onderwijzen volgt niet automatisch dat de kennisontwikkeling ook moet worden overgelaten aan de leerlingen (Ernest, 1993). Leerlingen kunnen immers ook hun voorkennis uitbreiden en bijstellen wanneer de kennis door de docent wordt aangeboden. Ausubel (1968) heeft daar in de jaren zestig al op gewezen. Hij maakte een onderscheid tussen zinvol leren (meaningful learning), waarbij nieuwe informatie wordt gerelateerd aan voorkennis, en uit het hoofd leren (rote learning), waarbij nieuwe informatie niet of nauwelijks wordt gerelateerd aan de voorkennis. Veel vertegenwoordigers van zelfontdekkend leren in de jaren zestig gingen er volgens Ausubel ten onrechte vanuit dat zelfontdekkend leren automatisch leidt tot zinvol leren en dat kennisoverdracht automatisch leidt tot uit het hoofd leren. Volgens Ausubel werd zo een verkeerde dichotomie geschapen. Hij liet enerzijds zien dat zelfontdekkend leren ook kan leiden tot uit het hoofd leren wanneer, zoals in de inductieve varianten van zelfontdekkend leren, onvoldoende rekening wordt gehouden met de voorkennis van de leerlingen. Anderzijds benadrukte hij dat overdrachtsonderwijs ook kan leiden tot zinvol leren indien daarbij expliciet rekening wordt gehouden met de voorkennis van de leerlingen. Ausubel had zelf een voorkeur voor overdracht van kennis, omdat dit volgens hem in het algemeen effectiever en efficiënter is dan zelfontdekkend leren. In recente literatuur over zelfstandig leren treffen we soortgelijke overwegingen aan.

Although discovery learning can be very powerful and constructive, the research and debates in the educational psychology of the sixties, has clearly shown that we should not confine learning to discovery learning alone. It is too time-consuming and inefficient.

(Simons, 1992, p. 293)

Ik ga er vanuit dat het niet mogelijk en ook niet noodzakelijk is de kennisontwikkeling geheel aan de leerlingen over te laten. De docent zal dus ook kenniselementen moeten aanbieden. Ik wil leerlingen echter wel een belangrijke bijdrage laten leveren aan het formuleren van problemen, het bedenken van oplossingen en het toetsen hiervan. Dit heeft twee redenen. Ten eerste verwacht ik dat leerlingen zo actiever betrokken zijn bij het uitbreiden en bijstellen van hun voorkennis. Ten tweede verwacht ik dat leerlingen, wanneer ze zelf een bijdrage leveren aan kennisontwikkeling, ook leren werken met de methode voor kennisontwikkeling (zie 2.1.4).

Ik kies er dus voor het biologieonderwijs zo in te richten dat leerlingen zelf een bijdrage leveren aan de ontwikkeling van hun kennis. Om dit onderwijs effectief en efficiënt te laten zijn, zal het anders moeten worden ingericht dan de inductieve varianten van zelfontdekkend leren in de jaren zestig (zie 2.1.1). Ten eerste moet expliciet rekening worden gehouden met de voorkennis van de leerlingen. Ten tweede zullen er voorzieningen moeten worden getroffen opdat leerlingen hun voorkennis ook in de gewenste richting *willen* uitbreiden of bijstellen. Ervaringen met zelfontdekkend leren in de jaren zestig hebben namelijk geleerd dat leerlingen niet automatisch bereid zijn hun kennis uit te breiden.

The movement of which the Process of Education was a part was based on a formula of faith: that learning was what students wanted to do, that they wanted to achieve expertise in some particular subject matter. Their motivation was taken for granted.

(Bruner, 1971, p. 24)

Tenslotte zal er voor moeten worden gezorgd dat kennisontwikkeling ook in de praktijk haalbaar is. Veel projecten zijn in het verleden mislukt doordat ze teveel tijd kostten en de benodigde hulpmiddelen niet aanwezig waren (Tamir, 1996)

Individueel of sociaal?

Constructivistische onderwijsbenaderingen verschillen ook van elkaar in de mate waarin ze aandacht besteden aan individuele en sociale aspecten van kennisontwikkeling. In dit verband worden veelal twee stromingen binnen het constructivisme onderscheiden: individueel constructivisme en sociaal constructivisme (Matthews, 1994; Driver et al., 1994). Het individueel constructi-

visme heeft zijn wortels in het werk van Piaget. Deze was vooral geïnteresseerd in de wijze waarop individuen de fysische wereld leren begrijpen. Piaget ontdekte dat kinderen gedurende hun ontwikkeling niet alleen kennis verwerven over de wereld, maar dat tevens de redenen die ze gebruiken bij het beargumenteren van hun kennis veranderen (Van Haaften et al., 1986). Terwijl Piaget vooral de ontwikkeling van deze oordeelsstructuren heeft onderzocht, hebben de constructivisten vooral aandacht voor de ontwikkeling van domeinspecifieke kennis. Ze leggen echter evenals Piaget sterk de nadruk op de interactie tussen het individu en de fysieke omgeving. Driver et al. (1994) typeren een dergelijke klaspraktijk als volgt:

From this personal perspective, classrooms are places where individuals are actively engaged with others in attempting to understand and interpret phenomena for themselves, and where social interaction in groups is seen to provide the stimulus of different perspectives on which individuals can reflect. The teacher's role is to provide the physical experiences and to encourage reflection. (p. 7)

In het individueel constructivisme construeert de leerling dus niet in een isolement. De sociale omgeving (leerlingen en docent) speelt een belangrijke, maar vooral stimulerende rol. Wat echter onderbelicht blijft in dit perspectief is de rol van de docent bij het aanbieden van ideeën en de introductie van nieuwe manieren van denken. Anders gezegd, het blijft onduidelijk hoe de verworvenheden van de cultuur worden overgedragen aan de leerlingen.

Het sociaal constructivisme heeft hier meer aandacht voor. Deze stroming heeft zijn wortels in het werk van Vygotskij. Vygotskij was vooral geïnteresseerd in de vraag hoe individuen culturele verworvenheden van voorafgaande generaties leren verwerven (Van Oers, 1988). Hij introduceerde de gedachte dat de ontwikkeling van leerlingen kan worden gestimuleerd door hen te laten deelnemen aan activiteiten die ze nog net niet zelfstandig kunnen uitvoeren, maar wel met hulp van de docent. De docent heeft vervolgens de taak leerlingen te helpen met het uitvoeren van de activiteit en moeilijkere onderdelen hiervan over te nemen totdat leerlingen ze zelfstandig kunnen uitvoeren. De laatste jaren is dit Vygotskiaanse perspectief op leren en onderwijzen opnieuw onder de aandacht gebracht door Amerikaanse cultureel antropologen en onderwijspsychologen (Resnick, 1987; Brown et al., 1989) (zie 2.1.4).

Verscheidende auteurs hebben er op gewezen dat individueel en sociaal constructivisme niet moeten worden beschouwd als elkaar uitsluitende, maar als complementaire perspectieven (Driver et al., 1994; Cobb, 1994; Bereiter, 1994).

Stripped to their essentials constructivism tells us to pay close attention to the mental activities of the learner, and socioculturalism tells us to pay close attention to cultural practices in the learner's

milieu. Except for the practical difficulty of doing both at once, there is nothing incompatible in these proposals. Neither one implies rejection of the other.

(Bereiter, 1994, p. 21)

Ik neem dan ook elementen van beide stromingen over. Ik ga er vanuit dat de individuele leerlingen hun voorkennis in de gewenste richting moeten uitbreiden, dat de interactie met medeleerlingen daarbij van belang is en dat de docent een rol zal moeten spelen bij het aanbieden van kenniselementen en het aanleren van een methode voor kennisontwikkeling.

Balans

In het voorafgaande heb ik mijn positie bepaald met betrekking tot een drietal dimensies waarin constructivistische onderwijsbenaderingen onderling kunnen verschillen. Dit resulteert in een nadere uitwerking van het constructivistische uitgangspunt dat onderwijs zo moet worden ingericht dat leerlingen hun voorkennis uitbreiden en bijstellen in de gewenste richting. Ik wil het biologieonderwijs zo inrichten dat leerlingen hun kennis willen uitbreiden en bijstellen en ook weten waarom ze dit moeten doen. Anders gezegd, het onderwijs moet zo worden ingericht dat leerlingen inhoudelijk gemotiveerd zijn hun kennis in de gewenste richting uit te breiden of bij te stellen. De gewenste richting is de wetenschappelijk geaccepteerde kennis. Ik wil leerlingen zelf een bijdrage laten leveren aan de kennisontwikkeling. Daarbij krijgen ze hulp van elkaar en van de docent. De docent kan kenniselementen aandragen en vervult bovendien een belangrijke rol bij het aanleren van de methode waarmee kennis wordt ontwikkeld. Deze methode moet leerlingen voldoende sturen bij het ontwikkelen van kennis en haalbaar zijn in de praktijk. Deze karakterisering van het gewenste onderwijs roept een aantal problemen op waarvoor een oplossing zal moeten worden gezocht. Ten eerste wordt hier nadrukkelijk rekening gehouden met de voorkennis en motivatie van de leerlingen enerzijds en de gewenste kennis (leerdoelen) anderzijds. Het is echter nog niet duidelijk hoe de potentiële spanning tussen leerling en leerdoelen moet worden opgelost. Lijnse (1995) heeft deze spanning treffend verwoord:

...how to design teaching such that it guides students to construct in freedom the very ideas that one wants to teach. (p. 192)

Een onderwijsbenadering die dit probleem tracht op te lossen, is probleemstellend onderwijs. In 2.1.3 wordt deze benadering besproken. Ten tweede wordt aangegeven dat de docent een rol zal moeten spelen bij het aanleren van een methode voor kennisontwikkeling. Onduidelijk is echter nog hoe hij deze rol adequaat kan vervullen. Hiervoor ga ik te rade bij een onderwijs-

benadering die ontwikkeld is binnen de sociaal-constructivistische stroming: het meester-gezel model. In 2.1.4 wordt deze benadering besproken. Ten derde zal invulling moeten worden gegeven aan een methode voor kennisontwikkeling die praktisch haalbaar is en leerlingen voldoende richting geeft aan het ontwikkelen van kennis. In 2.1.5 worden de eisen die ik aan een dergelijke methode stel, nader gespecificeerd. Vervolgens wordt nagegaan of een dergelijke methode al voor het biologieonderwijs is ontwikkeld (2.1.6).

2.1.3 Probleemstellend onderwijs

Hoe kun je leerlingen inhoudelijk gemotiveerd hun kennis in de gewenste richting laten uitbreiden of bijstellen? In het Centrum voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen is een onderwijsbenadering ontwikkeld die dit probleem tracht op te lossen: probleemstellend onderwijs (Klaassen, 1995). Leerlingen zijn inhoudelijk gemotiveerd hun kennis uit te breiden wanneer ze een probleem ervaren: ze willen iets bereiken, maar kunnen dit met hun bestaande kennis nog niet bereiken.

Nu hebben leerlingen bij aanvang van het onderwijs zulke problemen niet, anders hadden ze hun kennis waarschijnlijk al wel eerder uitgebreid. Onderwijsactiviteiten dienen daarom ook zo te worden gekozen dat ze bij leerlingen een probleem oproepen waaraan in de volgende activiteit wordt gewerkt, terwijl deelname aan deze activiteit op zijn beurt weer leidt tot een probleem waaraan in een volgende activiteit wordt gewerkt enzovoort. Bovendien dienen de activiteiten zo te worden gekozen dat het oplossen van deze problemen uiteindelijk leidt tot de gewenste kennis. Op deze manier verschaft elke activiteit een lokale motivering om deel te nemen aan de volgende activiteit. De eerste activiteiten uit een lessenserie dienen daarbij zo te worden gekozen dat ze leerlingen ook een globale motivering verschaffen. Dat wil zeggen dat leerlingen globaal weten welk onderwerp ze in de lessenserie gaan bestuderen, waar dit toe kan leiden en dat ze het zinvol gaan vinden hun kennis over dit onderwerp uit te breiden. Wanneer het onderwijs zo is ingericht ervaren leerlingen het onderwijsleerproces als een door eigen problemen gestuurd proces, terwijl ze tegelijkertijd uitkomen bij de wetenschappelijk geaccepteerde kennis.

Klaassen (1995) benadrukt dat het niet mogelijk en niet noodzakelijk is dat leerlingen de oplossing voor de gestelde problemen helemaal zelf bedenken. De docent zal elementen van de oplossing moeten aandragen. Belangrijk is echter wel dat leerlingen deze elementen ook beschouwen als deeloplossing voor een door hen zelf ervaren probleem. Daarbij is het niet noodzakelijk dat alle leerlingen dit probleem ook zelf stellen. Wanneer een aantal leerlingen dit doet, is dit voldoende. Het is wel belangrijk dat alle leerlingen dit probleem als een eigen probleem gaan ervaren (Vollebregt, 1998). Dat ze, met andere woorden, inzien waarom hun kennis tekort schiet en dat ze vervolgens hun kennis ook willen uitbreiden.

Het is niet eenvoudig onderwijs te ontwikkelen waarbij leerlingen het onderwijsleerproces ervaren als een door eigen problemen gestuurd proces. De ontwikkelaar zal zich bij de keuze en ordening van activiteiten moeten verplaatsen in de positie van de leerling. Hij zal moeten inschatten over welke voorkennis een leerling beschikt en moeten nagaan of een leerling, gegeven deze voorkennis, middels de geplande activiteiten uitkomt bij de gewenste problemen en oplossingen. Uitgangspunt hierbij is dat leerlingen rationeel denken en handelen (Klaassen, 1995). Dit betekent dat we kunnen proberen het denken en handelen van leerlingen te voorspellen door na te gaan wat we zelf zouden doen of denken als we over de voorkennis van de leerling zouden beschikken. Wanneer op deze manier een structuur van problemen en activiteiten is bedacht, wordt het verwachte en bedoelde onderwijsleerproces in detail beschreven in een scenario. Vervolgens kan worden nagegaan of het onderwijsleerproces in de klas ook verloopt zoals verwacht en bedoeld. Op grond van deze informatie kan het scenario worden bijgesteld. In een cyclisch proces van ontwerpen, uitvoeren en bijstellen wordt zo getracht probleemstellend onderwijs te ontwikkelen. Er is inmiddels probleemstellend onderwijs ontwikkeld voor de onderwerpen radioactiviteit (Klaassen, 1995), deeltjes (Vollebregt, 1998) en afval (Kortland, in voorbereiding)

2.1.4 Meester-gezel model

Hoe moet het onderwijs worden ingericht, opdat leerlingen ook met een methode voor kennisontwikkeling leren werken? In Amerika is een onderwijsbenadering ontwikkeld die gericht is op het verwerven van denkwijzen die in een bepaalde (vak-) gemeenschap centraal staan (Brown et al., 1989; Collins et al., 1989). Dit kan het ontwikkelen van kennis over biologische systemen zijn, maar ook het leren schrijven of leren lezen van een tekst. Deze onderwijsbenadering is onder meer gebaseerd op het werk van Vygotskij en het werk van cultureel antropologen, die bestuderen hoe mensen in het dagelijks leven leren.

From a very early age and throughout their lives, people, consciously or unconsciously, adopt the behavior and belief systems of new social groups. Given the chance to observe and practice in situ the members of a culture, people pick up relevant jargon, imitate behavior, and gradually start to act in accordance with its norms.

(Brown et al., 1989, p. 34)

Veel leren in het dagelijks leven vindt plaats door imitatie. Mensen kijken de kunst af van meer bedreven leden van de gemeenschap en proberen dit vervolgens na te doen. In een schoolse context komt deze vorm van leren veel voor bij het aanleren van handvaardigheden zoals lassen of timmeren. Dit wordt dan veelal meester-gezel leren (apprenticeship) genoemd. De meester (de docent) doet voor

hoe je een bepaalde handeling verricht en de gezellen (de leerlingen) doen dit na, waarbij de meester hen feedback geeft op het uitvoeren van de handeling.

Collins et al. (1989) hebben dit model verder uitgewerkt voor het aanleren van denkvaardigheden (*cognitive apprenticeship*). Zij gaan er vanuit dat denkvaardigheden het best kunnen worden aangeleerd in de context waarin ze ook worden gebruikt. Dus een methode voor kennisontwikkeling wordt aangeleerd door deze methode te gebruiken bij het ontwikkelen van kennis. De docent demonstreert daarbij eerst hoe bepaalde problemen kunnen worden aangepakt. Daarbij is het van belang dat hij geen denkstappen overslaat en deze voor leerlingen ook expliciteert. De leerlingen gaan vervolgens zelf met de methode werken. Collins et al. (1989) bevelen aan, leerlingen in groepsverband aan de opdrachten te laten werken. Leerlingen kunnen zo ook elkaar aanwijzingen geven en stimuleren bij het werken met de methode. De docent begeleidt de leerlingen bij het uitvoeren van deze opdrachten. De aanwijzingen en correcties van de docent zijn expliciet gericht op verbetering van het werken met de methode. Deze begeleiding wordt geleidelijk teruggetrokken onder gelijktijdige stimulering van de leerlingen om zelfstandig met de methode te gaan werken.

Ideeën ontleend aan probleemstellend onderwijs en het meester-gezel model kunnen in samenhang voor het biologieonderwijs worden toegepast. Het onderwijs wordt dan zo ingericht dat leerlingen zoveel mogelijk door eigen problemen gestuurd uitkomen bij de gewenste kennis. Bij het formuleren en oplossen van deze problemen maken ze gebruik van een methode. Deze wordt de leerlingen eerst voorgedaan, waarna ze deze methode, onder begeleiding van de docent, zelf gaan gebruiken. Hoewel hiermee het constructivistische uitgangspunt nader is ingevuld, blijven de richtlijnen globaal van karakter en zullen dus nader moeten worden uitgewerkt. Bovendien ontbreekt nog een kernelement in deze karakterisering van het gewenste onderwijs, namelijk een methode voor kennisontwikkeling.

2.1.5 Typering van de gewenste methode voor kennisontwikkeling

Een geschikte methode voor kennisontwikkeling moet praktisch haalbaar zijn en leerlingen voldoende sturen bij het uitbreiden en bijstellen van hun voorkennis (zie 2.1.3). De theorie van Simon over kennisontwikkeling maakt het mogelijk deze eisen nader te specificeren (Langley et al., 1987; Simon, 1996). Simon beschouwt kennisontwikkeling als een vorm van probleemoplossen. Probleemoplossen kan worden voorgesteld als het zoeken in een ruimte met informatie over mogelijke oplossingen voor het probleem. Deze ruimte noemt Simon de probleemruimte. Succesvol probleemoplossen veronderstelt het effectief en efficiënt verkennen van de probleemruimte zodat de uiteindelijke oplossing wordt gevonden.

Er kunnen drie typen methoden worden onderscheiden waarmee de probleemruimte kan worden verkend: algoritmen, trial en error, en heuristieken. Algoritmen schrijven nauwkeurig stap voor stap voor welke keuzen moeten worden gemaakt en leiden, mits juist toegepast, zeker tot de juiste oplossing. Algoritmen zijn wel beschikbaar voor bijvoorbeeld het koken van spruitjes maar niet voor kennisontwikkeling. Zoals eerder is beargumenteerd bestaat er geen methode voor de ontwikkeling van onfeilbare kennis (2.1.2). Wanneer er geen algoritme beschikbaar is, kan gebruik worden gemaakt van trial en error (gissen en missen). In dit geval worden er 'blind'¹ mogelijke oplossingen gegenereerd, die vervolgens worden getoetst. Deze methode volstaat wanneer de probleemruimte klein is, dan kunnen immers alle mogelijke oplossingen ook worden uitgeprobeerd. Voor de meeste problemen is de probleemruimte echter te groot en zal deze methode moet worden aangevuld.

Simon (1996) illustreert dit aan de hand van het 'safe-probleem'. Stel je moet een safe openen waarvan het slot bestaat uit tien nummerschijven die elk 100 standen hebben welke van 0 tot 99 genummerd zijn. Je kunt nu via trial en error een combinatie proberen. Aangezien de probleemruimte gigantisch is (100^{10} combinatiemogelijkheden), is dit echter een onmogelijke taak. In dit geval zou je eigenlijk over een methode moeten beschikken die aangeeft in welk gedeelte van de probleemruimte je het beste kunt zoeken. Hierdoor wordt het aantal mogelijke oplossingen dat je moet proberen verkleind. Dergelijke methoden noemt Simon heuristieken. Stel je weet dat de kluis kapot is en dat je een tik hoort wanneer de schijf in de juiste stand is gedraaid. De volgende eenvoudige heuristiek kan dan richting geven aan het selectief zoeken in de probleemruimte: draai elke schijf totdat je een klik hoort. Middels deze heuristiek wordt het aantal standen dat gemiddeld zal moeten worden uitgeprobeerd, teruggebracht tot 500. Door deze aanwijzing is het openen van een safe van een praktisch onmogelijke tot een doodeenvoudige opgave geworden. Heuristieken maken trial en error dus niet overbodig, maar zorgen er voor dat het aantal mogelijke oplossingen dat middels trial en error moet worden uitgeprobeerd, wordt verkleind. Daarom ga ik op zoek naar een heuristiek die leerlingen kan sturen bij kennisontwikkeling over biologische systemen.

De kracht (en beperking) van een heuristiek is afhankelijk van de hoeveelheid informatie die deze bevat over de oplossing van het probleem. Hoe meer informatie een heuristiek bevat over de oplossing, des te meer sturing ze geeft bij het zoeken in de probleemruimte. Tegelijkertijd wordt hierdoor het aantal problemen waarvoor de heuristiek geschikt is (het toepassingsbereik) kleiner. De eerder genoemde safeheuristiek is bijvoorbeeld alleen geschikt voor het openen van kapotte kluizen. De gewenste heuristiek zal de leerlingen niet alleen moeten sturen bij kennisontwikkeling over het immuunsysteem, maar ook

¹ Blind in de zin dat ze slechts bij toeval anticiperen op de (onbekende) oplossing van het probleem.

bij het ontwikkelen van kennis over de functie en werking van andere biologische systemen van moleculair tot en met organismaal niveau. De heuristiek zal dan ook zoveel mogelijk informatie moeten bevatten die al deze systemen gemeenschappelijk hebben.

Heuristieken bevatten niet alleen zelf informatie over het probleem, ze helpen ook zoeken in relevante informatie over het probleem. Twee typen informatiebronnen kunnen worden onderscheiden: interne en externe. De interne informatiebron is de relevante voorkennis waarover de probleemoplosser reeds beschikt. De externe informatiebron is alle informatie die in de wereld is opgeslagen buiten de probleemoplosser. Dit kunnen bijvoorbeeld onderzoeksobjecten zijn (i.c. organismen), informatie die hierover aanwezig is bij de docent of medeleerlingen, of opgeslagen is in schriftelijke of digitale informatiedragers. De gewenste heuristiek zal het gebruik van interne informatiebronnen moeten maximaliseren en het gebruik van externe informatiebronnen moeten minimaliseren. Dit heeft twee redenen. Ten eerste verwacht ik, conform het constructivistische uitgangspunt, dat leerlingen het meest effectief leren wanneer ze relevante voorkennis activeren en gebruiken bij de kennisontwikkeling. Ten tweede verwacht ik dat een dergelijke heuristiek ook praktisch haalbaar is. De interne informatiebron is altijd aanwezig en gemakkelijk toegankelijk. Externe informatiebronnen zijn niet altijd beschikbaar en vaak moeilijker toegankelijk. Dit is vooral het geval wanneer aan het onderzoeksobject zelf informatie moet worden ontleend middels observatie en experiment. Veelal is het onderzoeksobject niet aanwezig en ontbreken de instrumenten waarmee informatie over het onderzoeksobject kan worden verzameld. Bovendien kost het vaak veel tijd om het benodigde onderzoek te verrichten (Tamir, 1996). Ik ben dus op zoek naar een heuristiek die informatie bevat over biologische systemen van moleculair tot en met organismaal niveau en daarbij vooral richting geeft aan het zoeken in de relevante voorkennis van de leerlingen.

2.1.6 Analyse van bestaande methoden voor kennisontwikkeling in het biologieonderwijs

Ik zal nu nagaan of een dergelijke heuristiek al voor het biologieonderwijs is ontwikkeld. Binnen de constructivistische traditie is wel aandacht voor de rol van voorkennis bij de kennisontwikkeling, maar zijn geen heuristieken ontwikkeld die informatie bevatten over biologische systemen.

In het gangbare biologieonderwijs wordt leerlingen vaak een heuristiek aangeboden waarmee ze kennis kunnen ontwikkelen over biologische systemen. Deze heuristiek wordt in de schoolboeken op verschillende manieren beschreven. Ze bevat echter veelal de volgende componenten: (1) Formuleer een probleem; (2) Verzamel data voor het formuleren van een hypothese; (3) Formuleer een hypothese; (4) Plan een experiment voor het toetsen van een

hypothese; (5) Voer het experiment uit; (6) Interpreteer de data (vgl. Gibbs & Lawson, 1992). Deze heuristiek voldoet niet aan de eerder geformuleerde eisen. Ten eerste is de heuristiek vooral gericht op het verwerven van informatie uit externe informatiebronnen. Zowel bij het formuleren als het toetsen van hypothesen, wordt van de leerlingen verwacht dat ze middels observatie of experiment(-en) informatie verzamelen over het betreffende onderzoeksobject. Ten tweede bevat de heuristiek geen informatie over biologische systemen. Ze geeft leerlingen dan ook weinig sturing bij het ontwikkelen van kennis.

In de jaren zestig zijn door Joseph Schwab en zijn medewerkers heuristieken ontwikkeld die wel informatie bevatten over biologische systemen. Schwab (1964) had, evenals de constructivisten, kritiek op de inductieve methode. Volgens hem begint kennisontwikkeling niet met het verzamelen van data, maar met een probleem. Het probleem op zijn beurt wordt weer bepaald door een fundamenteel idee over het object van onderzoek. Deze fundamentele ideeën noemt Schwab onderzoeksprincipes (principles of enquiry). Zij bepalen het verloop van de kennisontwikkeling. Schwab illustreert dit aan de hand van kennisontwikkeling over het gedrag van waterinsecten in het begin van deze eeuw.

Onderzoekers wisten aanvankelijk nog niet wat voor problemen konden worden geformuleerd. Moesten ze vragen welke behoeften deze insecten hadden, welke patronen er in hun bewegingen zaten etc. Het onderzoek kwam pas op gang toen men er vanuit ging dat deze organismen konden worden beschouwd als stimulus-respons machines. Dit idee werd als volgt toegepast bij het bestuderen van gedrag. Men ging er vanuit dat elke beweging in de ruimte werd veroorzaakt door een stimulus uit de omgeving. Verder werd aangenomen dat op twee manieren op de stimulus kon worden gereageerd: van de stimulus af of naar de stimulus toe (respectievelijk een negatieve en een positieve taxis). Dit naïeve idee maakte het mogelijk problemen te formuleren en gaf ook richting aan het oplossen van deze problemen.

In het kader van het Biological Sciences Curriculum Study project (BSCS) zijn door Schwab en zijn medewerkers vier van deze onderzoeksprincipes uitgewerkt in de vorm van heuristieken (Schwab, 1963). De vier onderzoeksprincipes zijn: het taxonomisch principe; het oorzaak-gevolg principe; het structuur-functie principe; en het regulatie-principe. In de heuristieken is gespecificeerd: wat voor soort problemen over het onderzoeksobject kunnen worden geformuleerd; de data die moeten worden verzameld voor het oplossen van het probleem; en hoe de data moeten worden georganiseerd en/of geïnterpreteerd. In tabel 2.1.1 worden het oorzaak-gevolg principe en het structuur-functie principe uitgewerkt en geïllustreerd.

Omdat deze heuristieken informatie bevatten over het onderzoeksobject geven ze meer richting aan de kennisontwikkeling, dan de heuristieken die in het gangbare biologieonderwijs worden gehanteerd. Ze geven echter nog on-

Onderzoeks principe	wat voor soort problemen kun je formuleren?	welke data moeten worden verzameld om het probleem op te lossen?	wat moet met de data worden gedaan om het probleem op te lossen?
<i>oorzaak-gevolg:</i> het organisme bestaat uit onafhankelijke ketens van oorzaak en gevolg	wat gebeurt er met de muis nadat zijn schildklier is verwijderd?	• meet de temperatuur van de muis voor en na de behandeling • meet de ademhalings-activiteit van de muis • meet het gewel van de muis	organiseer de data in tabellen of grafieken zodat verschillen voor en na de behandeling zichtbaar worden
<i>structuur-functie:</i> er bestaan relaties tussen ketens van oorzaak en gevolg die een bijdrage leveren aan het functioneren van het organisme als geheel	wat is de functie van het hart van een zoogdier voor het gehele organisme?	• observaties van de verandering in structuur, locatie en activiteit van verschillende delen van het hart • observaties van veranderingen in naburige organen na hartactiviteit	zoek naar relaties tussen structuur, locatie en activiteit van de geobserveerde delen.

Tabel 2.1.1

Onderzoeksprincipes uitgewerkt in heuristieken²

voldoende richting aan de kennisontwikkeling over de functie en werking van biologische systemen. Het taxonomisch principe is niet geschikt omdat het niet gericht is op de ontwikkeling van kennis over de functie en werking van biologische systemen maar op classificatie. Het regulatie-principe is slechts voor een deel van het domein geschikt. Niet alle biologische systemen van moleculair tot organismaal niveau zijn immers regulatiesystemen. Het oorzaak-gevolg principe is weer niet geschikt om de functies van systemen vast te stellen. Bovendien geeft het in zijn uitwerking (zie tabel 2.1.1) weinig sturing bij het identificeren van de werking van complexe systemen die uit veel verschillende oorzaak-gevolg ketens bestaan. Het structuur-func-

² Deze figuur is een vertaling en bewerking van figuren op pp. 34-35 en pp. 38-42 uit de tweede druk van het *Biology Teachers' Handbook* (Klinckmann, 1970).

³ In het BSCS-project zijn de heuristieken dan ook niet gebruikt om leerlingen zelf kennis te laten ontwikkelen over biologische systemen. De heuristieken zijn hier uitgewerkt in het kader van 'invitations to enquiry' (Schwab, 1963). Dit zijn kleinschalige onderzoeksoopdrachten die vooral tot doel hebben leerlingen kennis te laten maken met de onderzoeksprincipes en de daarvan afgeleide heuristieken.

tie principe is in principe wel geschikt voor het vaststellen van de functie van een systeem, maar is niet uitgewerkt voor het identificeren van de werking van het systeem. De heuristieken geven leerlingen dus nog onvoldoende sturing bij het ontwikkelen van kennis over de functie en werking van biologische systemen³. De heuristieken zijn bovendien gericht op het verwerven van informatie uit externe informatiebronnen. Er wordt verondersteld dat leerlingen data verzamelen voor het genereren en toetsen van hypothesen.

Een heuristiek, die voldoende informatie bevat over biologische systemen van moleculair tot organismaal niveau en daarbij vooral richting geeft aan het zoeken in de relevante voorkennis, is dus nog niet ontwikkeld.

Samenvattend kan worden vastgesteld dat de constructivistische traditie waardevolle richtlijnen heeft opgeleverd voor het inrichten van biologieonderwijs waarin leerlingen zelf een bijdrage leveren aan de kennisontwikkeling. Probleemstellend onderwijs biedt richtlijnen voor de structurering van de kennisontwikkeling. Het meester-gezel model verschaft richtlijnen voor het leren werken met een methode van kennisontwikkeling. Deze richtlijnen zijn echter vakoverstijgend geformuleerd en bieden daarom weinig concrete handvatten voor de inrichting van het biologieonderwijs. Bovendien ontbreekt een geschikte heuristiek. Hiervoor ga ik te rade bij de biologie.

2.2 Een visie op organismen

Een heuristiek die leerlingen stuurt bij de kennisontwikkeling, zal informatie moeten bevatten over biologische systemen van moleculair tot organismaal niveau. Ze zal met andere woorden moeten worden gebaseerd op een visie op organismen. In 2.2.1 worden drie algemene visies op organismen beschreven. Het idee van organismen als optimaal ontwerp kan worden beschouwd als een nadere invulling van één van deze visies. In 2.2.2 wordt het idee van optimaal ontwerp in een historische context uitgewerkt en toegelicht. Vervolgens wordt nagegaan welke heuristiek kan worden ontleend aan dit idee en hoe biologen deze heuristiek gebruiken bij het ontwikkelen van kennis over biologische systemen (2.2.3). In 2.2.4 worden enkele kritische kanttekeningen geplaatst bij het gebruik van het idee van optimaal ontwerp en de daarvan afgeleide ontwerpheuristiek in de (evolutie-)biologie. De geschiktheid van de ontwerpheuristiek voor leerlingen wordt in 2.3.1 verkend.

2.2.1 Mechanicisme, vitalisme en organicisme

Er zijn in de geschiedenis van de biologie meerdere algemene visies op organismen ontwikkeld die consequenties hebben voor de wijze waarop kennis over organismen kan worden ontwikkeld. Een drietal visies wordt veelal onderscheiden: mechanicisme, vitalisme en organicisme (Von Bertalanffy, 1965; Theunissen & Visser, 1996). Mechanicisten zijn van mening dat het organisme niet meer is dan de som van zijn onderdelen. Hun onderzoeksbenadering wordt gekenmerkt door analyse. Het geheel wordt uiteengelegd in zijn onderdelen en deze op hun beurt weer in nog kleinere onderdelen. Men verwacht dat kennis over de onderdelen uiteindelijk ook inzicht verschaft over het geheel. Vitalisten daarentegen zijn van mening dat een organisme meer is dan de som van zijn onderdelen. Het geheel bezit eigenschappen die in de onderdelen niet te vinden zijn. Voor het verklaren van deze eigenschappen wordt een beroep gedaan op een immateriële kracht. Ze hebben dus nadrukkelijk aandacht voor het geheel, maar zijn van mening dat dit niet wetenschappelijk kan worden geanalyseerd. De organicisten nemen van beide visies elementen over. Ze zijn het met de vitalisten eens dat het geheel meer is dan de som der delen. Ze onderkennen dat op ieder organisatieniveau eigenschappen ontstaan die op het onderliggende niveau niet voorkomen (emergente eigenschappen). Zo kan een organisme als geheel slapen maar slaapt een cel niet. Zij zijn echter evenals mechanicisten van mening dat voor het verklaren van de eigenschappen van het geheel geen beroep hoeft te worden gedaan op immateriële krachten. Organicisten wijzen erop dat de organisatie, de wijze waarop de onderdelen samenwerken, zorgt voor de karakteristieke eigenschappen van het geheel. Zij benadrukken dat men een geheel alleen kan begrijpen indien men zowel zijn onderdelen en hun interacties bestudeert, als het grotere geheel waar het zelf weer deel van uitmaakt.

De drie visies zijn al zo oud als de biologie zelf. In de huidige tijd overheerst echter een organicistisch perspectief. In feite zijn begrippen als emergente eigenschappen en organisatieniveaus onderdeel geworden van de standaardtaal binnen de biologie (Beckner, 1968). Dit blijkt ook uit het soort vragen die biologen stellen. Daarbij is niet alleen aandacht voor de onderdelen en hun interacties (werking) maar ook voor de bijdrage die een onderdeel levert aan het geheel (functie). Ik sluit me dan ook aan bij deze organicistische visie op organismen. In deze eeuw is het organicistisch perspectief verbonden met systeemdenken (Von Bertalanffy, 1968). Binnen deze stroming is een terminologie ontwikkeld waarmee over delen en gehelen kan worden gesproken die inmiddels ook tot de standaardtaal van biologen is gaan behoren. Een systeem wordt veelal gedefinieerd als een geheel waarbij er interacties bestaan tussen de onderdelen. De omgeving van het systeem is dan alles wat niet tot het systeem behoort, maar waar het systeem wel een relatie mee onderhoudt. De onmiddell-

lijke omgeving van een systeem is veelal het omvattende systeem (suprasysteem) waar het zelf onderdeel (substelsysteem) van is. Een organicistische visie op kennisontwikkeling kan als volgt in systeemtermen worden vertaald.

Thus an organ should not only be studied on its own level but should also be analyzed both downward (in terms of its subsystems) and upward (in terms of the entire organism in its environment).

(Bunge, 1979; p. 123)

Ik sluit me aan bij de hierboven gehanteerde systeemterminologie en de beschrijving van systeemdenken. Ik verwacht dat ook leerlingen kennis kunnen ontwikkelen over een biologisch systeem als ze zowel aandacht besteden aan onderdelen en interacties van het systeem als aan de systeemomgeving. Omdat het hier gehanteerde systeembegrip echter nog weinig informatie bevat over biologische systemen geeft het ook nog weinig richting aan het ontwikkelen van kennis.

De biologie kent echter een oude traditie waarin dit algemene systeembegrip nader is uitgewerkt en dus meer sturing kan verschaffen bij de ontwikkeling van kennis. Organismen worden hierin beschouwd als optimale ontwerpen (Williams, 1996). De aanduiding optimaal ontwerp verwijst veelal naar de context van menselijke ontwerpproblemen. Ik zal dan ook eerst aangeven wat het idee van optimaal ontwerp in deze context betekent. Ontwerpers worden in het algemeen geconfronteerd met het probleem een systeem te moeten ontwerpen dat in staat is een bepaalde functie te vervullen in een bepaalde omgeving. Denk bijvoorbeeld aan het ontwerpen van een brug. De realisatie van elk mogelijk systeem brengt noodzakelijkerwijs bepaalde kosten met zich mee. Deze kunnen worden gemeten in guldens, kilowattuur, etc., zodat de verschillende systemen met elkaar te vergelijken zijn. Het optimale ontwerp is dat systeem uit een set van mogelijke systemen dat de functie vervult in de betreffende omgeving met zo min mogelijk kosten (Rosen, 1967).

Ook biologische systemen lijken optimaal te zijn ontworpen voor het vervullen van bepaalde functies in een bepaalde omgeving. In de volgende paragraaf zal worden aangegeven welke betekenis de termen functie en kosten krijgen in een biologische context. Hier geef ik eerst twee voorbeelden van een optimaal ontwerp in de natuur. Een geliefd voorbeeld van Darwin is de orchidee (Futuyama, 1983). Orchideeën worden bestoven door insecten. De bloem van een orchidee bestaat uit drie bloembladen waarvan er één, het labellum, vaak een bijzondere vorm heeft. Zo zijn er veel orchideeën die hiermee een vrouwelijk insect nabootsen. Bovendien produceren orchideeën stoffen die lijken op de feromonen die vrouwelijke insecten afscheiden om mannetjes te lokken. Als een mannelijk exemplaar 'paart' met de bloem worden stuifmeelklompjes middels een plakkerig schijfje op zijn kop bevestigd. Wanneer het insect nu een andere bloem bezoekt, worden de stuifmeelklompjes aan de stempel afgestreken.

Een ander verbluffend voorbeeld van een optimaal ontwerp in de natuur is het lichtproducerende orgaan (fotofoor) van de ponyvis (Hasting, 1971). De ponyvis is een klein visje dat leeft in open water. De kans dat hij daar zichtbaar is voor vijanden is klein, omdat hij in donker water verblijft. Toch kan een ponyvis gemakkelijk worden opgemerkt wanneer een roofdier onder de ponyvis doorzwemt. Bij het minste licht van boven kan een roofdier namelijk het silhouet van de ponyvis tegen dat licht zien bewegen. De fotofoor aan de buikzijde van de vis zorgt er echter voor dat het silhouet wordt uitgewist. De zwemblaas fungeert hierbij als een soort reflector. Deze bevat een reflecterende laag van guanine kristallen en zorgt er voor dat het licht precies het silhouet dat ontstaat, kan uitwissen. Het diffuse licht wordt geproduceerd door bacteriën. Bacteriën produceren het licht dag en nacht. De vis beschikt dan ook over een ooglidachtige sluiters waarmee hij de lichtbron 's nachts kan afdekken.

2.2.2 Het idee van een organisme als optimaal ontwerp in een historische context

Al eeuwenlang wordt het idee van optimaal ontwerp toegepast op organismen. De verklaring voor het ontwerpkenmerk van organismen is echter in de loop der tijden wel veranderd. Dit heeft ook consequenties voor de wijze waarop het idee van optimaal ontwerp in de biologie is geoperationaliseerd. Ik zal daarom kort aangeven hoe de verklaring voor het voorkomen van optimale ontwerpen in de natuur is veranderd en vervolgens beschrijven wat dit betekent voor de operationalisatie van het idee.

Aristoteles beschouwde organismen, naar analogie van door de mens gemaakte voorwerpen, als optimale ontwerpen (Soontiëns, 1988). In zijn biologische werken gaat hij voor vele onderdelen van organismen na waarom ze aanwezig zijn; van de slurf van de olifant tot de wenkbrauwen en oogleden van mensen. Voor de verklaring van het ontwerpkenmerk van organismen deed hij een beroep op een immateriële kracht (entelechie). In alle organismen zou een dergelijke kracht aanwezig zijn. Deze kracht is er voor verantwoordelijk dat de eigenschappen tijdens hun ontwikkeling tot de gewenste vorm komen⁴.

In de Middeleeuwen werd onder invloed van de christelijke scheppings-theologie de interne kracht vervangen door een externe kracht (Soontiëns, 1988). God zou verantwoordelijk zijn voor het ontwerpkenmerk van organismen. Het voorkomen van optimale ontwerpen in de natuur werd zelfs gebruikt als bewijs voor het bestaan van God. Een van de beroemdste uiteenzettingen van dit Godsbewijs is te vinden in *Natural Theology- or Evidences of the Existence and Attributes of Deity Collected from the Appearances of Nature* van

⁴ Aristoteles was van mening dat deze interne kracht ook aanwezig is in de levenloze natuur. Zo is deze kracht er voor verantwoordelijk dat stenen naar het centrum van de aarde toe bewegen. Dit is de natuurlijke bestemming, het doel van een steen.

de theoloog William Paley uit 1802 (Dawkins, 1987). Paley gaat er vanuit dat er twee verklaringen mogelijk zijn voor het voorkomen van complexe ontwerpen in de natuur. Ten eerste kan een ontwerp zijn ontstaan door toevallige factoren. Fysische krachten bewerken materie tot complexe levende organismen. Ten tweede kan een ontwerp zijn bedacht door een intelligente ontwerper (i.c. God). Paley gebruikte een analogie om de lezer er van te overtuigen dat de tweede verklaring veel plausibeler is dan de eerste. Stel je loopt over de heide en vindt een horloge. Je opent het horloge aan de achterkant en ziet dat vele tandwielletjes en veertjes onderling zo zijn verbonden dat het horloge de tijd aan kan geven. Hoe zou je het bestaan en de eigenschappen van het horloge verklaren? Het is onwaarschijnlijk dat het horloge door toeval tot stand is gekomen; dat regen en wind brokken materie hebben veranderd in een horloge. Veel waarschijnlijker is het dat het horloge het product is van een intelligente en vaardige horlogemaker. Paley concludeert vervolgens dat wanneer de lezer het eens is met zijn conclusie over het horloge, dat hij dan een vergelijkbare conclusie moet trekken voor de levende natuur. Ook in dit geval is het uiterst onwaarschijnlijk dat levende organismen door toevalsprocessen tot stand zijn gekomen. Ze moeten dus wel zijn ontworpen door een alwetende Schepper.

Verklaringen voor het ontwerp karakter van organismen in termen van interne en externe krachten hebben het idee van optimaal ontwerp in de biologie lange tijd in een verdacht daglicht gesteld. De biologie zou zich als natuurwetenschap niet bezig moeten houden met bovennatuurlijke krachten. Deze zijn immers niet empirisch toetsbaar. Evenals de andere natuurwetenschappen zou ook de biologie zich hiervan moeten bevrijden (Sober, 1993). Darwin heeft in zijn *Origin of Species* het ontwerpidee in de biologie gerehabiliteerd. De genialiteit van Darwin bestond erin dat hij liet zien dat ontwerpen ook kunnen ontstaan zonder ontwerper. Darwin, die sterk beïnvloed is door Paley, was het met Paley eens dat complexe ontwerpen niet in één keer door toeval kunnen ontstaan. Darwin liet echter zien dat er altijd een graduele reeks denkbaar is van tussenstadia waarbij het verschil tussen het ene en het andere stadium zo klein is dat hij wel door toevallige gebeurtenissen kan zijn ontstaan (Dawkins, 1987).

Complexe ontwerpen zijn dus niet in een keer tot stand gekomen, maar zijn in een geleidelijk evolutionair proces ontstaan. Daarbij is het van belang dat er een mechanisme bestaat dat elke stap in een bepaalde baan leidt, omdat anders deze stappenreeks in een oneindige, willekeurige wandeling zou uitmonden. Dit mechanisme is natuurlijke selectie. Stel dat in een populatie als gevolg van toevallige gebeurtenissen individuen onderling verschillen in hun vermogen tot overleven en voortplanting. Dit verschil kan door diverse eigenschappen worden veroorzaakt. Zo kunnen bijvoorbeeld in een zebrapopulatie bepaalde individuen harder lopen dan andere waardoor ze gemakkelijker aan predatoren kunnen ontsnappen. Stel nu dat de eigenschap erfelijk is en de ouders deze eigenschap dus kunnen doorgeven aan hun nakomelingen. Wat zal er

dan gebeuren met de samenstelling van de populatie? We kunnen verwachten dat er in de volgende generatie meer individuen zijn die hard kunnen lopen en minder die langzamer lopen. Wanneer nu de omgeving constant blijft, zal na verloop van tijd de totale populatie worden bevolkt door individuen die harder kunnen lopen en zullen individuen die minder hard lopen verdwijnen. Natuurlijke selectie leidt er dus toe dat de beter aangepaste individuen hun eigenschappen kunnen doorgeven aan de nakomelingen en dat de eigenschappen van minder aangepaste individuen verdwijnen. In die zin kan natuurlijke selectie als een optimaliseringsproces worden beschouwd (Alexander, 1996). Natuurlijke selectie biedt hiermee een verklaring voor het ontstaan van optimale ontwerpen zonder dat daar een ontwerper aan te pas komt.

Het is nu mogelijk nader te omschrijven wat het idee van optimaal ontwerp betekent in een biologische context. In 2.2.1 heb ik een optimaal ontwerp gedefinieerd als dat systeem uit een set van mogelijke systemen dat de functie vervult in de betreffende omgeving met de minste kosten. Door de mens gemaakte systemen kunnen voor vele verschillende functies worden ontworpen: schoonheid, welzijn etc. Biologische functionaliteit is daarentegen steeds hetzelfde. Natuurlijke selectie leidt er toe dat bij organismen uiteindelijk het voortplantingssucces wordt geoptimaliseerd. Immers, alleen (genen van) eigenschappen die uiteindelijk een bijdrage leveren aan het voortplantingssucces van het organisme⁵, hebben een kans in de volgende generatie terecht te komen. Tegen deze achtergrond kunnen ook de termen functie en kosten worden begrepen. Subsystemen en gedragingen van een organisme kunnen (direct of indirect) voordelige of nadelige effecten hebben op het voortplantingssucces van het organisme.

Voordelige effecten van subsystemen en gedragingen worden functies genoemd⁶. De nadelige effecten kunnen worden beschouwd als kosten (Hinde, 1975; Rosen, 1967). Nemen we als voorbeeld het aanvalsgedrag van een bepaalde meeuwensoort. Dit aanvalsgedrag leidt enerzijds toe dat predatoren het broedgebied verlaten (functie). Anderzijds kost het aanvalsgedrag energie die niet aan andere activiteiten kan worden besteed, en bestaat er bovendien het gevaar dat de

5 Dit is niet de enige manier om genen door te geven naar de volgende generatie. Een organisme kan zijn genen ook doorgeven door verwanten te helpen bij hun overleven en voortplanting (verwantenselectie) (Ridley, 1993).

6 Deze betekenis van de term functie wordt in de meeste takken van de biologie gehanteerd (Pranger, 1990; Kitcher, 1993). Ook in de schoolbiologie verwijst de term functie veelal naar voordelige effecten van eigenschappen voor het voortplantingssucces van een organisme. In de evolutiebiologie daarentegen wordt de term functie strikter gehanteerd. Een voordelig effect van een eigenschap is slechts zijn functie indien de eigenschap in een populatie aanwezig is door selectie voor dit effect (Kitcher, 1993). Ik zal de term functie in het navolgende reserveren voor voordelig effect. Met de term adaptieve functie zal ik voortaan verwijzen naar geselecteerd effect (Pranger, 1990). Evolutiebiologen noemen eigenschappen die door natuurlijke selectie tot stand zijn gekomen namelijk adaptaties (Sober, 1993).

meeuw zelf het slachtoffer wordt van de predator (nadelen). De optimale eigenschap (substelsysteem of gedrag) is die eigenschap uit een set van alternatieve eigenschappen die de functie vervult in de betreffende omgeving met zo min mogelijk nadelen voor het voortplantingssucces van het organisme. De set van alternatieve eigenschappen verwijst hier niet naar alle denkbare alternatieven, maar naar eigenschappen die ook daadwerkelijk in een populatie zijn voorgekomen (Orzack & Sober, 1994). Natuurlijke selectie produceert immers geen variatie, het kan slechts selecteren wat aanwezig is. Natuurlijke selectie leidt dus niet tot de best denkbare ontwerpen. Het best denkbare bot is onbreekbaar en gewichtloos. Het is echter onmogelijk dat een dergelijke eigenschap ooit in een organisme is ontstaan.

2.2.3 Ontwerpen in biologisch onderzoek

Het idee dat organismen als optimale ontwerpen kunnen worden beschouwd, heeft ook een heuristische waarde. In het biologisch onderzoek verschaft het onderzoekers veelvuldig richting bij de ontwikkeling van kennis over de functie en werking van biologische systemen. Veelal start men hierbij met een eigenschap van een systeem waarvan niet onmiddellijk duidelijk is waartoe hij dient. Onderzoek naar de functie van de betreffende eigenschap geeft dan vaak tevens meer inzicht in de werking van het systeem en de systeemomgeving. De biologie-historicus Ernst Mayr (1983) merkte ooit op dat elke vooruitgang in de fysiologie door de eeuwen heen steeds begon met de vraag 'wat is de functie van een bepaalde structuur of een bepaald orgaan?'. Beroemd is de ontdekking van de bloedsomloop door Harvey. Harvey startte zijn onderzoek met te vragen waartoe het hart dient (Resnik, 1995).

Ik zal hier twee voorbeelden geven van biologisch onderzoek waarin functionele overwegingen een belangrijke rol speelden. Het eerder genoemde onderzoek van Hasting (1971) naar de fotofoor van de ponyvis werd door het ontwerpidee gestuurd. Ook bij sommige andere vissoorten was al waargenomen dat ze een lichtproducerend orgaan bezitten. Onderzoek naar dergelijke organen is begonnen omdat niet onmiddellijk duidelijk was waarvoor dergelijke structuren konden dienen. Wat hebben vissen aan een diffuus verlichte buik? Onderzoek naar de omgeving waarin de vis zich bevond, bracht onderzoekers op het idee dat de fotofoor wellicht diende voor camouflage. Men stelde vervolgens een aantal eisen op waaraan de fotofoor zou moeten voldoen, wilde hij deze functie kunnen vervullen. Ten eerste moest de fotofoor niet knipperen maar continu branden en moest het licht zo worden gecontroleerd dat het silhouet van de vis goed werd uitgewist. Ten tweede mocht de fotofoor 's nachts niet schijnen. Sectie en gedragsonderzoek in aquaria bevestigde dat aan deze eisen werd voldaan. Maar dat niet alleen. Men verkreeg zo ook inzicht in andere aspecten van de fotofoor en de omgeving, zoals het moment van aan-en uitgaan, het lichtspectrum dat de bacteriën produceren en de reflecterende laag van de zwemblaas.

Een ander onderzoek waarbij het idee van optimaal ontwerp een rol heeft

gespeeld, is het onderzoek van Karl von Frisch naar kleuren zien bij bijen (Dawkins, 1995). Lang voor zijn baanbrekende werk over de bijendans ging Von Frisch in tegen het heersende idee dat bijen kleurenblind zouden zijn. De aanzet tot de experimenten waarmee hij het bewijs leverde, werd ingegeven door de eenvoudige observatie dat bloemen die door bijen worden bestoven, vaak prachtige kleuren hebben. Hij vroeg zich af waarom bloemen kleuren zouden hebben als bijen kleurenblind zijn. Middels experimenten ontdekte hij toen dat bijen wel kleuren kunnen zien. Meer gedetailleerd onderzoek wees uit dat ze een ander deel van het spectrum zien dan wij. Rood licht kunnen ze bijvoorbeeld niet zien, maar kortere golflengten als ultraviolet wel. Deze ontdekking leidde hem weer opnieuw naar de bloemen. Waarom zouden bijen ultraviolet licht kunnen waarnemen? Zouden bloemen zich hier wellicht in onderscheiden? Von Frisch nam toen ultravioletfoto's van bloemen. Toen bleek dat bloemen stippen en patronen vertonen die wij niet zien, maar die bijen naar de nectariën leiden. Ook dit voorbeeld laat zien dat de aanname dat alle eigenschappen een functie vervullen, leidt tot ontdekkingen van aspecten van een systeem en zijn omgeving die anders wellicht niet waren opgemerkt. Impliciet spelen in bovengenoemde voorbeelden ook optimaliteitsoverwegingen een rol. De hypothese dat de fotofoon zou dienen om de vis bij te schijnen werd onmiddellijk verworpen, omdat een verlichte buik deze functie slecht vervult.

In een onderzoeksprogramma binnen de evolutiebiologie wordt expliciet gebruik gemaakt van het idee van optimaal ontwerp. Dit onderzoeksprogramma staat bekend onder de naam adaptationistisch programma (Sober, 1993; Ridley, 1993). In dit programma gaat men na wat de adaptieve functie is van een eigenschap. Men wil dus niet alleen vaststellen waartoe een eigenschap dient (functie) maar ook waarom een eigenschap is geselecteerd. Een eigenschap die door selectie tot stand is gekomen, noemt men een adaptatie. Twee aannames liggen aan dit onderzoeksprogramma ten grondslag: (1) Alle eigenschappen zijn door natuurlijke selectie tot stand gekomen, en (2) Natuurlijke selectie leidt tot optimale ontwerpen. Voor verschillende eigenschappen gaat men na waarom ze zijn geselecteerd⁷. Waarom heeft een bepaalde huisjesslak gekleurde strepen op zijn schelp? Waarom leggen bepaalde vogels vier eieren en niet twee of meer?

⁷ De vraag waarom een eigenschap is geselecteerd, kan meerdere antwoorden hebben (Kitcher, 1993). Elke complexe eigenschap is namelijk in een geleidelijk, evolutionair proces tot stand gekomen (2.2.2). Het is dan ook goed voorstelbaar dat de eigenschap in het begin van zijn evolutionaire ontwikkeling een andere adaptieve functie vervulde dan die hij nu vervult. Zo zijn veren van vogels in hun eerste evolutionaire fase waarschijnlijk geselecteerd voor thermoregulatie. Pas veel later zijn vleugels geselecteerd voor vliegen. In evolutiebiologie wordt dan ook veelal een onderscheid gemaakt tussen studies die de historie van een eigenschap bestuderen en studies die nagaan waarom een bepaalde eigenschap in de huidige populaties behouden blijft (Ridley, 1993).

Waarom planten vele soorten zich geslachtelijk voort en niet ongeslachtelijk? Waarom is de man-vrouw verhouding in een zich sexueel voortplantende populatie vaak één op één? Met name eigenschappen die in eerste instantie geen adaptieve functie lijken te hebben, zoals het strepenpatroon van een slak, en eigenschappen die meer nadelen lijken te hebben dan hun alternatief, zoals sex, zijn de interessante problemen binnen dit onderzoeksprogramma⁸.

Binnen het adaptationistische programma is ook een heuristiek geformuleerd waarmee men oplossingen voor dergelijke problemen kan formuleren en toetsen. Ik noem dit een ontwerpheuristiek omdat kennis wordt ontwikkeld door biologische systemen, als het ware, opnieuw te ontwerpen. Dawkins (1995) illustreert het gebruik van de ontwerpheuristiek aan de hand van een eenvoudig niet-biologisch voorbeeld. Stel dat iemand die is opgegroeid in het computertijdperk een rekenliniaal vindt en zich afvraagt waar dit ding voor dient. Wellicht dat hij in eerste instantie denkt dat het een handig voorwerp is om lijnen mee te trekken of boter mee op de boterham te smeren, maar de veronderstelling van elk van deze functies is in strijd met het optimaliteitsprincipe. Een eenvoudige liniaal en een botermesje hebben geen glijder en geen knop in het midden nodig. Wanneer hij nauwkeuriger de lijntjes opmeet, blijken ze precies een logaritmische schaal te volgen die te zorgvuldig is uitgewerkt om toevallig te kunnen zijn. Vervolgens komt hij misschien op het idee dat een dergelijk patroon, in een tijd dat er nog geen rekenmachines waren, een ingenieuze truc was om snel te kunnen vermenigvuldigen en delen.

In de ontwerpheuristiek die evolutiebiologen hanteren, kunnen een aantal stappen worden onderscheiden (Parker & Maynard Smith, 1990; Ridley, 1993). Men formuleert eerst tentatief het adaptieve probleem waarvoor men verwacht dat de betreffende eigenschap een optimale oplossing is. Dan bedenkt men alternatieve, biologisch mogelijke, oplossingen. Voor elk van deze alternatieven wordt nagegaan wat de nadelen zijn. Vervolgens gaat men kwalitatief of kwantitatief na wat de optimale oplossing is voor het gegeven probleem. Tenslotte wordt onderzocht of de op deze wijze vastgestelde optimale oplossing overeenkomt met de werkelijkheid. Indien deze overeenkomt, gaat men er vanuit dat men de adaptatie heeft begrepen. Wanneer de optimale oplossing niet overeenkomt met de werkelijke oplossing, gaat men er vanuit dat het adaptieve probleem, de biologische beperkingen en dus de set van mogelijke oplossingen, of de nadelen verkeerd zijn ingeschat en wordt de procedure met andere aannames herhaald.

Orian et al. (1978) gebruikten deze ontwerpheuristiek om het voedsel-

⁸ Vele voorbeelden op het terrein van de morfologie en gedrag van organismen worden beschreven door Alexander (1996) in zijn 'Optima for animals'. Toepassingen van dit programma in de evolutionaire psychologie worden beschreven door Barkow et al. (1992) in hun bundel 'The adapted mind' en in Pinker (1998).

zoekgedrag van sommige vogels beter te begrijpen. Vogels moeten hun nest verlaten om voedsel te zoeken voor hun jongen. Zij gingen er vanuit dat vogels bij het voedselzoeken hun netto energie-inname zouden maximaliseren. De netto energie-inname is afhankelijk van de grootte van het voedselitem en de weg die de vogel moet afleggen om het voedsel op te halen. Wanneer een vogel alle voedselitems zou meenemen die het tegen zou komen, dan zou het energieverlies van de tocht groter kunnen zijn dan de energiewinst die het aan het voedsel kan ontleen. Omgekeerd als de vogel alleen de grootste voedselitems meeneemt dan moet hij te lang zoeken, zodat dit opnieuw te veel energie zou kosten. Orian et al. bepaalden kwantitatief de optimale voedselgrootte en vonden dat vogels inderdaad hun voedselgrootte niet random kiezen, maar een voedselgrootte kiezen in de buurt van de berekende optimale grootte. Ze blijken echter niet precies de optimale grootte te kiezen. Hun verklaring hiervoor was dat voedselzoekgedrag waarschijnlijk een compromis is tussen maximaliseren van de netto energie-opname en het niet te lang wegblijven van het nest in verband met het gevaar van predatie.

2.2.4 Kritiek op ontwerpen in biologisch onderzoek

In de evolutiebiologie wordt ontwerpen in het algemeen beschouwd als een vruchtbare heuristiek (Parker & Maynard Smith, 1990; Ridley, 1993). Maar er is ook kritiek gekomen op het onderzoeksprogramma. De belangrijkste kritiek is verwoord door Gould en Lewontin (1979). Zij hebben de beide aannames die ten grondslag liggen aan het programma, bekritiseerd en hiermee niet alleen het ontwerpen in de context van evolutiebiologie, maar in alle takken van de biologie ter discussie gesteld.

Gould en Lewontin menen dat adaptationisten er ten onrechte vanuit gaan dat alle eigenschappen door natuurlijke selectie tot stand zijn gekomen. Natuurlijke selectie is niet het enige evolutionaire mechanisme. Wanneer er bijvoorbeeld genoeg tijd verstrijkt en de populatie klein is, kunnen in een populatie door toevalsfactoren eigenschappen in frequentie toenemen of worden behouden zonder dat selectie hierbij een rol speelt (genetic drift). Sommige eigenschappen zijn niet aanwezig omdat voor deze eigenschap is geselecteerd, maar omdat ze het bijproduct zijn van eigenschappen waarvoor wel is geselecteerd. De witte kleur van botten is zo'n bijproduct. Botten bestaan uit calciumzouten die het bot wit kleuren. Selectie vindt plaats op calcium en niet op de kleur.

Voorstanders van het adaptationistisch programma erkennen dat er meerdere mechanismen verantwoordelijk zijn voor de evolutie van eigenschappen (Cronin, 1991; Parker & Maynard Smith, 1990). Zij zoeken echter eerst naar een selectieve verklaring voor een eigenschap en pas in tweede instantie naar een niet-selectieve verklaring. Daarbij wijzen ze erop dat natuurlijke selectie het enige bekende mechanisme is dat complexe ontwerpen tot stand kan bren-

gen (Dawkins, 1987). De andere mechanismen zijn alle toevalsprocessen in de zin dat functionaliteit van een eigenschap geen rol speelt bij behoud of verdwijnen van de eigenschap (zie 2.2.1). Wanneer we dus een complex ontwerp aantreffen in de natuur moet natuurlijke selectie wel verantwoordelijk zijn voor het voorkomen van deze eigenschap. Daarbij doen zich wel weer problemen voor. Immers, hiermee is nog niet vastgesteld of natuurlijke selectie volledig verantwoordelijk is voor de aanwezigheid van de betreffende eigenschap. Andere mechanismen kunnen ook een rol hebben gespeeld en het is niet eenvoudig dit na te gaan (Orzack & Sober, 1994).

Gould en Lewontin hebben ook de optimaliteitsaannname zoals deze wordt gehanteerd binnen het adaptationistische programma bekritiseerd. De optimale oplossing is de beste oplossing uit een set van alternatieven. Nu weet men meestal niet welke alternatieven daadwerkelijk in een populatie zijn voorgekomen. Er zal dus een inschatting moeten worden gemaakt van wat mogelijk is geweest. Adaptationisten erkennen dat natuurlijke selectie niet leidt tot de tot best denkbare ontwerpen. Zij houden bij het opstellen van alternatieven rekening met omgevingsbeperkingen en systeembeperkingen (zoals fysische en chemische wetmatigheden). Ze gaan er echter vanuit dat binnen deze grenzen de meeste denkbare alternatieven ook kunnen zijn ontstaan. Deze invulling van optimaliteit doet volgens Gould en Lewontin (1979) denken aan dr. Pangloss, een creatie van Voltaire. Dr. Pangloss ging er vanuit dat alles gebeurde omdat dit het best mogelijke was dat gebeuren kon.

All this is a manifestation of the rightness of things, since if there is a volcano at Lisbon it could not be anywhere else. For it is impossible for things not to be where they are, because everything is for the best.(p. 258).

Volgens Gould en Lewontin houden adaptationisten er onvoldoende rekening mee dat de set van alternatieve eigenschappen tevens wordt begrensd door de evolutie en ontogenie van het organisme. Een goed voorbeeld van een evolutionaire beperking treffen we aan bij het menselijk oog. Dit wordt veelal beschouwd als een standaardvoorbeeld van een optimaal ontwerp, maar het vertoont ook kenmerken die een rationeel ontwerper niet zou hebben ingebouwd (Williams, 1996). Zo lopen de zenuwvezels van de kegeltjes en staafjes in het netvlies niet naar achteren richting hersenen, maar naar voren, in de richting van de lichtbron de oogkamer in. Binnen het oog moeten ze zich eerst bundelen tot de oogzenuw voor ze via een gat in het netvlies weer naar buiten gaan. Hoewel de afschermdende laag microscopisch dun is, gaat er toch wat licht verloren in die laag van zenuwvezels en bloedvaten. Daar waar de oogzenuw via een gat naar buiten gaat, is het oog blind. Het oog zou zijn (adaptieve) functie beter kunnen vervullen, indien de zenuwen de oogbol aan de kant van de her-

senen zouden verlaten. Systeem- en omgevingsbeperkingen verhinderen niet dat een dergelijk alternatief kan ontstaan. Onze vroegste geschiedenis als gewervelde maakte het ontstaan van dit alternatief echter onmogelijk. Het is daardoor ook zeer onwaarschijnlijk dat we nog ooit een beter oog kunnen ontwikkelen, omdat elke afwijking van dit 'locale optimum' waarschijnlijk lagere overlevingskansen heeft dan andere alternatieven binnen de populatie. De evolutionaire geschiedenis kan er zelfs toe leiden dat er in organismen eigenschappen voorkomen die nu geen functie meer vervullen. Wij bezitten bijvoorbeeld 'losse' pezen in onze hand en in de kuit en in onze hals bevinden zich resten van kieuwweefsel (Ridley, 1993). Gould en Lewontin wijzen er op dat, wanneer adaptationisten bij het opstellen van mogelijke alternatieven geen rekening houden met deze evolutionaire en ontogenetische beperkingen dit kan leiden tot foutieve toekenningen van adaptieve functies of tot het vruchteloos bijstellen van adaptieve functies. Men gaat er dan ten onrechte vanuit dat men de omgeving of adaptieve functie nog niet goed heeft begrepen, terwijl eigenlijk de set van alternatieven verkeerd is ingeschat.

De voorstanders van het adaptationistisch programma zijn het met Gould en Lewontin eens dat je rekening moet houden met deze evolutionaire en ontogenetische beperkingen (Parker & Maynard Smith, 1990; Dennett, 1995). Het probleem is echter dat van te voren vaak niet duidelijk is of deze een rol spelen en om welke het gaat. Zou je immers alle beperkingen van te voren al weten dan zou het opnieuw ontwerpen van de eigenschap niet nodig zijn. Adaptationisten wijzen erop dat men middels de ontwerpheuristiek wel evolutionaire en ontogenetische beperkingen op het spoor kan komen. Als een voorspelling namelijk niet overeenkomt met de werkelijkheid kan dit er op wijzen dat deze beperkingen de set van alternatieven begrenzen. Dit kan dan leiden tot aanvullend onderzoek naar de evolutionaire geschiedenis van een eigenschap waarbij ook van andere heuristieken gebruik kan worden gemaakt (Griffith, 1996). Er zal vervolgens een nieuwe hypothese moeten worden opgesteld uitgaande van een andere set van alternatieven.

We kunnen dus concluderen dat de kritiek van Gould en Lewontin op de aannames van het adaptationistisch programma niet heeft geleid tot het verbanen van het ontwerpen uit de evolutiebiologie maar tot zorgvuldiger toepassen van de heuristiek (Ridley, 1993). Dennett (1995) eindigt zijn bespreking van het adaptationisme dan ook met:

Adaptationism is both ubiquitous and powerful in biology. Like any other idea, it can be misused, but it is not a mistaken idea; it is in fact the irreplaceable core of Darwinian thinking. Gould en Lewontin's fabled refutation of adaptationism is an illusion, but they have raised everybody's consciousness about the risks of incautious thinking. Good adaptationistic thinking is always on the lookout for hidden constraints, and in fact is the best method for uncovering them. (p. 261)

Het idee van organismen als optimaal ontwerp en de daarvan afgeleide ontwerpheuristiek sturen (evolutie-)biologen dus bij het ontwikkelen van kennis. In 2.3.1. ga ik na of deze heuristiek ook leerlingen kan helpen bij de ontwikkeling van kennis over de functie en werking van biologische systemen van moleculair tot organismaal niveau.

2.3 Ontwerpend leren

Verkenning van een constructivistische visie op leren en onderwijzen en een visie op organismen als optimaal ontwerp heeft een aantal globale richtlijnen opgeleverd voor de inrichting van biologieonderwijs waarin leerlingen zelf een bijdrage leveren aan kennisontwikkeling. In deze paragraaf worden deze richtlijnen geïntegreerd, aangepast en uitgewerkt tot de domeinspecifieke onderwijsbenadering ontwerpend leren. Centraal idee van ontwerpend leren is dat leerlingen kennis kunnen ontwikkelen over biologische systemen door deze 'opnieuw' te ontwerpen. De domeinspecifieke onderwijsbenadering bestaat uit vier componenten die hier achtereenvolgens zullen worden beschreven en verantwoord. In 2.3.1 wordt de eerder geschetste ontwerpheuristiek aangepast voor leerlingen. In 2.3.2 worden de doelen gespecificeerd die ik met ontwerpend leren nastreef. Vervolgens wordt beschreven hoe ontwerpend leren zou moeten worden ingericht en uitgevoerd om deze doelen te realiseren (2.3.3). Tenslotte ga ik na hoe scenario's met de gewenste kenmerken kunnen worden ontwikkeld (2.3.4).

2.3.1 Een ontwerpheuristiek voor leerlingen

Ik ben op zoek naar een heuristiek waarmee leerlingen kennis kunnen ontwikkelen over de functie en werking van biologische systemen van moleculair tot organismaal niveau. Daarbij zal de heuristiek voornamelijk richting moeten geven aan het zoeken in relevante voorkennis. De ontwerpheuristiek die evolutiebiologen gebruiken bij kennisontwikkeling is wellicht ook geschikt voor leerlingen. Leerlingen beschikken echter over andere voorkennis dan evolutiebiologen en ze ontwerpen met een ander doel. Evolutiebiologen gebruiken de heuristiek om na te gaan waarom een eigenschap is geselecteerd (adaptieve functie), terwijl bij leerlingen de ontwikkeling van kennis over de functie en werking van biologische systemen centraal staat.

De ontwerpheuristiek zal dan ook moeten worden aangepast voor de leerlingen. Daarvoor ga ik eerst na waarom het idee van optimaal ontwerp een heuristische waarde heeft. Dit maakt het mogelijk de voorkennis van de leerlingen nader te omschrijven en geeft aanwijzingen voor de benodigde aanpassingen. Simon (1996) maakt de heuristische waarde van het idee op de volgende manier inzichtelijk. Het idee van optimaal ontwerp veronderstelt dat een biologisch systeem zo is ingericht dat het zijn functie kan vervullen in de betreffen-

de omgeving. Dit betekent dat kennis over de functie en de omgeving ons inzicht kan verschaffen in het systeem. Zo kunnen we voorspellen wat de kleur van een poolvos zal zijn wanneer we weten dat hij voorkomt in een wit landschap (omgeving) en niet mag opvallen voor prooidieren (functie). Omgekeerd geldt dat kennis over het systeem en de functie ons informatie kan verschaffen over de omgeving. In het eerder genoemde onderzoek van Von Frisch (2.2.3) naar kleurenzien van bijen wordt van beide voordelen gebruik gemaakt. Von Frisch ging er vanuit dat bijen waren aangepast voor het bestuiven van bloemen. Het feit dat bloemen vaak prachtige kleuren hebben, deed hem vermoeden dat bijen kleuren konden zien (omgeving→systeem). Toen hij eenmaal had vastgesteld dat bijen onder meer ultraviolet licht konden waarnemen leidde dit hem weer naar de bloemen. Hij vond dat bloembladeren ultraviolette patronen droegen die de bijen naar de nectariën leidden (systeem→omgeving).

Over welke kennis van systeem, functie en omgeving beschikken leerlingen bij aanvang van het onderwijs over een bepaald biologisch systeem? Leerlingen hebben nauwelijks kennis over de werking van het systeem. In ieder geval is deze kennis onvolledig en in sommige gevallen ook gefragmenteerd en niet adequaat (2.1.1). Leerlingen hebben vaak wel een globaal idee van de functie van het systeem als geheel. Ze weten bijvoorbeeld dat het hart zorgt voor het circuleren van het bloed en dat het immuunsysteem ons beschermt tegen ziekteverwekkers. Bovendien beschikken leerlingen vaak over relevante kennis van de omgeving van het systeem. Ze weten bijvoorbeeld dat het hart bloed laat rond stromen in het bloedvatstelsel.

Hoe kunnen leerlingen deze voorkennis gebruiken bij het ontwikkelen van kennis over een biologisch systeem? Evenals (evolutie-)biologen kunnen leerlingen beginnen met het formuleren van een ontwerpprobleem. Deze stap is relatief eenvoudig omdat de functie van het systeem als geheel veelal bekend is. Deze functie kan worden geherformuleerd in een ontwerpprobleem. De functie van het hart kan bijvoorbeeld worden geherformuleerd in het probleem: Hoe kan er voor worden gezorgd dat het bloed circuleert in het bloedvatstelsel?

Vervolgens zullen leerlingen meerdere oplossingen voor het probleem moeten bedenken en moeten bepalen wat de optimale oplossing is. Nu zijn de biologische systemen waarover leerlingen kennis moeten verwerven vaak complex; ze bestaan uit vele onderdelen die op een niet-eenvoudige wijze met elkaar samenwerken. Het immuunsysteem is hiervan een goed voorbeeld. Wanneer een ontwerpprobleem een dergelijke complexe oplossing heeft, kunnen we niet van leerlingen verwachten dat ze deze in een keer kunnen bedenken. Leerlingen zullen dan ook stap voor stap deze oplossing moeten gaan samenstellen. De leerling kan hiervoor zijn kennis van de omgeving gebruiken. Deze zou hij kunnen inzetten bij het genereren van (deel-)oplossingen. In dit

geval activeert hij eerst zijn voorkennis over de omgeving, zodat een lijstje met voorwaarden kan worden opgesteld waaraan de oplossing moet voldoen. Dit is echter niet eenvoudig. Een leerling weet vaak nog niet van te voren welke kennis van de omgeving relevant is. En als er al een lijst van voorwaarden zou kunnen worden opgesteld, is het vervolgens moeilijk een oplossing te bedenken die hieraan voldoet. Het is dan ook eenvoudiger eerst een (of meerdere) oplossing(-en) te bedenken zonder rekening te houden met deze voorwaarden en vervolgens te toetsen of de oplossing voldoet aan voorwaarden die door de omgeving worden gesteld. De leerling kan zijn kennis over de omgeving activeren door zich af te vragen wat de nadelen zijn van de betreffende oplossing voor het overleven van het organisme als geheel. Nemen we als voorbeeld een leerling die een oplossing wil bedenken voor het probleem hoe een binnengedrongen ziekteverwekker onschadelijk kan worden gemaakt. Hij kan bijvoorbeeld denken aan een soort eetcel die de bacterie opeet en onschadelijk maakt, of aan een stof die een bacterie lek kan prikken. Wanneer de leerling nagaat wat het nadeel is van deze oplossingen, kan hij ontdekken dat in beide gevallen ook lichaamseigen materiaal kan worden aangevallen. De leerling wordt zich zo bewust van de omgeving waarin het immuunsysteem functioneert en welke voorwaarden deze stelt aan het systeem.

Wanneer nu enkele alternatieve oplossingen zijn bedacht en de nadelen hiervan zijn vastgesteld, kan de best mogelijke oplossing worden gekozen (i.c. de oplossing met de minste nadelen). Keren we weer terug naar ons voorbeeld. De eetcel en de stof hebben beide als nadeel dat ook lichaamseigen materiaal kan worden aangevallen. De stof heeft bovendien als nadeel dat gifstoffen uit de bacterie vrij kunnen komen nadat de bacterie is lekgeprikt. Deze stoffen kunnen dan alsnog schade aanrichten. De eetcel lijkt in dit geval dan ook de oplossing met de minste nadelen te zijn.

Hiermee heeft de leerling slechts een onderdeel van het immuunsysteem bepaald. Het ontwerpproces kan echter worden voortgezet door het nadeel van deze oplossing weer te herformuleren in een nieuw ontwerpprobleem. Hoe kan worden voorkomen dat de eetcel ook lichaamseigen materiaal aanvalt? Hier kunnen dan opnieuw enkele oplossingen voor worden bedacht en de beste kan worden uitgekozen. Het nadeel van deze oplossing kan weer worden geherformuleerd in een nieuw probleem. Deze cyclus kan worden herhaald totdat de gewenste kennis over het systeem is ontwikkeld. Stapsgewijs wordt zo de kennis over het systeem ontwikkeld. In elke stap wordt ook kennis over de omgeving geëxpliciteerd en daarmee worden de voorwaarden bepaald waaraan het systeem moet voldoen. Op deze manier kan een systeem worden ontworpen dat de vereiste functie vervult in zijn omgeving met zo min mogelijk nadelen. In figuur 2.3.1 wordt de ontwerpheuristiek voor leerlingen beschreven.

-
- 1 Bepaal de functie van het systeem als geheel
 - 2 Formuleer het ontwerpprobleem
 - 3 Bedenk meerdere oplossingen voor het ontwerpprobleem
 - 4 Bedenk voor iedere oplossing één of meerdere nadelen
 - 5 Kies de oplossing met de minste nadelen en ga naar 2.
-

Figuur 2.3.1

Ontwerpheuristiek voor leerlingen

Ik verwacht dat leerlingen met behulp van deze ontwerpheuristiek kennis kunnen ontwikkelen over biologische systemen. De heuristiek doet daarbij voornamelijk een beroep op voorkennis over de systeemomgeving. Leerlingen kunnen deze voorkennis activeren en gebruiken bij het uitbreiden en bijstellen van hun kennis over het systeem. De leerlingen hebben veelal voldoende kennis over de systeemomgeving. Er zijn soms echter ook systeem-, evolutionaire en ontogenetische beperkingen die het aantal mogelijke oplossingen begrenzen. De leerlingen beschikken veelal niet over voldoende kennis van deze zogenaamde SEO-beperkingen. Deze ontbrekende kennis zal de docent moeten aanbieden. Bovendien zal hij uiteindelijk moeten aangeven of de optimale (deel-)oplossing die leerlingen hebben bedacht ook overeenkomt met de wetenschappelijk geaccepteerde oplossing. Het is namelijk veelal niet mogelijk leerlingen hun oplossingen empirisch te laten toetsen. De benodigde objecten en instrumenten zijn in een reguliere klas vaak niet aanwezig. Bovendien ontbreekt hiervoor vaak de tijd (2.1.1).

In 2.3.3 ga ik nader in op de wijze waarop de docent de bovengenoemde taken kan vervullen. Alvorens deze rol nader te specificeren zal ik eerst omschrijven welke doelen ik met ontwerpend leren tracht te bereiken.

2.3.2 Doelstellingen van ontwerpend leren

De globale doelen die ik in de inleiding voor het biologieonderwijs heb geformuleerd, kunnen nu nader worden gespecificeerd. Ik wil het onderwijs zo inrichten dat leerlingen de functie en werking van een biologisch systeem leren begrijpen en met de ontwerpheuristiek leren werken. Ik ga er vanuit dat de leerling een biologisch systeem heeft begrepen, wanneer hij de volgende vier vragen over een systeem en zijn onderdelen kan beantwoorden:

- welke functie wordt vervuld?
- hoe wordt de functie vervuld?
- waarom is het nodig dat de functie wordt vervuld?
- waarom wordt de functie zo beter vervuld dan door alternatieven?

Ik zal deze vragen aan de hand van een onderdeel van het immuunsysteem illustreren. Een leerling dient na afloop van de lessenserie te weten dat een macrofaag (soort eetcel) bacteriën onschadelijk maakt (vraag 1). Dat hij dit

doet middels fagocytose (vraag 2). Bovendien dient hij te weten dat het onschadelijk maken van bacteriën noodzakelijk is omdat bacteriën schadelijke gifstoffen produceren en dat middels gedrag (hygiëne) en onze lichamelijke barrières (bijvoorbeeld de huid) niet kan worden voorkomen dat bacteriën ons lichaam binnendringen (vraag 3). Tenslotte dient een leerling enkele alternatieven te hebben overwogen (bijvoorbeeld lekprikken of inkapselen) voor het vervullen van de functie en dient hij aan te kunnen geven waarom de macrofaag deze functie beter vervult (i.c. met minder nadelen) (vraag 4).

De eerste twee vragen verwijzen respectievelijk naar de functie en werking van het systeem en z'n onderdelen. Deze vragen sluiten aan bij de eindtermen van het huidige biologieonderwijs. Van leerlingen wordt in het algemeen niet gevraagd dat ze ook vraag 3 en 4 kunnen beantwoorden. Om twee redenen vind ik het belangrijk dat leerlingen dit toch kunnen. Ten eerste biedt deze kennis leerlingen de mogelijkheid hun kennis over de werking en functie van het systeem functioneel te verantwoorden. Ze weten nu niet alleen dat het systeem zo in elkaar zit, maar kunnen ook argumenten geven waarom dit zo moet zijn. Dit geeft hen niet alleen de mogelijkheid hun eigen kennis te bekritisseren, het biedt ook de mogelijkheid een kritische houding aan te nemen ten opzichte van de wetenschappelijk geaccepteerde kennis die uiteindelijk wordt verworven (2.1.3). Ze leren de werking en functie van het systeem dus niet als een dogma, maar kunnen de adequaatheid van deze kennis tot op zekere hoogte zelf beoordelen. Tot op zekere hoogte omdat hun oplossingen wel worden getoetst aan reeds verworven kennis en de optimaliteitsaanname, maar niet empirisch worden getoetst.

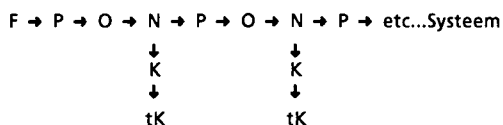
Ten tweede leidt kennis over waarom een functie nodig is en waarom de functie zo wordt vervuld er toe dat kennis van het systeem en van zijn omgeving is geïntegreerd. Een leerling die weet dat bacteriën onschadelijk moeten worden gemaakt, omdat bacteriën gifstoffen produceren en omdat niet kan worden voorkomen dat ze binnenkomen, heeft een relatie gelegd tussen het immuunsysteem en de omgeving (i.c. toegangswegen of barrières tot het menselijk lichaam). Een leerling die vervolgens voor het vervullen van deze functie alternatieven heeft afgewogen en daar de nadelen van heeft geformuleerd, legt hiermee opnieuw relaties tussen het systeem en de omgeving. Een leerling die bijvoorbeeld heeft ontdekt dat een stof die de bacterie 'lekprikt' er toe kan leiden dat ook lichaamseigen cellen worden aangevallen heeft hiermee een relatie gelegd tussen het immuunsysteem en zijn omgeving. Leerlingen dienen dus alle vier de vragen over een biologisch systeem te kunnen beantwoorden opdat ze een geïntegreerd beeld krijgen over het systeem en de omgeving en deze kennis ook functioneel kunnen verantwoorden.

Ik wil leerlingen niet alleen kennis laten verwerven over een biologisch systeem. Ik wil ook dat ze met de ontwerptheorie leren werken. Ik vind het

belangrijk dat leerlingen dit leren omdat ze hiermee de hierboven beschreven kennis over biologische systemen zelfstandig kunnen verwerven. De ontwerpheuristiek helpt ze hun eigen voorkennis uit te breiden en bij te stellen in de richting van de gewenste kennis. Ik beschouw daarbij de ontwerpheuristiek vooral als nuttig hulpmiddel voor het verwerven van kennis die biologen reeds hebben ontwikkeld. Slechts enkele leerlingen zullen in de toekomst de ontwerpheuristiek ook gebruiken om een bijdrage te leveren aan de ontwikkeling van nieuwe kennis over biologische systemen. Leren gebruiken van de ontwerpheuristiek is echter niet alleen een middel om adequate kennis te verwerven, het is ook een doel op zich. De ontwerpheuristiek representeert immers een manier van denken die in de biologie veel wordt gebruikt. Het geeft aan hoe (bepaalde) biologen problemen genereren en hypothesen hiervoor opstellen en (theoretisch) toetsen. Het is van belang dat leerlingen hier kennis van nemen.

2.3.3 Inrichting en uitvoering van ontwerpend leren

Nu is vastgesteld welke doelen ik met ontwerpend leren wil bereiken, kan worden nagegaan hoe deze doelen kunnen worden gerealiseerd. Richtlijnen ontleend aan probleemstellend onderwijs en het meester-gezel model worden hiervoor verder uitgewerkt. Een aantal fasen kan worden onderscheiden (figuur 2.3.2). Ik heb richtlijnen geformuleerd die specifiek zijn voor een fase en richtlijnen die betrekking hebben op meerdere fasen. De faseoverstijgende richtlijnen zullen hier eerst worden besproken.



Figuur 2.3.2

Inrichting en uitvoering van ontwerpend leren

- 1 Introductie van de functie van het systeem (F)
- 2 Introductie van het ontwerpprobleem (P)
- 3 De leerlingen bedenken oplossingen en nadelen (→ O → N)
- 4 Docent biedt aanvullende kennis over het systeem aan (K)
- 5 De leerlingen passen verworven kennis over het systeem toe (tK)
- 6 Ga naar 2 tot de gewenste kennis over het systeem is ontwikkeld (Systeem)

Faseoverstijgende richtlijnen

Ik heb richtlijnen geformuleerd voor het leren begrijpen van een biologisch systeem en voor het leren werken met de ontwerpheuristiek.

Leren begrijpen van een biologisch systeem

Voor het verwerven van kennis heb ik eerder gekozen voor een probleemstellende aanpak (2.1.3). Dat wil zeggen dat het onderwijs zo is ingericht dat leerlingen, zoveel mogelijk door eigen problemen gestuurd, uitkomen bij de gewenste kennis. Bij ontwerpend leren ontwikkelen leerlingen kennis over biologische systemen door deze onder begeleiding van de docent te ontwerpen. Daarvoor gaan ze eerst na wat de functie is van het systeem als geheel en waarom het nodig is dat deze functie wordt vervuld. Ik verwacht dat deze fase leidt tot een globale motivering voor het onderwerp. Stapsgewijs wordt vervolgens nagegaan hoe deze hoofdfunctie kan worden vervuld. In elke stap bedenken leerlingen middels afweging van alternatieven een oplossing voor een (deel)-probleem. Bovendien bedenken ze een nadeel van deze oplossing. Dit nadeel wordt geherformuleerd in het probleem waaraan in de volgende stap wordt gewerkt. Hierdoor verwacht ik dat leerlingen ook lokaal gemotiveerd zijn. Wanneer leerlingen op deze manier kennis ontwikkelen over een biologisch systeem, leren ze niet alleen de werking en functie van het systeem en zijn onderdelen, maar leren ze ook waarom het nodig is dat de functie wordt vervuld en waarom de functie zo beter wordt vervuld dan door alternatieven.

Leren werken met de ontwerpheuristiek

Voor het leren van de heuristiek heb ik gekozen voor het meester-gezel model (2.1.4). Dit betekent o.a. dat leerlingen de heuristiek aanleren in de context waarin ze hem ook gebruiken. Leerlingen leren de ontwerpheuristiek door zelf een biologisch systeem te ontwerpen onder begeleiding van de docent. Voordat de functie van het systeem wordt geïntroduceerd, demonstreert de docent hoe de ontwerpheuristiek kan worden gebruikt. Daarbij is het van belang dat de docent zijn denkprocessen expliciteert. Alleen dan is het voor leerlingen mogelijk een goed beeld op te bouwen van de wijze waarop met de ontwerpheuristiek kan worden gewerkt. Vervolgens gaan leerlingen met elkaar ontwerpen. Ik verwacht dat ze daarbij elkaar ook stimuleren tot het werken met de ontwerpheuristiek door elkaars oplossingen te bekritisieren en door elkaar ontwerp vragen te stellen (welke oplossing heb je?; wat is het nadeel?; wat is de oplossing met de minste nadelen?). De docent begeleidt leerlingen bij het werken met de ontwerpheuristiek. Hij stimuleert hen de heuristiek te gebruiken door ontwerp vragen te stellen en geeft feedback over het gebruik van de heuristiek. Ik verwacht dat deze feedback na verloop van tijd minder nodig is omdat leerlingen zelfstandig met de heuristiek kunnen werken.

Fasespecifieke richtlijnen

Hieronder worden de richtlijnen voor de vijf fasen van het onderwijsleerproces besproken (figuur 2.3.2). Alleen de eerste fase wordt maar een keer doorlopen, de overige fasen meerdere malen.

1. Introductie van de functie van het systeem

Leerlingen zullen veelal al een globaal idee hebben van de functie van het systeem. In deze fase wordt de functie van het systeem nader gespecificeerd en wordt nagegaan waarom de functie moet worden vervuld. De docent introduceert daarvoor eerst de globale functie van het systeem waaraan ze gaan werken. Hij kan de leerlingen vervolgens vragen welk probleem er voor het organisme ontstaat als de functie niet zou worden vervuld. Wat zou er bijvoorbeeld gebeuren wanneer we niet worden beschermd tegen ziekteverwekkers? Vervolgens kan leerlingen worden gevraagd wat de meest eenvoudige manier is om dit probleem te voorkomen. Kunnen we de ziekteverwekker bijvoorbeeld niet buiten ons lichaam houden? Wanneer leerlingen ontdekken dat deze oplossingen onvoldoende zijn, krijgen ze een specifiek beeld van de functie die het systeem vervult, i.c. het onschadelijk maken van binnengedrongen ziekteverwekkers, en waarom het nodig is dat deze functie wordt vervuld. Ik verwacht dat deze introductie leerlingen een globale motivering verschaft voor het onderwerp. Leerlingen weten nu waaraan in de komende lessen wordt gewerkt en ik verwacht dat ze het ook zinvol vinden hieraan te gaan werken.

2. Introductie van het ontwerpprobleem

De functie van het systeem kan nu worden geherformuleerd in een eerste ontwerpprobleem. Belangrijk is dat alle leerlingen dit probleem op dezelfde manier formuleren. Deze formulering is namelijk bepalend voor de richting waarin leerlingen zoeken naar oplossingen en nadelen. Dit geldt uiteraard niet alleen voor het eerste probleem, maar ook voor de problemen die in de daarop volgende stappen worden geformuleerd. De docent kan bovendien in deze fase, indien nodig, enige aanvullende kennis aanbieden over de voorwaarden waaraan de oplossing moet voldoen. Leerlingen beschikken namelijk niet altijd over voldoende voorkennis van de omgeving. Bovendien zal soms kennis over SEObependingen moeten worden aangeboden. De klassikale introductie maakt het ook mogelijk leerlingen nog aanvullende aanwijzingen te geven over het werken met de ontwerpheuristiek.

3. De leerlingen bedenken oplossingen en bijbehorende nadelen

Nu het probleem is geformuleerd kunnen leerlingen met behulp van de ontwerpheuristiek oplossingen en bijbehorende nadelen gaan bedenken. Daarbij wil ik de leerlingen in groepjes laten werken. Ik verwacht dat de leerlingen zo elkaar kunnen helpen en stimuleren in het gebruik van de heuristiek en bij het genereren en toetsen van hypothesen (2.1.4). Om effectief van elkaar te kunnen leren kies ik voor een procedure die bekend staat onder de naam: denken, delen, uitwisselen (Ebbens et al., 1996). Leerlingen bedenken eerst individueel oplossingen (denken), die vervolgens worden besproken in groepjes

(delen), waarna de groepso oplossingen klassikaal worden besproken (uitwisselen).

Twee overwegingen liggen ten grondslag aan deze keuze. Ten eerste verwacht ik dat leerlingen zo effectief van elkaar kunnen leren. Omdat leerlingen eerst individueel een oplossing bedenken heeft ieder groeps lid ook een inbreng in de groepsbespreking. Bovendien leren de groepjes ook weer van de andere groepjes in de klassikale uitwisseling. Ten tweede maakt deze procedure het voor de docent mogelijk het ontwerpproces van de leerlingen adequaat te begeleiden. Wanneer leerlingen individueel zouden werken, zou het voor de docent niet mogelijk zijn alle leerlingen op het juiste moment feedback te geven. Werken zij effectief samen, dan nemen medeleerlingen de functie van de docent gedeeltelijk over. De docent heeft nu méér tijd om individuele leerlingen of groepjes te begeleiden, die het op dat moment het meest nodig hebben.

Ik zal nu beschrijven hoe deze algemene samenwerkingsprocedure binnen ontwerpend leren kan worden toegepast. Daarbij heb ik ook de aanduiding van de fasen aangepast aan de situatie. De leerlingen bedenken eerst individueel met behulp van de ontwerpheuristiek één of meerdere oplossingen en bijbehorende nadelen (*individuele denkfase*). Ik laat leerlingen deze oplossingen en nadelen verwoorden of tekenen op een ontwerpformulier. Ik verwacht dat de gedachten van leerlingen worden aangescherpt wanneer ze deze verwoorden of verbeelden. Bovendien kunnen middels de ontwerpformulieren de ideeën naar de andere leerlingen worden gecommuniceerd. De docent kan in deze fase rondlopen en nagaan of de leerlingen het probleem goed interpreteren en hen stimuleren om eventueel meerdere oplossingen of nadelen te bedenken.

Vervolgens gaan de leerlingen hun oplossing in groepjes bespreken (*groepsbespreking*). Ik verwacht dat de leerlingen verschillende oplossingen hebben bedacht en dat het delen van deze oplossingen leidt tot een verdere ontwikkeling van de oplossingen. Doel van deze fase is dat de groepsleden het eens worden over de beste oplossing. De docent vervult ook in deze fase een stimulerende rol. Daarbij dient hij te bewaken dat de verschillende groepsleden ook een inbreng hebben in het groepje. Bovendien kan hij, indien nodig, inhoudelijke of procesgerichte feedback geven.

De beste oplossingen en bijbehorende nadelen van de verschillende groepjes worden vervolgens geïnventariseerd en klassikaal geëvalueerd (*klassikale evaluatie*). Wanneer leerlingen geconfronteerd worden met de andere groepso oplossingen, kan dit opnieuw leiden tot verdere ontwikkeling van hun oplossing. Uiteindelijk dient ook hier weer de beste oplossing te worden gekozen of samengesteld. De docent zorgt er in deze fase voor dat de verschillende oplossingen door de leerlingen worden afgewogen en de adequaat geachte elementen uit de verschillende oplossingen ook in de uiteindelijke oplossing tot uiting komen. Het nadeel van deze oplossing wordt ook genoteerd. Dit is belangrijk omdat dit nadeel in de volgende stap in een nieuw ontwerpprobleem zal worden geherformuleerd.

4. De docent biedt aanvullende kennis over het systeem aan

Alvorens het volgende probleem te formuleren, zal de docent eerst de gekozen oplossing moeten vergelijken met de wetenschappelijk geaccepteerde oplossing. Ik verwacht dat leerlingen wel tot een functionele typering van de wetenschappelijk geaccepteerde oplossing zullen komen. Dit wil zeggen dat de gekozen oplossing adequaat beschrijft hoe een bepaalde functie kan worden vervuld, maar dat de onderdelen en interacties nog niet in detail zijn beschreven. Leerlingen komen bijvoorbeeld tot de conclusie dat een binnengedrongen bacterie onschadelijk kan worden gemaakt door een eetcel. Deze cel omringt de bacterie en maakt hem vervolgens onschadelijk. Immunologen zijn van mening dat een dergelijke cel ook bestaat. Zij hebben bovendien in meer detail beschreven hoe een bacterie kan worden opgenomen en hoe hij onschadelijk wordt gemaakt. Kennis van enkele van deze details kan nu aan de leerlingen worden aangeboden. Bovendien zal de docent de daarbij behorende wetenschappelijke terminologie moeten aanbieden. De docent kan bijvoorbeeld vertellen dat een eetcel door immunologen macrofaag wordt genoemd en het proces van opnemen en onschadelijk maken fagocytose. De docent kan daaraan toevoegen dat de bacterie wordt opgenomen in een vacuole, waarna enzymen de bacterie 'afbreken'.

Nu heb ik er in 2.1.1 op gewezen dat het aanbieden van kennis en termen kan leiden tot misconcepten. Ik verwacht dit probleem niet bij de bovengenoemde introductie van termen, omdat leerlingen de oplossing waar de term naar verwijst al eerder hebben bedacht. Ik verwacht dat dit probleem zich ook nauwelijks zal voordoen bij het aanbieden van kennis van details. Leerlingen hebben immers al eerder een functionele typering van de oplossing bedacht; de aanvullende details krijgen binnen dit geheel hun betekenis.

5. De leerlingen passen de verworven kennis toe

Nu leerlingen wetenschappelijk geaccepteerde kennis hebben verworven over (een onderdeel van) het systeem, krijgen ze enkele vragen aangeboden waarbij ze de verworven kennis moeten toepassen. Middels deze toepassingsvragen kunnen de docent en de leerlingen nagaan of adequate kennis is verworven over de functie en werking van het systeem. De vragen dienen zo te worden gekozen dat ook kan worden nagegaan, of leerlingen kennis uit voorafgaande stappen hebben geïntegreerd met kennis die in de betreffende stap is behandeld.

Ik verwacht dat het middels de hierboven beschreven fasering van ontwerpend leren mogelijk is, dat leerlingen met de ontwerpheuristiek leren werken en een biologisch systeem leren begrijpen.

2.3.4 Ontwikkeling van scenario's

Nu de inrichting en uitvoering van ontwerpnd leren is beschreven, wordt het de vraag hoe een scenario met de gewenste kenmerken kan worden ontwikkeld. Bij de bespreking van probleemstellend onderwijs heb ik al beknopt een ontwikkelprocedure beschreven (2.1.3). De ontwikkelaar bedenkt een probleemstructuur met opeenvolgende problemen die uitkomt bij de gewenste kennis en waarvan hij verwacht dat leerlingen deze ook zelf kunnen bedenken. Het verwachte en bedoelde onderwijsleerproces wordt beschreven in een scenario en vergeleken met het onderwijsleerproces zoals dit daadwerkelijk plaatsvindt in de klas. Dit leidt dan veelal tot bijstelling van het scenario, waarna dit weer opnieuw kan worden beproefd en bijgesteld. Deze algemene ontwikkelprocedure biedt de ontwikkelaar echter nog weinig handvatten voor het ontwikkelen van onderwijs. Mijn beschrijving van de ontwerpheuristiek en van de inrichting en uitvoering van ontwerpnd leren maakt het mogelijk deze ontwikkelprocedure nader in te vullen.

De ontwikkelaar kan eerst zelf met behulp van de ontwerpheuristiek het betreffende systeem opnieuw ontwerpen. Op deze manier wordt zijn reeds aanwezige kennis over het systeem geactiveerd en geproblematiseerd. Hij krijgt tevens zicht op de problemen die ten grondslag liggen aan de kennisontwikkeling over het systeem. Bovendien verkrijgt hij op deze manier een globale probleemstructuur. In deze eerste opzet is echter nog niet of nauwelijks rekening gehouden met de leerlingen. De ontwikkelaar zal zich dan ook vervolgens moeten verplaatsen in de positie van de leerling. Welke oplossingen en bijbehorende nadelen kunnen leerlingen bedenken met behulp van de ontwerpheuristiek, gegeven hun voorkennis over het systeem en de systeemomgeving? Hij zal zich daarbij eerst moeten afvragen of een leerling het ook nodig zal vinden dat de functie van het systeem wordt vervuld. Vervolgens zal hij voor ieder probleem in de structuur moeten nagaan of de leerling tot de gewenste oplossing en het bijbehorende nadeel en daarmee tot het volgende probleem kan komen. Een probleem doet zich voor wanneer hij verwacht dat de gewenste oplossing en het bijbehorend nadeel niet door leerlingen wordt bedacht of gekozen. De ontwikkelaar zal in een dergelijk geval moeten nagaan of aanvullende kennis over (voorwaarden van) de oplossing voldoende is om leerlingen tot de gewenste oplossing te laten komen. Indien dit niet mogelijk is, zal moeten worden nagegaan hoe de probleemstructuur moet worden aangepast. De aangepaste probleemstructuur kan worden beschreven in een scenario en worden vergeleken met het feitelijke onderwijsleerproces in de klas en waar nodig worden bijgesteld.

De hier gepresenteerde domeinspecifieke onderwijsbenadering ontwerpnd leren bevat richtlijnen voor de inrichting van het biologieonderwijs waarin leerlingen zelf een bijdrage leveren aan de ontwikkeling van de gewenste

kennis. De onderwijsbenadering heeft richting gegeven aan de ontwikkeling van een scenario voor het immunologieonderwijs, dat in het volgende hoofdstuk wordt gepresenteerd. Middels ontwikkeling, uitvoering en evaluatie van het scenario is de onderwijsbenadering beproefd en nader uitgewerkt. De resultaten hiervan worden beschreven in hoofdstuk 5.

3

Scenario van 'Het immuunsysteem in zes stappen'

De onderwijsbenadering ontwerpend leren heeft richtlijnen verschaft voor de ontwikkeling van een scenario. Hierin worden het verwachte onderwijsleerproces en de beoogde doelstellingen voor het immunologieonderwijs gedetailleerd beschreven en verantwoord. Het scenario is in een eerste ronde beproefd en bijgesteld. In dit hoofdstuk wordt het scenario gepresenteerd dat in de tweede ronde is beproefd.

Ik verwacht dat leerlingen in zes stappen de gewenste kennis over het immuunsysteem verwerven en met de ontwerpheuristiek leren werken. In 3.1 wordt een overzicht gegeven van de zes stappen. Vervolgens wordt het scenario per stap weergegeven (3.2-3.7). In 3.8 wordt het scenario met betrekking tot het leren werken met de ontwerpheuristiek beschreven.

3.1 Overzicht van de zes stappen

Het immunologieonderwijs is zo ingericht dat leerlingen stapsgewijs het immuunsysteem 'opnieuw' ontwerpen. In de eerste stap gaan leerlingen na wat de functie is van het immuunsysteem en waarom het nodig is dat deze functie wordt vervuld. Vervolgens wordt in vijf stappen nagegaan hoe deze functie kan worden vervuld. In elke stap staat één ontwerpprobleem centraal. De ontwerpproblemen zijn zo gekozen en geordend dat aan de oplossing van ieder ontwerpprobleem een nadeel is verbonden dat kan worden geherformuleerd in het volgende ontwerpprobleem. Ik verwacht dat leerlingen hierdoor het onderwijsleerproces ervaren als een door eigen problemen gestuurd proces. Ik ben er vanuit gegaan dat de zes stappen in vijf lesuren van vijftig minuten kunnen worden doorlopen¹.

¹ Dit is één lesuur meer dan docenten meestal aan immunologie besteden. Ik verwacht echter dat met deze lessenserie ook meer doelstellingen kunnen worden gerealiseerd. In de lessenserie wordt namelijk niet alleen de kennis behandeld die in de eindtermen is opgenomen:

- leerlingen leren ook nog enige andere onderdelen van het immuunsysteem kennen;
- ze leren bovendien de verworven kennis functioneel te verantwoorden; en
- ze leren werken met de ontwerpheuristiek.

Hieronder wordt een overzicht gegeven van de zes stappen. Per stap worden het ontwerpprobleem, de eindoplossing en het bijbehorende nadeel besproken. In de scenario's voor de afzonderlijke stappen (3.2 - 3.7) wordt het verwachte onderwijsleerproces van ontwerpprobleem naar eindoplossing nader beschreven en verantwoord.

1. Waarom hebben we een immuunsysteem nodig?

Gedurende ons leven worden we voortdurend geconfronteerd met ziekteverwekkers als bacteriën en virussen. Middels hygiënische maatregelen en lichamelijke barrières, zoals de huid, kan gedeeltelijk worden voorkomen dat deze ziekteverwekkers ons lichaam binnendringen. De ziekteverwekkers die de barrières wel passeren, zullen onschadelijk moeten worden gemaakt door het immuunsysteem.

2. Hoe kan een binnengedrongen ziekteverwekker onschadelijk worden gemaakt?

Een eenvoudige manier om de ziekteverwekker onschadelijk te maken is deze door een cel te laten opeten. Macrofagen zijn hiertoe in staat. Zij kunnen bacteriën en vrijgekomen virussen fagocyteren. Deze oplossing heeft twee nadelen: virusgeïnfecteerde cellen kunnen niet door fagocytose onschadelijk worden gemaakt² en de macrofaag kan ook in actie komen tegen lichaamseigen materiaal.

3. Hoe kan worden voorkomen dat een macrofaag lichaamseigen materiaal fagocyteert?

Om te voorkomen dat lichaamseigen materiaal wordt gefagocyteerd moet een macrofaag herkennen wat wordt gefagocyteerd. Macrofagen bezitten receptoren waarmee ze antigenen (moleculaire structuren) op de ziekteverwekker specifiek kunnen herkennen. Lichaamseigen materiaal wordt niet herkend en dus ook niet gefagocyteerd. Het nadeel van deze oplossing is dat voor miljoenen verschillende antigenen een aparte receptor moet worden aangemaakt.

4. Hoe kan voor ieder antigeen een receptor worden aangemaakt?

Macrofagen beschikken slechts over een beperkt aantal typen receptoren. Macrofagen krijgen bij de herkenning dan ook hulp van B-cellen. Als gevolg

² Dit nadeel wordt pas in stap 6 behandeld. Het nadeel wordt niet in stap 3 behandeld omdat leerlingen dan bij alle volgende ontwerpproblemen een oplossing moeten bedenken voor zowel bacteriën als virusgeïnfecteerde cellen. Hierdoor wordt elke stap onnodig complex. Wanneer het nadeel in stap 6 wordt besproken kunnen leerlingen bovendien de verworven kennis uit de voorafgaande stappen gebruiken bij het oplossen van het ontwerpprobleem.

van genherrangschikking worden heel veel B-cellen aangemaakt die ieder over een ander type receptor beschikken³. Wanneer een B-cel met een receptor bindt aan een antigeen, kan hij extra receptoren gaan aanmaken, van dezelfde specificiteit, die het celoppervlak kunnen verlaten. Deze uitgescheiden receptoren worden antistoffen genoemd. De antistoffen kunnen binden aan het antigeen van een ziekteverwekker. Een macrofaag kan de staart van een antistof herkennen en vervolgens het antigeen-antistof complex fagocyteren. Het nadeel van deze oplossing is dat elke B-cel slechts één type receptor kan aanmaken waardoor de trefkans tussen een B-cel met een juiste receptor en een ziekteverwekker klein is.

5. Hoe kan de trefkans tussen een B-cel met een juiste receptor en de ziekteverwekker worden vergroot?

De trefkans wordt op een aantal manieren vergroot. B-cellen kunnen overal komen doordat ze zich verplaatsen door het bloed- en lymfevatenstelsel. Middels signaalstoffen kunnen de ziekteverwekkers worden gelokaliseerd. Indien een receptor van een B-cel past op het antigeen van de ziekteverwekker, verhuist die B-cel naar de lymfeklieren. De B-cel deelt zich daar (selectieve klonering). Een kloon B-cellen en de antistoffen die ze produceren, worden vervolgens weer in de circulatie opgenomen en komen ook weer bij de plek van de infectie.

Met B-cellen en macrofagen kunnen echter alleen bacteriën en vrijgekomen virussen worden herkend en onschadelijk gemaakt. Virusgeïnfecteerde cellen kunnen niet worden herkend omdat de aanwezigheid van een virus veelal niet aan de buitenkant van de cel zichtbaar is. Bovendien kunnen ze niet onschadelijk worden gemaakt door fagocytose (zie stap 2).

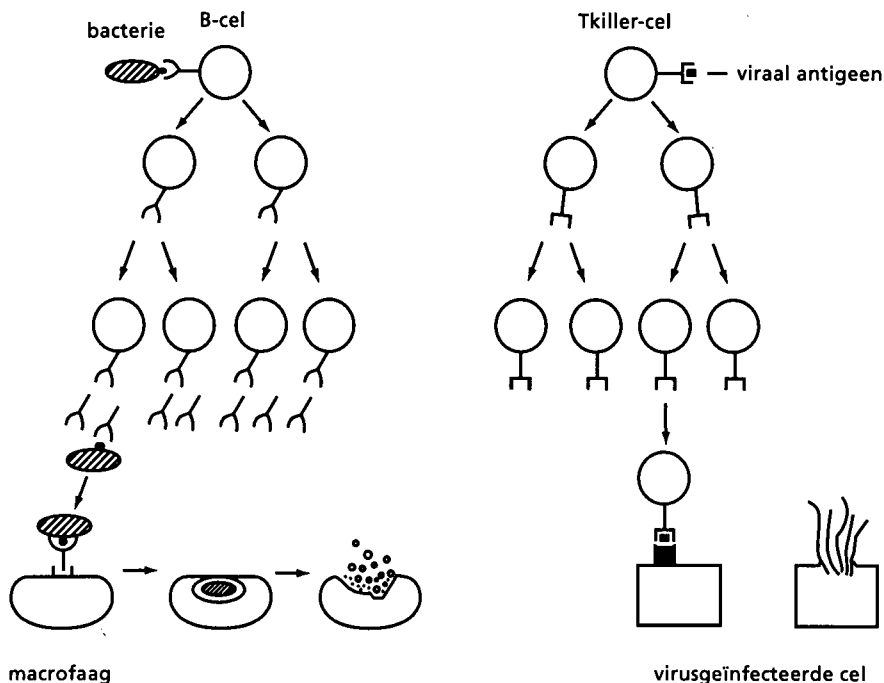
6. Hoe kan een virusgeïnfecteerde cel worden herkend en onschadelijk gemaakt?

De aanwezigheid van een virus in een cel kan worden waargenomen wanneer delen van het virus op het celmembraan worden gepresenteerd. Alle lichaamseigen cellen bevatten schotelvormige MHC-moleculen die hiertoe in staat zijn. Tkiller-cellen kunnen middels receptoren viraal antigeen gecombineerd met MHC herkennen. Na herkenning produceren deze Tkiller-cellen een stof (perforine) waarmee het celmembraan van de gastheercel wordt 'lekgeprik'⁴.

Tkiller-cellen beschikken verder over kenmerken die overeenkomen met

³ Voor een beschrijving van het genherrangschikkingsmechanisme verwijs ik naar het scenario van stap 4 (3.5).

⁴ Tkiller-cellen kunnen pas een virusgeïnfecteerde cel lekprijken nadat klonering in de lymfeklieren heeft plaatsgevonden.



Figuur 3.1.1

Overzicht van het immuunsysteem

Wanneer een ziekteverwekker (bacterie of virus) ons lichaam binnendringt, komt het immuunsysteem in actie. De bacteriën worden hoofdzakelijk herkend en onschadelijk gemaakt door B-cellen en macrofagen. Virussen bevinden zich grotendeels in een gastheercel. Deze virusgeïnfecteerde lichaamscellen worden hoofdzakelijk herkend en onschadelijk gemaakt door Tkiller-cellen.

Wanneer een bacterie is binnengedrongen kan deze worden herkend door een B-cel. De B-cel verhuist met de ziekteverwekker naar een lymfeklier. Daar wordt een kloon gevormd van B-cellen met dezelfde type receptoren. Deze kloon van B-cellen, en de antistoffen die ze produceren, verhuizen weer naar de plek van de infectie. Antistoffen kunnen dan binden aan het antigeen van de ziekteverwekker. Een macrofaag is in staat het antigeenantistof complex te herkennen en vervolgens te fagocyteren.

Wanneer virussen zijn vrijgekomen uit de gastheercel kunnen ze door een Tkiller-cel worden herkend. De Tkiller-cel verhuist vervolgens naar een lymfeklier waar selectieve klonering plaatsvindt. De zo ontstane kloon van Tkiller-cellen verhuist weer naar de virusgeïnfecteerde cellen. Indien een Tkiller-cel met zijn receptor bindt aan het door MHC gepresenteerde viraal antigeen dan kan deze cel de geïnfecteerde cel 'lekprikken'. Indien hierbij nog virussen vrijkomen kunnen hiervoor antistoffen worden gevormd waarna het antigeen-antistof complex door een macrofaag kan worden herkend en vervolgens gefagocyteerd.

die van B-cellen. Middels specifieke receptoren voor viraal antigeen wordt voorkomen dat gezonde lichaamseigen cellen worden lekgeprik. Receptordiversiteit wordt ook middels een genherrangschikkingsmechanisme gerealiseerd. De trefkans wordt onder meer vergroot door selectieve klonering in de lymfeklieren⁵.

⁵ In de eerste ronde bestond de lessenserie niet uit zes, maar uit zeven stappen. In de laatste stap werd de Thelper-cel behandeld. Deze Thelper-cel kan voorkomen dat B-cellen en Tkiller-cellen die receptoren bezitten voor lichaamseigen materiaal in actie komen. De andere stappen bleken echter meer tijd te kosten dan ik had verwacht, waardoor het niet meer mogelijk bleek te zijn de Thelper-cel in de geplande tijd te behandelen. Omdat dit onderdeel ook niet in de eindtermen is opgenomen is het in het bijgestelde scenario niet meer opgenomen.

In figuur 3.1.1 wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste onderdelen en interacties van het immuunsysteem waarover leerlingen kennis dienen te verwerven. Om het overzicht te behouden zijn bepaalde onderdelen en interacties die in de lessenserie worden behandeld, niet in de figuur opgenomen. Bovendien zijn in deze figuur de drie andere componenten van de gewenste kennis niet gerepresenteerd. Leerlingen dienen niet alleen de onderdelen en hun interacties te kennen; ze dienen ook te weten wat hun functie is, waarom het nodig is dat deze functie wordt vervuld en waarom de functie zo beter wordt vervuld dan door enkele alternatieven (2.3.2). Voor een gedetailleerde beschrijving en verantwoording van de te verwerven kennis verwijs ik naar het scenario van de betreffende stap.

Tot slot van deze paragraaf geef ik nog een toelichting bij de wijze waarop het scenario is gerapporteerd. In het scenario voor elke stap worden achtereenvolgens de doelstellingen, het onderwijsleerproces en de toepassingsvragen beschreven en verantwoord. Ik zal de drie onderdelen hieronder kort bespreken.

Doelstellingen

Eerst wordt een overzicht gegeven van de doelstellingen voor de betreffende stap. De verschillende componenten van de gewenste kennis worden beknopt beschreven:

- welke functie wordt vervuld;
- middels welk mechanisme de functie wordt vervuld;
- waarom de functie zo beter wordt vervuld dan door enkele alternatieven;
- wat het nadeel is van het mechanisme.

Bepaalde aspecten van de doelstellingen zullen vervolgens nader worden toegelicht. Wanneer in de stap (onderdelen van) een mechanisme wordt behandeld dat niet in de eindtermen is opgenomen, wordt dit vermeld en verantwoord. Wanneer er binnen de immunologie verschillende opvattingen bestaan over het mechanisme worden deze ook vermeld en verantwoord ik mijn keuze.

Onderwijsleerproces

Het verwachte onderwijsleerproces wordt eerst samengevat in een schema. In elke stap kan een aantal fasen worden onderscheiden (2.3.3):

- de klassikale introductie;
- de individuele denkfase;
- de klassikale evaluatie;
- het aanbieden van aanvullende informatie over het systeem door de docent.

De verwachtingen voor de individuele denkfase worden niet apart geëxpliciteerd om te grote overlap met de verwachtingen ten aanzien van de groepsbespreking te vermijden. Omdat een gedeelte van de aanvullende informatie vaak al in de klassikale evaluatie wordt aangeboden, wordt deze fase in de bespreking van het onderwijsleerproces niet apart behandeld, maar opgenomen in de klassikale evaluatie.

Het verwachte onderwijsleerproces voor de klassikale introductie, de groepsbespreking en de klassikale evaluatie wordt als volgt besproken. Eerst worden de belangrijkste keuzen en verwachtingen ten aanzien van de docent en de leerlingen weergegeven en verantwoord. Indien deze afwijken van die uit de eerste ronde dan wordt dit expliciet vermeld en wordt aangegeven welke resultaten uit de eerste ronde aanleiding gaven tot de bijstelling. Vervolgens wordt het verwachte verloop van het onderwijsleerproces in detail besproken en verantwoord. Deze gedetailleerde bespreking is in een kleiner lettertype afgedrukt. Niet alle keuzen en verwachtingen worden geëxpliciteerd. Handelingen en instructies die in elke les of stap terugkomen, zoals het uitdelen van de ontwerpformulieren en het rondlopen tijdens de groepsbesprekingen, worden niet vermeld. Indien een docent een mechanisme uitlegt op een wijze die al eerder is beschreven in de doelstellingen, wordt hier naar verwezen.

De oplossingen en nadelen die ik van leerlingen verwacht tijdens de groepsbespreking, worden weergegeven in een overzichtsschema. Niet alle verwachte oplossingen worden in het overzicht vermeld. Oplossingen die leerlingen waarschijnlijk onmiddellijk weer zullen verwerpen, worden niet opgenomen. Zo denken leerlingen bij het herkennen van de ziekteverwekker waarschijnlijk in eerste instantie aan ogen, maar ze zullen onmiddellijk deze oplossing weer verwerpen omdat ze weten dat een cel geen ogen heeft. Ik verwacht niet dat alle groepjes de oplossingen en nadelen ook in de volgorde zullen bespreken zoals deze in het schema en het scenario zijn vermeld. De oplossingen en nadelen zijn in algemene termen geformuleerd om het schema overzichtelijk te houden. In de resultatenparagrafen zijn overzichtsschema's van de groepsbesprekingen opgenomen waarin is weergegeven welke oplossingen en nadelen leerlingen feitelijk hebben besproken. De symbolen die in de overzichtsschema's worden gebruikt worden in tabel 3.1.1 verklaard.

Toepassingsvragen

Na een beschrijving en verantwoording van het onderwijsleerproces worden de toepassingsvragen besproken, waarmee wordt nagegaan of de leerlingen de gewenste kennis hebben verworven. Ik zal hier verantwoorden waarom een bepaald aspect van de doelstelling middels een toepassingsvraag wordt getoetst, hoe dit wordt getoetst en welk antwoord ik van leerlingen verwacht. Een algemene verantwoording voor het gebruik van toepassingsvragen wordt in 4.1 gegeven.

Tekst omlijnd:	oplossing
• normaal:	verwachte tussenoplossing
• vetgedrukt:	verwachte eindoplossing
• onderbroken:	onverwachte oplossing
Tekst niet omlijnd:	nadeel
• normaal:	verwacht nadeel
• cursief:	onverwacht nadeel
Cijfers:	groepsnummer
• normaal:	groepje heeft oplossing of nadeel besproken
• vetgedrukt en groot:	de eindoplossing van het groepje

Tabel 3.1.1

Verklaring van de symbolen in de overzichtsschema's van de groepsbesprekingen

Leerlingen krijgen na afloop van iedere stap een tekst uitgedeeld waarin het ontwerpprobleem, de eindoplossing en het nadeel worden beschreven. Omdat deze informatie veelal is opgenomen in de beschrijving en verantwoording van de doelstellingen, wordt de begeleidende tekst hier niet afgedrukt.

3.2 Stap 1

In deze introductie leren leerlingen welke functie het immuunsysteem vervult en waarom het nodig is dat deze functie wordt vervuld. In deze stap staat dan ook het volgende probleem centraal:

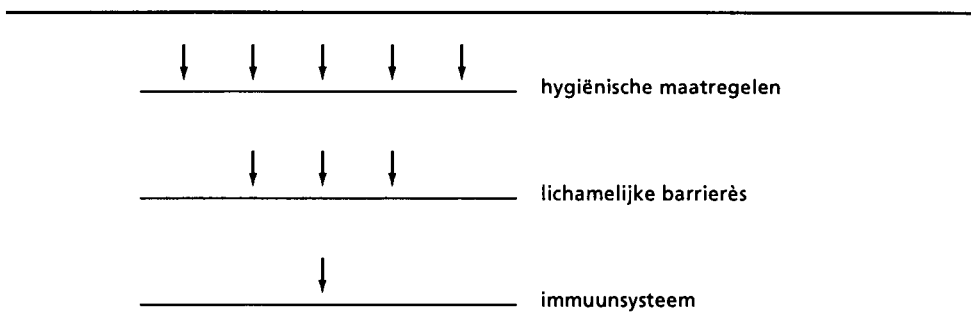
Waarom hebben we een immuunsysteem nodig?

Beschrijving en verantwoording van de doelstellingen

Doelstellingen voor stap 1

Leerlingen leren in deze stap:

- waarom virussen en bepaalde bacteriën schadelijk zijn
- dat moet worden voorkomen dat ziekteverwekkers het lichaam binnendringen (functie)
- dat middels hygiëne en lichamelijke barrières kan worden voorkomen dat ziekteverwekkers het lichaam binnendringen (mechanismen)
- dat niet volledig kan worden voorkomen dat ziekteverwekkers het lichaam binnendringen (nadeel)
- dat het immuunsysteem er voor zorgt dat binnengedrongen ziekteverwekkers onschadelijk moeten worden gemaakt (functie)



Figuur 3.2.1

Bescherming tegen ziekteverwekkers

We worden dagelijks door ziekteverwekkers belaagd. Middels hygiënische maatregelen kan gedeeltelijk worden voorkomen dat we (langdurig) in contact komen met de ziekteverwekkers. Wanneer we hiermee toch in contact komen, zorgen lichamelijke barrières, zoals de huid en slijmvliezen, er voor dat de ziekteverwekkers ons lichaam niet binnendringen. De ziekteverwekkers die de barrières toch passeren, worden onschadelijk gemaakt door het immuunsysteem (figuur 3.2.1).

In deze lessenserie wordt de term immuunsysteem dus gereserveerd voor onderdelen van ons lichaam waarmee binnengedrongen ziekteverwekkers onschadelijk kunnen worden gemaakt. Hiermee sluit ik aan bij de definitie van Langman (1989). In sommige tekstboeken worden ook de lichamelijke barrières tot het immuunsysteem gerekend (Roitt, 1997). Voor deze lessenserie is deze laatste definitie minder geschikt. Ten eerste worden dan met een term onderdelen aangeduid die verschillende functies vervullen. Ten tweede is er dan geen specifieke term meer beschikbaar voor de onderdelen die de functie vervullen die in deze lessenserie centraal staat.

Beschrijving en verantwoording van het onderwijsleerproces

Uit een voorkennisonderzoek blijkt dat leerlingen al een globaal idee hebben over de functie van het immuunsysteem (Verheul, 1996). Zij gaan er vanuit dat het immuunsysteem ons beschermt tegen ziekteverwekkers. Niet alleen witte bloedcellen, maar ook bepaalde barrières, zoals bijvoorbeeld de huid, worden tot het immuunsysteem gerekend. Leerlingen maken veelal nog geen onderscheid tussen de twee functies die in deze stap worden behandeld (voorkomen dat ziekteverwekkers binnendringen en het onschadelijk maken van binnengedrongen ziekteverwekkers). Ook weten leerlingen vaak nog niet waarom beide functies nodig zijn. Het onderwijsleerproces wordt dan ook zo ingericht dat de leerlingen stapsgewijs de globale functie 'bescherming tegen ziekteverwekkers' leren specificeren en verantwoorden (figuur 3.2.2).

Klassikale bespreking

Het onderwijsleerproces start met de globale functie die leerlingen aan het immuunsysteem toekennen: bescherming tegen ziekteverwekkers. Vervolgens wordt nagegaan waarom we ziek worden van virussen en bepaalde bacteriën. Leerlingen leren dan waarom het nodig is dat deze globale functie wordt vervuld. Uit de eerste ronde bleek dat leerlingen veelal wel weten waarom virussen schadelijk zijn (verstoren celfunctie gastheercel), maar dat ze niet weten waarom bacteriën schadelijk zijn (productie van gifstoffen). Deze kennis zal leerlingen dus moeten worden aangeboden. De verworven kennis is niet alleen van belang om in te zien waarom we ons moeten beschermen tegen ziekteverwekkers. Deze kennis kan ook in de vervolgstappen worden gebruikt bij het bedenken van oplossingen hoe ziekteverwekkers onschadelijk moeten worden gemaakt (stap 2 en stap 6). Daarvoor is het met name van belang dat leerlingen zich realiseren dat een virus alleen kan overleven in de gastheercel en een bacterie zich daarbuiten bevindt. Hieraan wordt dan ook speciale aandacht besteed. Ook wordt expliciet aandacht besteed aan de vermeerdering van ziekteverwekkers. In de eerste ronde vroegen namelijk enkele leerlingen zich af hoe je van enkele bacteriën of virussen ziek kunt worden. Zij realiseerden zich op dat moment niet dat bacteriën en virussen zich snel kunnen vermeerderen.

De docent vraagt aan leerlingen waarom we een immuunsysteem nodig hebben. Ik verwacht dat leerlingen aangeven dat dit systeem ons moet beschermen tegen bacteriën en virussen, omdat we anders ziek worden. De docent kan vervolgens vragen waarom we ziek worden van virussen en bacteriën. Waarschijnlijk weten leerlingen waarom we ziek worden van virussen. Virussen overleven in de gastheercel en verstoren daar de celfunctie. De docent kan uitleggen waarom we ziek worden van bacteriën. Bacteriën bevinden zich buiten de cel maar scheiden wel gifstoffen af. Enkele voorbeelden van gifstoffen en bijbehorende symptomen kunnen worden gepresenteerd. De docent kan vervolgens vragen of je nu van enkele bacteriën of virussen ziek wordt. Enkele leerlingen zullen zich dan waarschijnlijk realiseren dat virussen en bacteriën zich snel kunnen vermeerderen. De docent kan concluderen dat we ziek worden van ziekteverwekkers omdat ze ons lichaam binnendringen, zich daar vermeerderen en schade aanrichten.

fase	docent	leerlingen
<i>klassikaal</i>	waarom is een immuunsysteem nodig?	bescherming tegen ziekteverwekkers, anders word je ziek
	uitleggen/vragen waarom je ziek wordt van bacteriën en virussen	
	hoe wordt voorkomen dat ziekteverwekkers het lichaam binnendringen?	voorbeelden van hygiënische maatregelen en lichamelijke barrières
	kan volledig worden voorkomen dat ziekteverwekkers binnendringen?	nee, de barrières kunnen wor- den gepasseerd.
	de functie van het immuun- systeem is dan ook het onschadelijk maken van binnengedrongen ziekte- verwekkers	

Figuur 3.2.2

Overzicht onderwijsleerproces stap 1

Ziekteverwekkers zijn pas schadelijk wanneer ze ons lichaam zijn binnengedrongen. Daarom wordt aan leerlingen gevraagd hoe kan worden voorkomen dat ziekteverwekkers ons lichaam binnendringen. Op deze manier wordt de functie van hygiëne en barrières gespecificeerd en verantwoord. Uit de eerste ronde bleek dat leerlingen verschillende hygiënische maatregelen en barrières konden bedenken. Het bleek echter niet voor alle leerlingen duidelijk te zijn wat met binnendringen wordt bedoeld. Een jongen was van mening dat ook middels zoutzuur in je maag kan worden voorkomen dat bacteriën je lichaam binnendringen. Naar aanleiding van deze oplossing ontstond een discussie over de vraag of een bacterie die in je maagdarmkanaal zit, je lichaam al is binnengedrongen. Aan dit aspect van binnendringen wordt in dit scenario extra aandacht besteed.

De docent vraagt leerlingen vervolgens of niet kan worden voorkomen dat ziekteverwekkers het lichaam binnendringen. Ik verwacht dat leerlingen met oplossingen komen als: de huid, slijmvliezen, traanvocht, handen wassen, wassen van voedsel etc. Als een leerling met de oplossing zoutzuur in de maag komt, kan naar aanleiding hiervan worden nagegaan wat onder 'binnengedrongen' wordt verstaan. Indien deze oplossing niet wordt genoemd kan de docent deze zelf aanbieden. De docent kan aangeven dat het maagdarmkanaal nog tot de buitenwereld wordt gerekend. Aan de hand van een schematische afbeelding van het menselijk lichaam kan dit worden geïllustreerd. Vervolgens kan de docent de oplossingen die leerlingen hebben genoemd, classificeren (zie figuur 3.2.1).

Leerlingen zullen zich waarschijnlijk realiseren dat niet volledig kan worden voorkomen dat ziekteverwekkers ons lichaam binnendringen. De ziekteverwekkers die de barrières passeren, zullen dus onschadelijk moeten worden gemaakt. Op deze manier is ook de functie van het immuunsysteem gespecificeerd en verantwoord. Tevens kan expliciet worden aangegeven dat alleen de onderdelen die deze functie vervullen tot het immuunsysteem worden gerekend.

De docent kan vervolgens vragen of middels hygiëne en barrières volledig kan worden voorkomen dat ziekteverwekkers het lichaam binnendringen. Ik verwacht dat leerlingen zich zullen realiseren dat je nooit helemaal kunt voorkomen dat je met ziekteverwekkers in contact komt en dat je ook niet kunt voorkomen dat de barrières worden gepasseerd, bijvoorbeeld door een wondje in de huid. De docent kan leerlingen vragen waarom we ons lichaam niet helemaal kunnen afsluiten. Ik verwacht dat leerlingen zich zullen realiseren dat we dan ook niet meer in staat zijn de benodigde stoffen uit de omgeving op te nemen en afvalstoffen uit te scheiden. De docent kan vervolgens aangeven dat die binnengedrongen ziekteverwekkers onschadelijk moeten worden gemaakt. De leerlingen wordt verteld dat het immuunsysteem hiervoor zorgt (zie figuur 3.2.1). De docent kan nu aangeven dat het immuunsysteem dus wel een rol speelt in de bescherming tegen de ziekteverwekkers, maar dat deze rol beperkt is tot het onschadelijk maken van binnengedrongen ziekteverwekkers. Vervolgens kan worden aangegeven dat ze in de komende lessen het immuunsysteem gaan ontwerpen.

Beschrijving en verantwoording van de toepassingsvragen

Twee toepassingsvragen zijn geformuleerd om na te gaan of bepaalde aspecten van de doelstellingen zijn gerealiseerd. Ik heb een vraag opgenomen waarmee kan worden nagegaan of leerlingen weten waarom bacteriën schadelijk zijn.

1. De bacterie *Clostridium botilium* is voor de mens levensgevaarlijk. Een yoghurtbacterie is daarentegen heel onschuldig, daar is nog nooit iemand ziek van geworden. Wat zouden de verschillen tussen deze twee bacteriën kunnen zijn waardoor je van de ene erg ziek en van de andere niet ziek wordt?

Ik verwacht niet dat leerlingen weten wat de feitelijke verschillen zijn tussen de clostridium- en yoghurtbacteriën. Het gaat om mogelijke verschillen. Leerlingen dienen zich te realiseren dat clostridiumbacteriën wellicht makkelijker barrières kunnen passeren, zich sneller kunnen vermeerderen en stoffen produceren die meer schade berokkenen dan yoghurtbacteriën.

Ook kennis van de barrières wordt middels een toepassingsvraag getoetst. Deze vraag is echter opgenomen aan het eind van stap 2 (3.3). Leerlingen wordt gevraagd waar macrofagen zich zullen bevinden. Hiermee kan onder meer worden nagegaan of leerlingen zich realiseren dat barrières kunnen worden gepasseerd.

3.3 Stap 2

Leerlingen hebben in de vorige stap geleerd dat bacteriën en virussen schadelijk zijn en dat niet geheel kan worden voorkomen dat ze ons lichaam binnendringen. In deze stap wordt dan ook een oplossing gezocht voor het volgende ontwerpprobleem:

Hoe kan een binnengedrongen ziekteverwekker onschadelijk worden gemaakt?

Beschrijving en verantwoording van de doelstellingen

In deze stap leren leerlingen dat macrofagen ziekteverwekkers onschadelijk

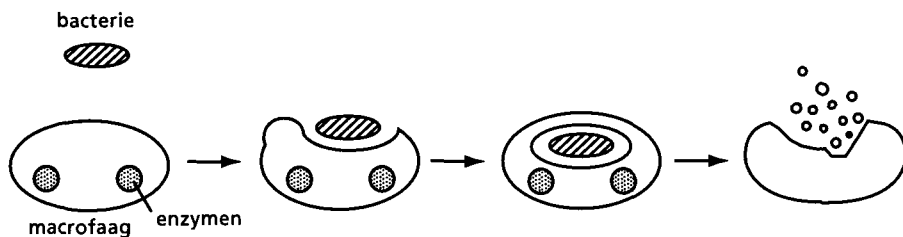
Doelstellingen voor stap 2

Leerlingen leren in deze stap:

- dat binnengedrongen ziekteverwekkers onschadelijk worden gemaakt (functie)
- dat macrofagen ziekteverwekkers fagocyteren (mechanisme)
- waarom bovengenoemd mechanisme de functie beter vervult dan enkele alternatieven
- dat een macrofaag ook lichaamseigen materiaal kan fagocyteren en ongeschikt is voor het onschadelijk maken van virusgeïnfecteerde cellen (nadelen)

kunnen maken middels fagocytose. Leerlingen leren dat bij fagocytose de ziekteverwekker eerst wordt omringd, vervolgens onschadelijk wordt gemaakt middels enzymen, waarna afvalstoffen worden verwijderd (figuur 3.3.1). De herkenning van een ziekteverwekker, een belangrijke fase in het proces van fagocytose, wordt pas in stap 3 aan de orde gesteld. Leerlingen leren in deze stap wel waarom herkenning nodig is. Ze leren dat een macrofaag als nadeel heeft dat ook lichaamseigen materiaal (cellen en stoffen) kunnen worden gefagocyteerd.

Leerlingen leren ook dat een virusgeïnfecteerde cel niet kan worden gefagocyteerd. Deze cellen liggen namelijk vaak in een weefselverband. Een macrofaag kan deze cellen niet omringen en dus ook niet onschadelijk maken. Macrofagen kunnen dus alleen vrijgekomen virussen fagocyteren. Dit zijn virussen die zich tijdelijk buiten de gastheercel bevinden. In stap 5 gaan leerlingen na hoe geïnfecteerde cellen kunnen worden gefagocyteerd.



Figuur 3.3.1

Een macrofaag fagocyteert een bacterie

De macrofaag is niet de enige cel die tot fagocytose in staat is. Een andere belangrijke groep fagocyterende cellen zijn de granulocyten. Deze cellen bevinden zich hoofdzakelijk in de bloedbaan. In de eindtermen is dit celtype niet opgenomen. Ik behandel in deze stap daarom alleen de macrofaag.

Beschrijving en verantwoording van het onderwijsleerproces

Ik verwacht dat de bovengenoemde doelstellingen al grotendeels in de groepsbespreking kunnen worden gerealiseerd. Na afweging van alternatieven zullen leerlingen waarschijnlijk uitkomen op een soort macrofaag en de nadelen van een dergelijke cel onderkennen. In de klassikale evaluatie zal alleen nog enige aanvullende informatie over de macrofaag moeten worden aangeboden (figuur 3.3.2).

Klassikale introductie

In de klassikale introductie wordt het ontwerpprobleem geformuleerd. In de eerste ronde had ik nog een instructie aan deze introductie toegevoegd. Toen benadrukte ik dat ze een oplossing moesten bedenken voor bacteriën en virussen. Dit leidde er echter niet toe dat leerlingen ook nagingen hoe virusgeïnfekteerde cellen onschadelijk kunnen worden gemaakt. Ze dachten bij virussen vooral aan vrijgekomen virussen en niet aan virusgeïnfekteerde cellen. Toen leerlingen tijdens de klassikale evaluatie werd gevraagd of een soort eetcel (die de meeste groepjes voorstelden) geschikt is voor het onschadelijk maken van virusgeïnfekteerde cellen, onderkenden enkele leerlingen wel dat virusgeïnfekteerde cellen wellicht niet kunnen worden omringd.

fase	docent	leerlingen
<i>klassikale introductie</i>	hoe kan een binnengedrongen ziekteverwekker onschadelijk worden gemaakt?	
<i>groepsbespreking</i>		eetcel • kan ook lichaamseigen materiaal aanvallen • kan een virusgeïnfekteerde cel niet onschadelijk maken
<i>klassikale evaluatie</i>	macrofaag fagocyteert ziekteverwekkers • kan ook lichaamseigen materiaal fagocyteren • kan een virusgeïnfekteerde cel niet onschadelijk maken	

Figuur 3.3.2
Overzicht onderwijsleerproces stap 2

Achteraf bezien was het daadwerkelijke verloop van het onderwijsleerproces in de eerste ronde adequater dan het geplande verloop. Als leerlingen namelijk oplossingen zouden hebben bedacht voor virusgeïnfecteerde cellen, dan had dit de klassikale evaluatie complexer gemaakt. In dat geval hadden namelijk alternatieve oplossingen voor twee verschillen problemen moeten worden afgewogen ('hoe kan een bacterie onschadelijk worden gemaakt?; 'hoe kan een virusgeïnfecteerde cel onschadelijk worden gemaakt?'). Bovendien had een gedetailleerde bespreking van het onschadelijk maken van virusgeïnfecteerde cellen toch moeten worden uitgesteld tot stap 5, waar Tkiller-cellen worden behandeld. De redenen hiervoor zijn eerder besproken (3.1).

Ik wil nu het onderwijsleerproces zo inrichten dat leerlingen in de groepsbespreking wel het betreffende nadeel van de eetcel onderkennen, maar hier nog geen gedetailleerde oplossing voor gaan bedenken. Zo zijn wel alle leerlingen betrokken bij het bedenken van het nadeel, maar kan tegelijkertijd worden voorkomen dat de klassikale evaluatie gecompliceerd verloopt doordat oplossingen voor twee problemen moeten worden afgewogen. Tijdens de klassikale introductie wordt leerlingen dan ook niet de instructie gegeven een oplossing te bedenken voor bacteriën en virussen. Leerlingen zullen dan waarschijnlijk niet denken aan een oplossing voor virusgeïnfecteerde cellen. Tegen het einde van de groepsbespreking kan leerlingen vervolgens worden gevraagd of hun oplossingen ook geschikt zijn voor virusgeïnfecteerde cellen.

Docent introduceert het ontwerpprobleem:

Hoe kan een binnengedrongen ziekteverwekker onschadelijk worden gemaakt?

Groepsbespreking

Ik verwacht dat leerlingen tijdens de groepsbespreking hoofdzakelijk zullen nagaan hoe een bacterie (en vrijgekomen virus) onschadelijk kan worden gemaakt. Leerlingen zullen waarschijnlijk, overeenkomstig de resultaten uit de eerste ronde, twee typen oplossingen overwegen: (1) stoffen die de bacterie onschadelijk maken, en; (2) omringen van de bacterie. Beide typen oplossingen worden hieronder nader besproken. Ik verwacht dat leerlingen elementen uit beide oplossingen zullen samenvoegen tot een soort eetcel; de ziekteverwekker wordt omringd en daarna door stoffen onschadelijk gemaakt (figuur 3.3.3).

Bij het onschadelijk maken van bacteriën middels stoffen zullen leerlingen waarschijnlijk denken aan stoffen die de celwand van bacteriën kapot kunnen maken. Uit de eerste ronde bleek dat leerlingen soms ook de term antistof gebruiken om dergelijke stoffen mee aan te duiden. Leerlingen zullen de term antistof dus waarschijnlijk niet in zijn immunologische betekenis gebruiken, maar als synoniem voor een stof die bacteriën onschadelijk kan maken. Ik verwacht dat leerlingen zich zullen realiseren dat dergelijke stoffen ook gevaarlijk kunnen zijn voor lichaamseigen materiaal,

omdat ze zich in je lichaam kunnen verspreiden. Bovendien zullen sommige leerlingen zich wel realiseren dat, wanneer de celwand van een bacterie door een gifstof wordt afgebroken, gifstoffen van de bacterie vrij kunnen komen.

Ik verwacht dat leerlingen om deze redenen in eerste instantie een voorkeur hebben voor de andere oplossing: omringen van bacteriën. Uit de eerste ronde bleek dat leerlingen omringen soms ook aanduiden met de immunologische term fagocytose. Waarschijnlijk zullen leerlingen zich realiseren dat ook lichaamseigen materiaal kan worden omringd. Ook verwacht ik dat ze als nadeel zullen formuleren dat de bacterie zich dan nog in het lichaam bevindt en niet definitief onschadelijk is gemaakt. Dit probleem kan worden opgelost door de cel met de bacterie af te voeren. Leerlingen weten dat afvalstoffen in het algemeen via het bloed naar de nieren gaan en daar worden afgevoerd. Ik verwacht dat leerlingen zich vervolgens zullen realiseren dat er veel bacteriën zijn en dat dus veel cellen nodig zijn om ze allemaal onschadelijk te maken en dat het lang duurt omdat de bacteriën naar de nieren moeten worden getransporteerd.

Een soort eetcel zou deze nadelen kunnen ondervangen. Deze omringt niet alleen de bacterie maar maakt hem ook onschadelijk. Een dergelijke cel kan meerdere bacteriën verwerken en hoeft niet afgevoerd te worden. Voor dit onschadelijk maken zullen sommige leerlingen een beroep doen op de eerder genoemde stoffen. Omdat de stoffen nu in de cel blijven, kunnen ze geen schade aanrichten. Waarschijnlijk zullen leerlingen zich wel realiseren dat eetcellen ook lichaamseigen materiaal kunnen aanvallen.

De docent kan tegen het eind van de groepsbespreking aan de groepjes die een eetcel hebben bedacht vragen, of deze ook geschikt is voor virusgeïnfecteerde cellen. Ik verwacht dat leerlingen zich zullen realiseren dat virusgeïnfecteerde cellen, die in een solide weefselverband liggen, niet kunnen worden omringd door een eetcel en dus ook niet onschadelijk kunnen worden gemaakt.

Klassikale evaluatie

Indien de groepsbespreking verloopt zoals verwacht dan is de klassikale evaluatie betrekkelijk eenvoudig. De meeste groepjes zijn waarschijnlijk uitgekomen op een soort eetcel en hebben de nadelen hiervan onderkend. Er zal dan alleen enige aanvullende informatie moeten worden aangeboden over de macrofaag.

De docent inventariseert de oplossingen en nadelen. Ik verwacht dat de meeste groepjes zijn uitgekomen op een soort eetcel met als bijbehorend nadeel dat ook lichaamseigen materiaal kan worden aangevallen. Indien nodig kan de docent nog vragen aan de leerlingen of de eetcel ook geschikt is voor het onschadelijk maken van virusgeïnfecteerde cellen. De docent geeft vervolgens aan dat eetcellen inderdaad een belangrijke rol spelen bij het onschadelijk maken van ziekteverwekkers. Immunologen noemen deze cellen macrofagen (macro=groot/faag=eten). Het opeten door een macrofaag noemt men fagocyteren. Eerst wordt een bacterie omringd, daarna onschadelijk gemaakt middels enzymen, afvalstoffen worden verwijderd. Dit proces wordt afgebeeld (figuur 3.3.1). Indien leerlingen de term fagocytose reeds hebben gebruikt en hiermee alleen verwijzen naar omringen, kan de docent aangeven dat fagocytose verwijst naar het hele proces van omringen, onschadelijk maken en verwijderen van afvalstoffen.

De docent vertelt vervolgens dat de nadelen van de eetcel nog wel moeten worden opgelost. Ten eerste moet worden voorkomen dat de macrofaag ook lichaamseigen materiaal fagocyteert. De docent geeft aan dat dit probleem in de volgende les wordt besproken. Ten tweede moet worden nagegaan hoe virusgeïnfecteerde cellen onschadelijk kunnen worden gemaakt, dit probleem wordt in stap 5 behandeld.

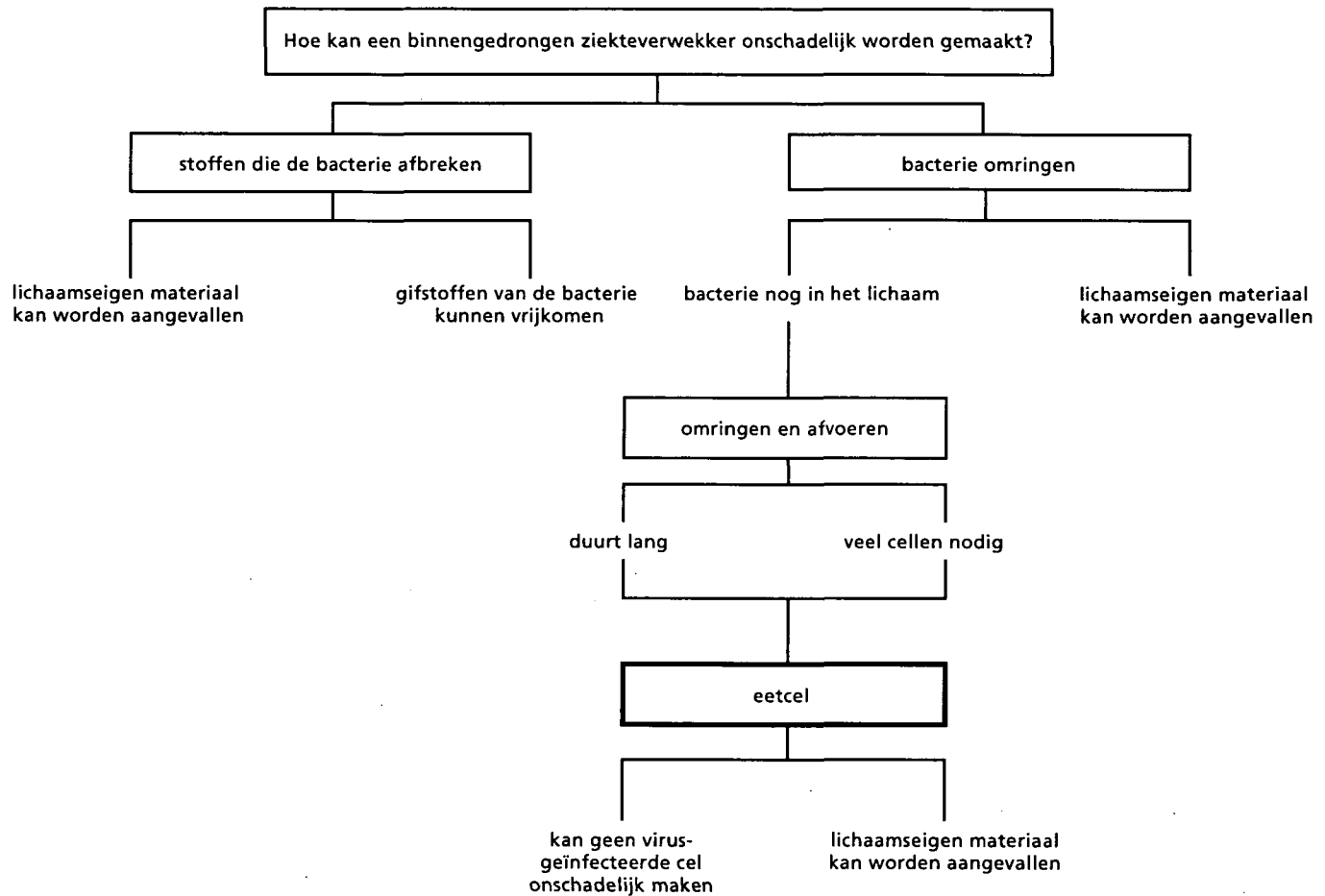
Beschrijving en verantwoording van de toepassingsvraag

Ik heb voor deze stap geen toepassingsvraag opgenomen om de kennis van het mechanisme te toetsen, omdat ik verwacht dat leerlingen in de groepsbespreking al tot een soort macrofaag zijn gekomen. Doordat de macrofaag en fagocytose een centrale rol spelen in de vervolgstappen, kan middels protocolanalyse worden nagegaan of leerlingen de juiste betekenis toekennen aan de aangeboden termen. Daarbij zal vooral worden nagegaan of leerlingen zich realiseren dat de term fagocytose betrekking heeft op de gehele activiteit van omringen, onschadelijk maken van de ziekteverwekker en het verwijderen van afvalstoffen.

Ik heb wel een toepassingsvraag opgenomen om na te gaan of leerlingen de kennis die ze in deze stap hebben verworven, geïntegreerd hebben met de kennis uit de vorige stap.

2. Waar in het lichaam zullen macrofagen zich hoofdzakelijk bevinden? Licht je antwoord toe?

Leerlingen hebben in deze stap geleerd dat macrofagen ziekteverwekkers onschadelijk maken. In de vorige stap hebben ze geleerd waar ziekteverwekkers ons lichaam kunnen binnendringen en dat ze zich daar snel kunnen vermeerderen. Voor een adequate beantwoording van deze vraag zullen leerlingen kennis uit beide stappen moeten combineren. Ziekteverwekkers vermeerderen zich razendsnel. Macrofagen moeten er dus snel bij zijn. Macrofagen zullen zich dan ook vooral nabij de plekken bevinden waar een ziekteverwekker het lichaam binnendringt, zoals huid en luchtwegen.



Figuur 3.3.3

Verwachte oplossingen en nadelen tijdens de groepsbespreking van stap 2

3.4 Stap 3

Leerlingen hebben in de vorige stap geleerd dat een macrofaag middels fagocytose een ziekteverwekker onschadelijk kan maken. Een macrofaag zou echter ook lichaamseigen materiaal kunnen fagocyteren. In deze stap wordt daarom een oplossing gezocht voor het volgende ontwerpprobleem:

Hoe kan worden voorkomen dat een macrofaag lichaamseigen materiaal fagocyteert?

Beschrijving en verantwoording van de doelstellingen

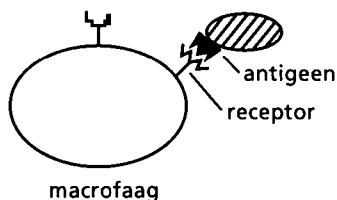
Doelstellingen voor stap 3

Leerlingen leren in deze stap:

- dat wordt voorkomen dat macrofagen lichaamseigen materiaal fagocyteren (functie)
- dat macrofagen specifieke receptoren bezitten waarmee ze antigenen op ziekteverwekkers kunnen herkennen, waarna de ziekteverwekkers worden gefagocyteerd (mechanisme)
- waarom bovengenoemd mechanisme de functie beter vervult dan enkele alternatieven
- dat er voor herkenning van ziekteverwekkers veel verschillende receptoren nodig zijn (nadeel)

Leerlingen leren in deze stap dat een macrofaag middels receptoren antigenen op de ziekteverwekker herkent. De bouw van een receptor wordt in deze lessenserie niet gedetailleerd besproken. Leerlingen leren alleen dat receptoren eiwitten zijn. Deze informatie wordt leerlingen aangeboden omdat ze alleen dan kunnen inzien wat het nadeel is van herkenning van lichaamseigen materiaal (zie verantwoording onderwijsleerproces). Leerlingen kunnen deze informatie ook gebruiken in de volgende stap waarin ze nagaan hoe voor ieder antigeen een aparte receptor kan worden aangemaakt. Meer details over de bouw van receptoren worden in deze stap niet besproken, omdat het eindexamen dit niet vereist en omdat deze kennis niet van belang is voor de voortgang van de gewenste kennisontwikkeling over het immuunsysteem.

Leerlingen leren dat de term antigeen verwijst naar moleculen die door receptoren worden herkend. Eigenlijk herkennen receptoren slechts bepaalde gedeelten van het molecuul. Deze gedeelten worden antigene determinanten of epitopen genoemd. Omdat echter de moleculaire bouw van de receptor om



Figuur 3.4.1

Herkenning van een bacterie door een macrofaag

eerder genoemde redenen niet wordt besproken is het ook niet zinvol nader in te gaan op het gedeelte van het molecuul dat wordt herkend.

In deze stap verwijst de term antigeen nog naar moleculen die door receptoren van macrofagen worden herkend. In het vervolg van de lessenserie leren leerlingen dat ook moleculen waarvoor andere celtypen van het immuunsysteem receptoren of antistoffen vormen, antigenen worden genoemd. Sommige immunologen gebruiken de term antigeen uitsluitend voor moleculen waartegen antistoffen kunnen worden gemaakt. De term antigeen is namelijk afgeleid van het Engelse 'antibody generator' (Roitt, 1997). Deze striktere betekenis van de term wordt hier niet gehanteerd omdat leerlingen dan bij de behandeling van elk nieuw celtype een andere term moeten leren voor het molecuul waarvoor een receptor of antistof wordt gevormd.

Leerlingen leren dat een receptor van een macrofaag slechts één type antigeen herkent en dat de herkenning dus specifiek is ¹. Dit lijkt af te wijken van de eindtermen en van veel schoolboeken waarin macrofagen worden gerekend tot de aspecifieke afweer. Specificiteit kan echter op receptorniveau en op celniveau worden gedefinieerd. Op receptorniveau betekent specifiek dat een receptor een type antigeen herkent. Op celniveau betekent specifiek dat een cel een type antigeen herkent. Een macrofaag is op celniveau aspecifiek en op receptorniveau specifiek. Een macrofaag bezit namelijk verschillende receptoren die ieder een ander type antigeen kunnen herkennen (zie 4.5). Om verwarring te voorkomen zal ik in de lessenserie specificiteit alleen op receptorniveau gebruiken. In de eindtermen en in veel schoolboeken wordt specificiteit op beide niveaus (door elkaar) gebruikt. Opvallend hierbij is dat wel wordt vermeld dat macrofagen meerdere ziekteverwekkers kunnen fagocyteren, maar dat er niet wordt aangegeven dat macrofagen het object dat ze fagocyteren eerst moeten herkennen. Hierdoor wordt gemakkelijk de indruk gewekt dat een macrofaag kan fagocyteren zonder het object te herkennen. In schoolboeken wordt niet, zoals in deze lessenserie, gewezen op het gevaar dat dit zou kunnen opleveren voor lichaamseigen materiaal.

Beschrijving en verantwoording van het onderwijsleerproces

Ik verwacht dat de bovengenoemde doelstellingen, na de klassikale introductie van het ontwerpprobleem, in twee fasen kunnen worden gerealiseerd (figuur 3.4.2). In de groepsbespreking kiezen leerlingen waarschijnlijk voor herkenning van structuren op lichaamseigen materiaal, die dan vervolgens niet worden gefagocyteerd. Voor herkenning van ziekteverwekkers zijn namelijk veel meer verschillende herkenningsstructuren nodig. Wanneer ze vervolgens in de klassikale evaluatie informatie krijgen over de aard van herkenningsstructu-

¹ Dat de receptor van een macrofaag slechts een type antigeen herkent is een didactische vereenvoudiging. De macrofaag beschikt over receptoren waarmee enkele typen antigenen kunnen worden herkend (breedbandspecificiteit).

fase	docent	leerlingen
<i>klassikale introductie</i>	hoe kan worden voorkomen dat een macrofaag lichaamseigen materiaal fagocyteert?	
<i>groepsbespreking</i>		de macrofaag herkent structuren op lichaamseigen materiaal
<i>klassikale evaluatie</i>	biedt informatie aan over structuurherkenning: antigeen/receptor	
	nadeel herkenning lichaamseigen materiaal?	als een receptor verandert, wordt lichaamseigen materiaal gefagocyteerd.
	nadeel herkenning van de ziekteverwekker?	er zijn veel verschillende receptoren nodig

Figuur 3.4.2

Overzicht onderwijsleerproces stap 3

ren zullen ze zich waarschijnlijk realiseren dat herkenning van lichaamseigen materiaal een zwaarwegend nadeel heeft. Ik verwacht dat ze dan kiezen voor herkenning van de ziekteverwekkers, die dan wel worden gefagocyteerd. Het nadeel van deze oplossing hebben leerlingen waarschijnlijk al in de groepsbespreking onderkend.

Klassikale introductie

In de eerste ronde had ik het ontwerpprobleem voor deze stap geformuleerd als: Hoe kan een macrofaag een onderscheid maken tussen zelf en niet-zelf? Immunologen maken vaak gebruik van deze formulering (Langman, 1989). Leerlingen herkenden dit probleem echter niet onmiddellijk als een herformulering van het nadeel dat ze in de vorige stap hadden bedacht. De termen 'zelf'- en 'niet-zelf' waren voor leerlingen niet duidelijk. 'Zelf' associeerden ze wel met lichaamseigen materiaal maar 'niet-zelf' werd niet verbonden met de ziekteverwekker. Bovendien wordt in deze probleemformulering al verondersteld dat een macrofaag een onderscheid moet maken tussen lichaamseigen materiaal en de ziekteverwekker. Voor leerlingen is niet onmiddellijk duidelijk waarom dit noodzakelijk is. Het probleem wordt nu dan ook zo geformuleerd dat er geen nieuwe termen en veronderstellingen worden geïntroduceerd: Hoe kan worden voorkomen dat een macrofaag lichaamseigen materiaal fagocyteert?

In de eerste ronde heeft de docent tijdens de klassikale introductie leerlingen niet alleen het ontwerpprobleem aangeboden. Hij heeft het hoofdprobleem

vervolgens in twee deelproblemen opgesplitst: (1) Hoe moet iets worden herkend (structuurherkenning)? en; (2) Wat moet worden herkend (de ziekteverwekker)? Hij heeft leerlingen tijdens de klassikale introductie over het eerste deelprobleem laten nadenken. Ik verwachtte dat ze daarbij al snel uit zouden komen bij een vorm van structuurherkenning. Dit bleek niet het geval te zijn. Enkele leerlingen overwogen weliswaar deze oplossing maar er werden ook alternatieven bedacht, zoals herkenning op het niveau van DNA en herkenning middels een herkenningsstof (teststof). Ik wil leerlingen in deze ronde de gelegenheid geven deze alternatieven voor structuurherkenning nader te doordenken. De twee deelproblemen worden dan ook niet meer in de klassikale introductie aan leerlingen voorgelegd. Ik verwacht dat leerlingen deze twee deelproblemen zelf zullen formuleren wanneer ze in de groepsbespreking trachten het hoofdprobleem op te lossen.

De docent introduceert het ontwerpprobleem: Hoe kan worden voorkomen dat een macrofaag lichaamseigen materiaal fagocyteert?

Groepsbespreking

Ik verwacht dat leerlingen tijdens de groepsbespreking een oplossing zullen bedenken voor de twee deelproblemen ('hoe moet iets worden herkend' en 'wat moet worden herkend') en dat ze beide problemen in samenhang zullen bespreken. Waarschijnlijk zullen leerlingen tijdens de groepsbespreking middels het afwegen van alternatieven uitkomen op structuurherkenning van lichaamseigen materiaal (figuur 3.4.3). Herkenning van lichaamseigen materiaal heeft echter een zwaarwegend nadeel (Langman, 1989). Indien een herkenningsstructuur op de macrofaag verandert, wordt het lichaamseigen materiaal niet meer herkend en dus gefagocyteerd. Uit de eerste ronde bleek dat leerlingen dit nadeel pas bedachten nadat hun was verteld dat herkenningsstructuren eiwitten zijn. Ze kunnen namelijk weten dat voor de aanmaak van eiwitten DNA nodig is. Ze kunnen ook weten dat het DNA door mutaties kan veranderen en hierdoor ook het eiwit. Omdat ik verwacht dat leerlingen tijdens de groepsbespreking nog alternatieven voor structuurherkenning overwegen, verstrek ik de informatie over herkenningsstructuren pas aan het begin van de klassikale evaluatie.

Ik verwacht dat leerlingen voor het deelprobleem 'hoe iets moet worden herkend', overeenkomstig de resultaten uit de eerste ronde, een drietal oplossingen zullen overwegen: herkenning van DNA, herkenning middels een herkenningsstof en herkenning van structuren (figuur 3.4.3). Leerlingen zullen waarschijnlijk nagaan of het DNA kan worden herkend. Ze weten namelijk dat het DNA in al onze lichaamscellen hetzelfde is en zich onderscheidt van DNA van de ziekteverwekker. Ze weten echter ook dat DNA in de cel gelegen is en dus moeilijk bereikbaar is zonder de cel te beschadigen. Een herkenningsstof heeft dit nadeel niet. Het object kan dan aan de buitenkant worden herkend.

Leerlingen zullen zich waarschijnlijk wel realiseren dat het nadeel van een herkenningsstof is dat zowel de herkenningsstof als de reactieproducten zich kunnen verspreiden, waardoor de herkenningsstof zijn doel niet bereikt of de reactieproducten niet kunnen worden gedetecteerd. Dit probleem kan worden voorkomen wanneer de macrofaag zich aan zijn doelwit bindt. Bij herkenning van structuren aan de buitenkant vindt deze binding ook inderdaad plaats. Een herkenningsstof is dan echter niet meer nodig. Leerlingen zullen zich waarschijnlijk realiseren dat een onderscheid kan worden gemaakt tussen lichaamseigen materiaal en de ziekteverwekker door macrofagen uit te rusten met herkenningsstructuren die of de ziekteverwekker of lichaamseigen materiaal herkennen. Ik verwacht dat sommige groepjes niet zullen onderzoeken hoe een bepaalde oplossing kan worden gerealiseerd. Dit is wel belangrijk, omdat nadelen van de bovengenoemde oplossingen pas bij concretisering duidelijk worden. Herkennen van DNA is bijvoorbeeld geen probleem zolang men niet nagaat hoe het DNA kan worden bereikt. De docent kan dan ook (indien nodig) tijdens de groepsbesprekingen aan leerlingen vragen hoe ze zich deze herkenning voorstellen.

Leerlingen zullen waarschijnlijk voor het deelprobleem 'wat moet worden herkend', overeenkomstig de resultaten uit de eerste ronde, twee oplossingen onderzoeken (figuur 3.4.3). Een macrofaag zou lichaamseigen materiaal kunnen herkennen. In dit geval fagocyteert een macrofaag alles wat hij tegenkomt behalve wanneer hij het object herkent (herkenning leidt tot een 'uit'-signaal). Een macrofaag zou ook de ziekteverwekker kunnen herkennen. In dit geval fagocyteert een macrofaag het object alleen wanneer hij het herkent (herkenning leidt tot een 'aan'-signaal). Ik verwacht dat leerlingen tijdens de groepsbespreking zullen kiezen voor herkenning van lichaamseigen materiaal. Leerlingen zullen zich waarschijnlijk realiseren dat ziekteverwekkers onderling meer verschillen dan lichaamseigen materiaal. Leerlingen weten namelijk dat er heel veel verschillende ziekteverwekkers zijn. Uit de eerste ronde bleek dat sommige leerlingen zich bovendien realiseren dat er telkens nieuwe ziekteverwekkers bijkomen. Ik verwacht dan ook dat leerlingen na afweging van alternatieven zullen concluderen dat macrofagen structuren herkennen van lichaamseigen materiaal omdat hiervoor minder verschillende herkenningsstructuren nodig zijn.

Klassikale evaluatie

In de klassikale evaluatie wordt leerlingen eerst informatie verstrekt over structuurherkenning. Nu leerlingen informatie hebben gekregen over receptoren kan hun worden gevraagd opnieuw na te denken over de nadelen van herkenning van de ziekteverwekker of lichaamseigen materiaal. Ik verwacht dat leerlingen, overeenkomstig de eerste ronde, zich zullen realiseren dat DNA en de receptoreiwitten kan respectievelijk kunnen veranderen. Ik verwacht dat ze zich ook realiseren dat elke verandering er toe leidt dat lichaamseigen materiaal niet meer wordt herkend en dus wordt gefagocyteerd.

Uit de eerste ronde bleek dat het niet voor alle leerlingen onmiddellijk duidelijk was waarom dit nadeel niet geldt voor herkenning van de ziekteverwekker. Immers, ook in dit geval verandert de receptor. Het bleek voldoende te zijn leerlingen expliciet te vragen waarom het nadeel niet geldt voor herkenning van de ziekteverwekker. Deze aanwijzing wordt dan ook in het scenario opgenomen.

De docent inventariseert de groepoplossingen en geeft aan dat eerst zal worden ingegaan op de vraag hoe herkenning plaatsvindt en daarna op de vraag wat moet worden herkend. Ik verwacht dat de meeste groepjes voor structuurherkenning hebben gekozen. De docent kan leerlingen vertellen dat immunologen herkenningsstructuren receptoren noemen en dat deze receptoren eiwitten zijn. De moleculen die een dergelijke receptor herkent noemt men antigenen. De docent kan ook aangeven dat een receptor maar een type antigeen kan herkennen. De herkenning is met andere woorden specifiek. Waarschijnlijk zijn leerlingen hier al impliciet van uit gegaan. De docent kan leerlingen nog expliciet vragen waarom een receptor specifiek moet zijn. Ik verwacht dat de leerlingen zullen aangeven dat anders fouten kunnen worden gemaakt bij de herkenning.

De docent vraagt leerlingen vervolgens wat moet worden herkend door de macrofaag. Moet de macrofaag met andere woorden receptoren bezitten voor lichaamseigen antigenen of voor antigenen van de ziekteverwekker? Hij tekent beide alternatieven op het bord. Om beide alternatieven duidelijk te kunnen onderscheiden vraagt de docent voor elk alternatief wat er gebeurt indien een macrofaag het object herkent. Ik verwacht dat leerlingen zich realiseren dat een macrofaag die lichaamseigen materiaal herkent, bij herkenning stopt met fagocytose. Hier zet de docent dan ook 'uit' bij. En dat de macrofaag die de ziekteverwekker herkent, start met fagocytose. Hier zet de docent dan ook 'aan' bij. Leerlingen wordt vervolgens gevraagd wat het nadeel is van herkenning van de ziekteverwekker. Dit nadeel hebben ze waarschijnlijk al eerder bedacht en kunnen ze nu in termen van antigeen en receptor beschrijven. Omdat er veel verschillende ziekteverwekkers zijn met veel verschillende antigenen zijn er ook veel verschillende receptoren nodig. Ik verwacht dat leerlingen met de informatie over receptoren nu ook het nadeel onderkennen van herkenning van lichaamseigen materiaal. Zij weten dat DNA en dus receptoreiwitten kan respectievelijk kunnen veranderen. Elke verandering van de receptor leidt er toe dat lichaamseigen materiaal niet meer wordt herkend en dus wordt gefagocyteerd. Waarschijnlijk zullen leerlingen op grond van dit nadeel kiezen voor herkenning van de ziekteverwekker.

De docent kan nog expliciet vragen waarom dit nadeel in mindere mate geldt voor herkenning van de ziekteverwekker. Leerlingen zullen zich dan waarschijnlijk realiseren dat een macrofaag in dit geval alleen iets fagocyteert wanneer het wordt herkend. Wanneer een receptor verandert, wordt het antigeen op de ziekteverwekker niet meer herkend en wordt deze dus niet gefagocyteerd. Echter, lichaamseigen materiaal wordt ook niet herkend en ook niet gefagocyteerd. De macrofaag is dus wel 'nutteloos', maar niet gevaarlijk geworden.

Beschrijving en verantwoording van de toepassingsvragen

De meeste aspecten van de eerder genoemde doelstellingen kunnen middels protocolanalyse worden getoetst. Leerlingen krijgen echter in de klassikale evaluatie ook extra informatie over herkenning aangeboden. Daarvan wil ik met name nagaan of leerlingen zich realiseren waarom specifieke herkenning nodig is. Dit aspect wordt namelijk alleen in deze klassikale evaluatie kort aangestipt, maar heeft belangrijke consequenties voor het vervolg van de kennisontwikkeling. Middels toepassingsvraag 3 wordt deze kennis getoetst.

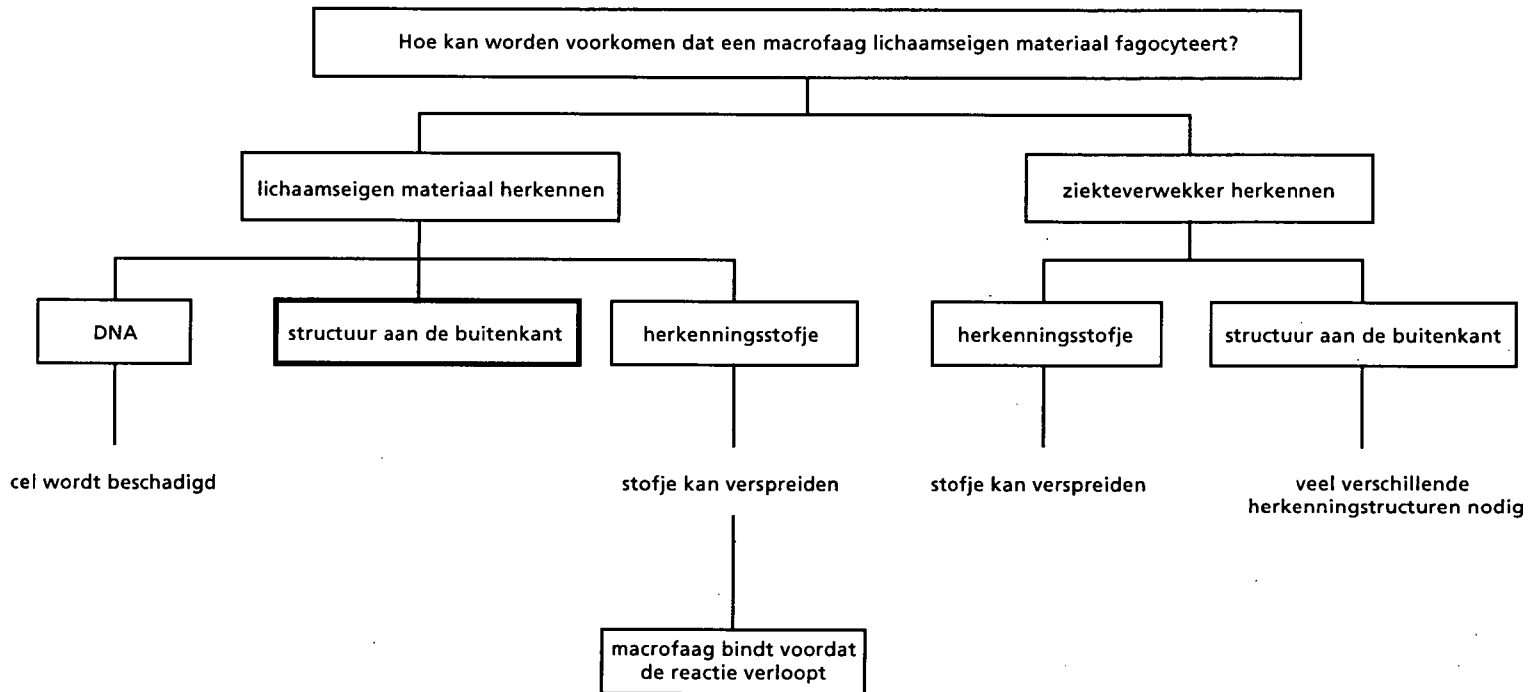
3. Macrofagen dragen receptoren op hun celoppervlak die elk een type antigeen kunnen herkennen. Het nadeel van deze oplossing is dat voor ieder antigeen een aparte receptor beschikbaar moet zijn. Het zou veel eenvoudiger zijn als de macrofaag receptoren zou bezitten die elk meerdere typen antigenen kunnen herkennen. Leg uit wat een voordeel en een nadeel zou kunnen zijn van deze oplossing.

Het voordeel van receptoren die meerdere typen antigenen kunnen herkennen, is dat er minder verschillende receptoren nodig zijn. Het nadeel van deze vorm van herkenning is dat er grotere kans bestaat dat ook lichaamseigen materiaal wordt herkend en gefagocyteerd.

Een ander aspect dat alleen in de klassikale evaluatie aan de orde wordt gesteld is het nadeel van lichaamseigen herkenning. Het is van belang dat alle leerlingen dit nadeel onderkennen omdat ze anders niet inzien waarom herkenning van de ziekteverwekker een beter alternatief is. Leerlingen kunnen dit nadeel alleen begrijpen wanneer ze inzien dat door mutatie receptoren (en antigenen) kunnen veranderen. Met de volgende toepassingsvraag wil ik nagaan of leerlingen dit hebben begrepen.

4. Soms komt het toch voor dat macrofagen in actie komen tegen lichaamseigen cellen. Bedenk tenminste twee manieren waardoor dit zou kunnen gebeuren.

Leerlingen dienen zich te realiseren dat receptoren kunnen veranderen door mutaties in de macrofaag, en dat antigenen kunnen veranderen door mutaties in lichaamseigen cellen.



Figuur 3.4.3

Verwachte oplossingen en nadelen tijdens de groepsbespreking van stap 3

3.5 Stap 4

Leerlingen hebben in de vorige stap geleerd dat macrofagen receptoren bezitten waarmee ze antigenen kunnen herkennen op de ziekteverwekker, die vervolgens wordt gefagocyteerd. Omdat er heel veel verschillende antigenen zijn, zullen er veel verschillende receptoren moeten worden aangemaakt. In deze stap gaan leerlingen dan ook een oplossing zoeken voor het volgende ontwerprobleem:

Hoe kan voor ieder antigeen een receptor worden aangemaakt?

Beschrijving en verantwoording van de doelstellingen

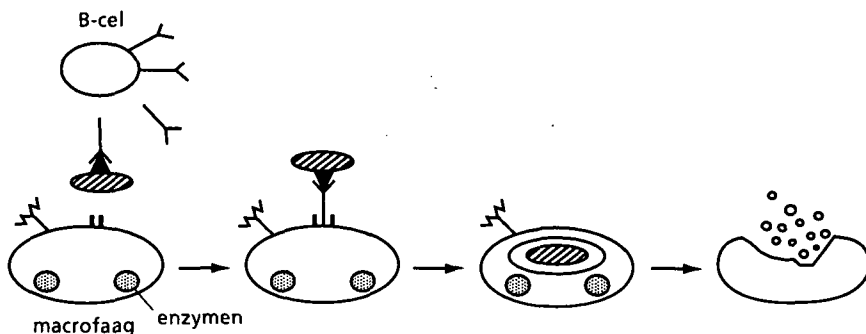
Doelstellingen voor stap 4

Leerlingen leren in deze stap:

- dat voor ieder antigeen een receptor wordt aangemaakt (functie)- dat voor ieder antigeen door B-cellen antistoffen moeten worden aangemaakt (functie)
- dat macrofagen slechts voor enkel typen antigenen receptoren kunnen aanmaken (mechanisch)
- dat macrofagen dus slechts enkele typen antigenen kunnen herkennen (nadeel)
- dat B-cellen de macrofagen assisteren bij de herkenning van antigenen (functie)
- dat B-cellen deze functie vervullen door productie van antistoffen. Deze antistoffen binden aan antigenen op de ziekteverwekker. De macrofaag heeft speciale receptoren waarmee de 'staart' van een antistof kan worden herkend, waarna antistof en ziekteverwekker worden gefagocyteerd (mechanisme)
- dat voor ieder antigeen door B-cellen antistoffen moeten worden aangemaakt (functie)
- dat B-cellen antistoffen produceren door een variatie-selectiemechanisme: door genherschikking worden willekeurig B-cellen aangemaakt die ieder één type receptor dragen. Het antigeen 'selecteert' de B-cel met de juiste receptor. Deze B-cel gaat antistoffen produceren (mechanisme)
- waarom bovengenoemd mechanisme deze functie beter vervult dan enkele alternatieven
- dat de kans klein is dat een B-cel met juiste receptor een antigeen ontmoet (nadeel)

Macrofagen zijn zelf niet in staat voor ieder antigeen een receptor aan te maken. Herkenning van antigenen wordt grotendeels uitbesteed aan B-cellen. Deze produceren antistoffen die fungeren als een soort adapter¹. Met de ene kant kunnen ze binden aan het antigeen en met de andere kant kunnen ze binden aan speciale receptoren op een macrofaag, die vervolgens de ziekteverwekker kan fagocyteren (figuur 3.5.1). De macrofagen zorgen dus primair voor het onschadelijk maken van de ziekteverwekker en de B-cellen zorgen voor de herkenning. Deze taakverdeling kan, voor zover mij bekend, niet functioneel worden verantwoord. Waarschijnlijk heeft deze taakverdeling een evolutionaire achtergrond. Langman (1989) heeft hiervoor een mogelijk evolutionair scenario geschetst. Het voert echter te ver om in het kader van deze lessenserie leerlingen deze evolutionaire verklaring aan te bieden. Zij hoeven de kennis over de taakverdeling dan ook niet te kunnen verantwoorden.

¹ Antistoffen zijn receptoren die het celoppervlak kunnen verlaten.



Figuur 3.5.1

Macrofaag krijgt hulp van een B-cel bij de herkenning van een ziekteverwekker

B-cellen zullen dus voor heel veel verschillende antigenen antistoffen moeten kunnen aanmaken. Twee typen oplossingen voor dit probleem kunnen worden onderscheiden: een variatie-selectiemechanisme en een instructiemechanisme. Bij een variatie-selectiemechanisme worden willekeurig B-cellen aangemaakt en selecteert het antigeen de B-cel met de juiste receptor, deze gaat vervolgens antistoffen produceren. Bij een instructiemechanisme 'instrueert' het antigeen de B-cel welk type antistof moet worden aangemaakt. Een instructiemechanisme lijkt op het eerste gezicht de oplossing met de minste nadelen. Bij een selectiemechanisme is immers de trefkans tussen een B-cel met de juiste receptor en het antigeen gering, en worden veel B-cellen voor niets aangemaakt. In de eerste ronde bleek ook dat leerlingen de voorkeur geven aan een instructiemechanisme.

Een systeembepierking maakt het echter vrijwel onmogelijk dat een instructiemechanisme kan zijn ontstaan. Antistoffen zijn, evenals receptoren, eiwitten. Deze kunnen alleen worden aangemaakt wanneer de informatie voor de samenstelling van het eiwit op het DNA aanwezig is. Een instructiemechanisme veronderstelt dus dat de informatie van het antigeen naar het DNA moet worden overgedragen. Deze overdracht is problematisch, zo niet onmogelijk. In deze stap wordt dan ook nader ingegaan op de informatieoverdracht van antigeen naar DNA, zodat leerlingen leren inzien waarom het onwaarschijnlijk is dat een instructiemechanisme is ontstaan.²

In deze stap wordt vervolgens een variatie-selectiemechanisme nader uitgewerkt. Leerlingen leren dat middels een genherrangschikkingsmechanisme een grote diversiteit aan antistoffen kan worden geproduceerd. Genher-

² In de geschiedenis van de immunologie zijn ook verschillende instructiemechanismen bedacht (Silverstein, 1989). Toen was nog niet bekend dat voor eiwitsynthese DNA noodzakelijk was. Men dacht dat het antigeen kon worden gebruikt als mal, waaraan eiwitten kunnen worden gemodelleerd.

rangschikking behoort niet tot de eindexamenstof. Om twee redenen wordt het mechanisme hier toch behandeld. Ten eerste verwacht ik dat de plausibiliteit van het selectiemechanisme voor leerlingen zal toenemen wanneer ze weten hoe heel veel verschillende antistoffen kunnen worden geproduceerd. Ten tweede is de wijze waarop de diversiteit wordt geproduceerd bepalend voor de vervolgstappen in de lessenserie. Een genherrangschikkingsmechanisme zorgt er namelijk voor dat iedere B-cel slechts één type receptor kan aanmaken. Dit heeft als nadeel dat de trefkans tussen een antigeen en een B-cel met juiste receptor klein is. Dit trefkansprobleem staat in de volgende stap centraal. Wanneer kennis over genherrangschikking ontbreekt, is het voor leerlingen niet duidelijk waarom het trefkansprobleem zich voordoet en weten ze dus ook niet waarom de onderdelen van het immuunsysteem die in stap 5 aan de orde worden gesteld (en die wel in de eindtermen worden behandeld) nodig zijn.

Leerlingen leren in deze stap een vereenvoudigd genherrangschikkingsmechanisme kennen (figuur 3.5.2). Ze leren dat B-cellen ontstaan door deling van stamcellen in het beenmerg. Een stamcel bevat alle gendelen voor het maken van receptoren en antistoffen (A1A2A3... B1B2B3... C1C2C3...). Als een stamcel gaat delen wordt aan elke dochtercel een bepaalde combinatie van gendelen meegegeven. Dus de ene B-cel krijgt bijvoorbeeld A1B1C1, een andere B-cel krijgt A1B3C2 etc. Wanneer nu een antigeen bindt aan de receptor van de B-cel gaat deze cel meer antistofmoleculen produceren van dezelfde specificiteit.

Dit genherrangschikkingsmechanisme is voor de leerlingen op een aantal punten vereenvoudigd:

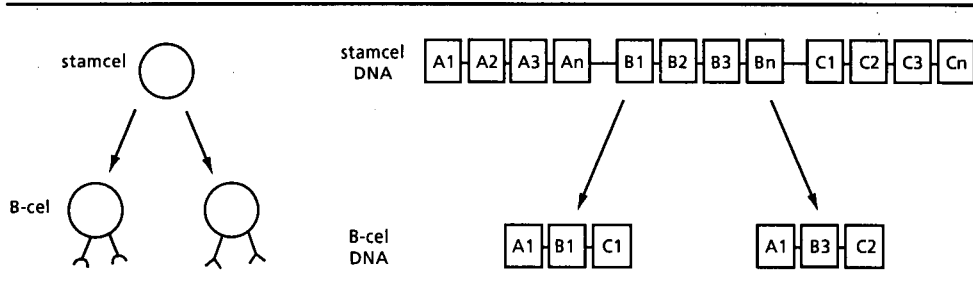
- Er wordt hier ten onrechte vanuit gegaan dat een receptor (en antistof) uit één eiwitketen bestaat. In werkelijkheid bestaat een receptor uit meerdere eiwit ketens en zijn dus meerdere genen (en bijbehorende gendelen) verantwoordelijk voor de samenstelling van een functionele receptor. In stap drie is verantwoord waarom in deze lessenserie deze complexe bouw van de receptor niet wordt behandeld. Daarom ga ik er bij de behandeling van genherrangschikking ook vanuit dat een receptor (en antistof) uit één eiwitketen bestaat. Ik maak dan ook geen gebruik van de letters die immunologen gebruiken om de gendelen mee aan te duiden.

- Genherrangschikking wordt hier ten onrechte voorgesteld als proces dat in één stap plaatsvindt. In de ontwikkeling van B-cellen kunnen echter een aantal fasen worden onderscheiden. Deze worden hier niet genoemd omdat leerlingen (nu nog) niet duidelijk kan worden gemaakt waarom deze tussenfasen nodig zijn; bovendien zijn deze tussenfasen niet relevant voor de voortgang van de gewenste kennisontwikkeling.

- Ook wordt er hier ten onrechte vanuit gegaan dat middels genherrangschikking kan worden voorkomen dat er receptoren (en antistoffen) tegen lichaamseigen antigenen kunnen worden gevormd. Er kunnen echter incidenteel ook receptoren ontstaan voor lichaamseigen antigenen. In de eerste ronde is dit probleem ook in deze stap verkend. In de laatste stap van het scenario gingen leerlingen na hoe kan worden voorkomen dat cellen (B-cellen en Tkiller-cellen) met receptoren voor lichaamseigen antigenen ook daad-

werkelijk in actie komen tegen lichaamseigen materiaal. Ik heb om eerder genoemde redenen besloten deze stap niet meer in het scenario op te nemen (3.1). Vorming van receptoren voor lichaamseigen antigeen wordt in deze stap dan ook niet geïmplementeerd.

• Tevens wordt er ten onrechte vanuit gegaan dat mutaties geen rol spelen bij het genereren van receptor diversiteit. Tijdens de deling van B-cellen, zorgen mutaties echter voor additionele diversiteit. Omdat deling van B-cellen pas in de volgende stap aan de orde zal worden gesteld, wordt in deze stap de rol van mutaties bij het genereren van additionele diversiteit niet behandeld.



Figuur 3.5.2

Genherschikking

Beschrijving en verantwoording van het onderwijsleerproces

Ik verwacht dat de bovengenoemde doelstellingen in vijf fasen kunnen worden gerealiseerd (figuur 3.5.3): (1) In de klassikale introductie wordt leerlingen verteld dat macrofagen niet voor alle antigenen receptoren kunnen aanmaken en bij de herkenning hulp krijgen van B-cellen die antistoffen produceren; (2) Ik verwacht dat leerlingen in de groepsbespreking zullen kiezen voor B-cellen die antistoffen produceren middels een gericht instructiemechanisme; (3) Wanneer in de klassikale evaluatie de informatieoverdracht tussen antigeen en DNA wordt geïmplementeerd zullen ze waarschijnlijk kiezen voor een variatie-selectie mechanisme; (4) Leerlingen leren vervolgens dat variatie wordt gecreëerd middels een genherschikkingsmechanisme; (5) Wanneer ze weten hoe variatie op DNA-niveau wordt gegenereerd, zullen ze zich waarschijnlijk realiseren dat iedere B-cel maar voor één type antigeen receptoren kan maken en dat diensgevolg de trefkans tussen een antigeen en een B-cel met juiste receptor klein is.

Klassikale introductie

In de klassikale introductie wordt de taakverdeling tussen macrofagen en B-cellen aan de orde gesteld. In de eerste ronde is deze kennis pas aan het eind van de klassikale evaluatie aangeboden. De docent heeft toen de leerlingen tijdens de klassikale introductie het probleem voorgelegd hoe voor ieder antigeen een receptor kan worden aangemaakt. Leerlingen bedachten hiervoor een me-

chanisme en waren tijdens de groepsbespreking en klassikale evaluatie in de veronderstelling dat een macrofaag volgens dit mechanisme zou werken. Aan het eind van de klassikale evaluatie werd leerlingen verteld dat macrofagen niet op deze manier werken, maar dat ze hulp krijgen van B-cellen die wel volgens dit mechanisme antistoffen aanmaken. De resultaten van de eerste ronde wezen uit dat enkele leerlingen eigenschappen van macrofagen toeschreven aan B-cellen. Zo gingen zij er vanuit dat een B-cel over meerdere typen receptoren beschikt en de ziekteverwekker na herkenning kan fagocyteren. Ik kies er daarom voor de taakverdeling nu in de klassikale introductie aan de orde te stellen. Dit betekent dan ook dat leerlingen vanaf het begin een oplossing moeten zoeken voor het probleem 'hoe kan voor ieder antigeen een antistof worden aange-

fase	docent	leerlingen
<i>klassikale introductie</i>	macrofagen beschikken over een beperkt aantal typen receptoren. Hoe kan hulp worden geboden? B-cellen maken verloopstekkers (=antistoffen). Macrofagen kunnen een antigeen-antistof complex fagocyteren hoe kan voor ieder antigeen een antistof worden aangemaakt? (antistoffen zijn eiwitten)	verloopstekker
<i>groepsbespreking</i>		gericht instructiemechanisme
<i>klassikale evaluatie</i>	problematiseert informatie-overdracht van antigeen naar DNA. Als instructie niet mogelijk is, hoe dan? (analogie aanbieden) hoe kan variatie worden gegenereerd? (analogie aanbieden) legt genherschikingsmechanisme uit nadeel van een variatieselectie mechanisme middels genherschikking?	variatie-selectie mechanisme gen voor receptor samenstellen uit gendelen elke B-cel bezit één type receptor zodat de kans dat een antigeen een B-cel met juiste receptor ontmoet klein is

Figuur 3.5.3

Overzicht onderwijsleerproces stap 4

maakt'. Daarbij wordt speciale aandacht besteed aan de term antistof omdat leerlingen hier veelal een andere betekenis aan toekennen.

In de klassikale introductie wordt ook aangeboden dat antistoffen, evenals receptoren, eiwitten zijn. In de eerste ronde is dit niet gebeurd. Leerlingen bleken toen tijdens de groepsbespreking instructiemechanismen te bedenken waarbij DNA geen rol speelde. Het antigeen fungeerde veelal rechtstreeks als een mal voor de constructie van een antistof. In de klassikale evaluatie werd hen pas verteld dat antistoffen eiwitten zijn. Leerlingen realiseerden zich toen dat een instructiemechanisme impliceert dat er informatie van het antigeen naar DNA moet worden overgebracht. Ze kregen echter nauwelijks tijd na te gaan waarom de informatieoverdracht problematisch is. Ik wil leerlingen nu al tijdens de groepsbesprekingen laten nadenken over het probleem van informatieoverdracht. Daarom wordt hen al in de klassikale introductie verteld dat antistoffen eiwitten zijn. Leerlingen realiseren zich waarschijnlijk dan al tijdens de groepsbespreking dat DNA een rol speelt bij de productie van antistoffen en dat in het geval van een instructiemechanisme dus informatie over het antigeen moet worden overgebracht naar het DNA.

De docent introduceert het ontwerpprobleem: Hoe kan voor ieder antigeen een receptor worden aangemaakt? Opdat leerlingen dit probleem zich enigszins voor kunnen stellen, kan de docent aangeven dat een mens tijdens zijn leven met tenminste een miljoen verschillende antigenen wordt geconfronteerd. De docent geeft aan dat macrofagen slechts over een beperkt aantal verschillende receptoren blijken te beschikken. Macrofagen moeten dus hulp krijgen bij de herkenning van ziekteverwekkers. De docent kan de leerlingen vragen hoe de macrofaag geholpen kan worden. Wellicht dat enkele leerlingen denken aan een soort verloopstekker of adapter, die met de ene kant specifiek bindt aan het antigeen en met de andere kant bindt aan de macrofaag. De docent kan aangeven dat dergelijke verloopstekkertjes inderdaad voorkomen en tekent deze op het bord (figuur 3.5.1). Deze verloopstekkertjes noemen immunologen antistoffen. Voor veel leerlingen zal dit een verrassing zijn omdat zij bij antistoffen vaak denken aan stoffen die bacteriën direct onschadelijk maken (zie stap 2). De docent kan dan ook aangeven dat antistoffen dus slechts dienen voor herkenning en dat het onschadelijk maken van de ziekteverwekker wordt overgelaten aan de macrofaag. Deze antistoffen kunnen met hun 'kop' binden aan het antigeen van een bacterie en met hun 'staart' binden aan een speciale antistofreceptor op de macrofaag. Deze antistofreceptor is niet specifiek. Hij kan alle 'staarten' van alle verschillende antistoffen binden. De docent legt vervolgens uit dat antistoffen worden geproduceerd door een soort witte bloedcellen, de B-cellen, en tekent deze op het bord (figuur 3.5.1). De docent presenteert nu het volgende probleem aan de leerlingen: Hoe kan voor ieder antigeen een antistof worden aangemaakt? De docent geeft hierbij aan dat antistoffen evenals receptoren eiwitten zijn.

Groepsbespreking

Uit de vorige ronde bleek dat leerlingen een instructiemechanisme zo vanzelfsprekend vinden dat een selectiemechanisme tijdens de groepsbespreking niet eens wordt overwogen. Een instructiemechanisme lijkt ook de meest voor de hand liggende oplossing. Wanneer een antistof moet worden gemaakt die past op het antigeen, dan zal eerst moeten worden nagegaan hoe het antigeen eruit ziet zodat deze informatie kan worden gebruikt bij de aanmaak van een antistof. Ik verwacht dat leerlingen dan ook een aantal type instructiemechanismen zullen overwegen (figuur 3.5.4). Ik verwacht niet dat leerlingen daarbij direct de informatie zullen gebruiken dat antistoffen eiwitten zijn. Wellicht is het daarvoor nodig dat de docent doorvraagt hoe het instructiemechanisme werkt. Wanneer leerlingen zich realiseren dat informatie van het antigeen moet worden overdragen op het DNA zullen ze daar waarschijnlijk voorzieningen voor bedenken. Ik verwacht niet dat leerlingen tijdens de groepsbespreking al een instructiemechanisme verwerpen.

Ik verwacht dat leerlingen een drietal instructiemechanismen bedenken en bediscussiëren: geheugengestuurde instructie; blinde instructie; en gerichte instructie. Leerlingen die geheugengestuurde instructie voorstellen, gaan er vanuit dat de B-cel alle informatie voor de aanmaak van antistoffen reeds bezit. Wanneer de B-cel een antigeen herkent 'zoekt hij op' welke antistof hiervoor moet worden gemaakt. Het nadeel van geheugengestuurde instructie zullen leerlingen wel onderkennen. Dit mechanisme veronderstelt namelijk dat de informatie voor de aanmaak van alle antistoffen die je nodig hebt al aanwezig is. Leerlingen weten waarschijnlijk dat er nieuwe ziekteverwekkers kunnen ontstaan en dus ook nieuwe antigenen. Hoe kun je antistoffen maken voor antigenen waarmee je nog niet eerder bent geconfronteerd? Het mechanisme zal dus moeten worden uitgebreid zodat ook voor nieuwe antigenen antistoffen kunnen worden gemaakt. Ik verwacht dat leerlingen dit probleem oplossen door de B-cel uit te rusten met een voorziening die informatie kan opnemen van het antigeen. Ik noem dit blinde instructie. Kenmerkend voor dit mechanisme is dat het antigeen de B-cel instrueert welke antistof moet worden gemaakt, maar dat de cel niet kan bepalen voor welk antigeen een antistof wordt gemaakt. Ik verwacht dat leerlingen zullen bedenken dat met een dergelijk mechanisme ook antistoffen voor lichaamseigen antigenen kunnen worden gemaakt. Dit mechanisme zullen ze waarschijnlijk dan ook uitbreiden met een voorziening waardoor er geen antistoffen tegen lichaamseigen antigenen kunnen worden gevormd. Een dergelijk mechanisme noem ik gerichte instructie.

De drie mechanismen zijn nu in globale termen besproken. Omdat ik verwacht dat alle leerlingen uiteindelijk voor gerichte instructie zullen kiezen zal ik voor dit mechanisme bespreken welke specificaties ik van leerlingen verwacht (figuur 3.5.4). Leerlingen weten dat antistoffen eiwitten zijn en dat de code hiervoor in het DNA ligt. Dit betekent dat tenminste een drietal functies door een gericht instructiemechanisme moeten worden vervuld: (1) Informatieoverdracht van antigeen naar DNA; (2) Aanmaken van antistoffen; (3) Voorkomen dat antistoffen tegen lichaamseigen antigenen worden aangemaakt. De docent kan leerlingen, indien nodig, vragen hoe deze functies kunnen worden vervuld.

Wanneer leerlingen wordt gevraagd hoe de informatieoverdracht plaatsvindt, zullen leerlingen waarschijnlijk denken aan de receptoren die in de vorige stap zijn behandeld. Deze receptoren moeten echter wel vervormbaar zijn. Ze moeten immers alle antigenen kunnen binden. Ik verwacht niet dat leerlingen zich hier zullen realiseren dat receptoren ook eiwitten zijn en dat de vorm dus is vastgelegd in het DNA. Ik verwacht niet dat leerlingen zich een concrete voorstelling kunnen maken van de wijze waarop de vorm van het antigeen vervolgens kan worden vertaald in een DNA-code voor een corresponderende antistof. Ze zullen zich waarschijnlijk wel realiseren dat DNA moet worden aangemaakt omdat het niet mogelijk is dat het DNA voor alle antistoffen al van te voren aanwezig is. Hoewel ze dus waarschijnlijk geen concrete voorstelling hebben van de informatieoverdracht, verwacht ik niet dat dit een reden voor hen is om hun instructiemechanisme te verwerpen.

Bij het aanmaken van antistoffen zullen ze waarschijnlijk denken aan eiwitsynthese. Dit hebben ze eerder gehad. Ik verwacht niet dat ze hier diep op in zullen gaan. Dit is voor deze stap ook niet nodig. Ik verwacht dat leerlingen meerdere oplossingen zullen overwegen om te voorkomen dat antistoffen tegen lichaamseigen antigenen worden aangemaakt. Leerlingen kunnen de B-cel uitrusten met een receptor waarmee lichaamseigen antigenen kunnen worden herkend. Ik verwacht echter dat ze zich van de vorige stap nog zullen herinneren dat een dergelijke receptor niet veilig is, omdat elke mutatie er toe kan leiden dat lichaamseigen antigenen niet meer worden herkend. Leerlingen zullen dan wellicht overwegen dat de B-cel op DNA-niveau een onderscheid te maken tussen antigenen van de ziekteverwekker en lichaamseigen materiaal. Uit de vorige ronde bleek dat leerlingen deze oplossing veelal aanduiden met scannen van DNA.

Klassikale evaluatie

Ik verwacht dat leerlingen tijdens de groepsbespreking kiezen voor een vorm van gerichte instructie. De klassikale evaluatie verloopt nu in drie fasen. Eerst wordt de informatieoverdracht van antigeen naar DNA geproblematiseerd. Dit leidt tot vervanging van een instructiemechanisme door een selectiemechanisme. Daarna wordt nagegaan hoe variatie in een selectiemechanisme kan worden geproduceerd (genherschikking). Hiermee wordt voor leerlingen ook duidelijk dat een B-cel slechts een type antistof kan aanmaken. Tenslotte verwacht ik dat leerlingen zich zullen realiseren dat het nadeel van dit selectiemechanisme is dat de trefkans van een antigeen met een B-cel met juiste receptor gering is. Ik zal de drie fasen hieronder nader beschrijven en verantwoorden.

problematiseren van de informatieoverdracht

In de eerste ronde heb ik leerlingen tijdens de klassikale evaluatie nauwelijks laten nadenken over het informatieoverdrachtsprobleem. Leerlingen realiseerden zich pas tijdens de klassikale evaluatie dat DNA een rol speelt bij antistofproductie. Vervolgens werd leerlingen verteld dat de overdracht van informatie van antigeen naar DNA moeilijk is en werd leerlingen het centrale dogma uit de moleculaire genetica aangeboden: informatie kan wel van DNA naar eiwit, maar niet van eiwit naar DNA. Deze informatie was niet voor alle

leerlingen overtuigend. Dit bleek toen het selectiemechanisme werd besproken. Men vroeg zich af of informatie toch niet kon worden overdragen naar het DNA. Tevens bleek uit de resultaten van de toepassingsvragen dat sommige leerlingen een instructieopvatting hadden gecombineerd met een genherrangschikkingsmechanisme. Deze leerlingen gingen er vanuit dat een stamcel gericht genen kan samenstellen zodat B-cellen met de juiste receptor ontstaan.

Ik wil nu het centrale dogma daarom niet als dogma presenteren, maar leerlingen zelf in de gelegenheid stellen te ontdekken dat informatieoverdracht nagenoeg onmogelijk is. Leerlingen hebben hier waarschijnlijk tijdens de groepsbesprekingen al kort over nagedacht, maar de moeilijkheid waarschijnlijk nog onvoldoende onderkend. Ik wil leerlingen de complexiteit van de informatieoverdracht duidelijk maken met behulp van de cake-analogie (zie hieronder).

De docent inventariseert de oplossingen. Ik verwacht dat de groepjes voor een gericht instructie mechanisme hebben gekozen. De wijze waarop de leerlingen de drie functies van het mechanisme hebben ingevuld worden nog niet in detail besproken. De docent constateert dat alle groepjes er vanuit gaan dat er informatie van het antigeen naar DNA moet worden gebracht. De docent kan nu eerst de informatieoverdracht van antigeen naar DNA problematiseren. Leerlingen kan worden gevraagd wat er eigenlijk moet gebeuren om de vorm van het antigeen om te zetten in een DNA-code voor een corresponderende antistof. Om de complexiteit van een dergelijke procedure inzichtelijk te maken kan de docent de volgende analogie presenteren. Stel je krijgt een heerlijke cake voor je verjaardag. Je wilt graag een dergelijke cake maken. Je hebt alleen geen recept voor de cake. Er is gelukkig nog wel een stuk cake over. Hoe 'vertaal' je de cake in een recept waarmee een soortgelijke cake kan worden gemaakt? De docent hoeft de leerlingen niet te vragen dit probleem op te lossen. Het gaat erom dat ze een idee krijgen van de complexiteit. De docent kan vervolgens leerlingen vragen hoe de cake en het recept zich verhouden tot elementen uit de antistofproductie. Ik verwacht dat leerlingen zullen aangeven dat het recept staat voor DNA en de cake voor het antigeen. De docent kan nu doorvragen waarom antistofproductie dan eigenlijk nog ingewikkelder is dan cakeproductie. Ik verwacht dat leerlingen zich zullen realiseren dat je bij de cakeproductie een cake als voorbeeld neemt voor de ontwikkeling van een recept voor een cake (cake→recept→cake). Bij antistofproductie daarentegen neem je een antigeen als voorbeeld voor de ontwikkeling van een recept voor een antistof (antigeen→recept→antistof). Ik verwacht dat leerlingen zich nu realiseren dat het vrijwel onmogelijk is om informatie van het antigeen om te zetten in een DNA-code voor een antistof. De docent kan nu aangeven dat dit in werkelijkheid ook niet gebeurt.

Wanneer de leerlingen inzien dat de overdracht van informatie van antigeen naar DNA onmogelijk is, is ook een instructiemechanisme niet mogelijk. Hiermee hebben leerlingen echter nog geen selectiemechanisme ontwikkeld. Uit de eerste ronde bleek dat leerlingen niet zonder hulp op een dergelijk mechanisme kunnen komen. De 'kledingzaak-analogie' bleek hen hierbij te helpen.

De docent kan nu opnieuw een analogie presenteren waardoor leerlingen op het spoor kunnen komen van een variatie-selectie mechanisme. Stel je bent eigenaar van een modezaak. Je weet niet van te voren welke kleren je klanten zullen kopen. Hoe zorg je er dan toch voor dat je voor de meeste klanten de geschikte kleren in je winkel hebt hangen? Ik verwacht dat leerlingen zullen aangeven dat je verschillende kledingstukken moet inkopen en dat je de klant vervolgens het kledingstuk laat kiezen. De docent kan vervolgens vragen in welk opzicht 'het probleem' van B-cellen lijkt op het probleem van de eigenaar van de kledingzaak. Ik verwacht dat leerlingen zullen aangeven dat in beide gevallen niet van te voren bekend is welk aanbod aanwezig moet zijn (ofwel beide hebben te maken met een onvoorspelbare vraag). De docent vraagt hoe kleding en klant zich verhouden tot antistofproductie. Ik verwacht dat leerlingen zullen aangeven dat de kledingstukken de antistoffen zijn en de klant het antigeen. De docent vraagt vervolgens hoe B-cellen antistoffen zouden maken als ze dat op een vergelijkbare manier zouden doen als de eigenaar van de modezaak. Ik verwacht dat leerlingen aangeven dat dit zal betekenen dat B-cellen willekeurig antistoffen aanmaken en dat het antigeen de antistof 'uitkiest'.

Ik verwacht dat leerlingen nu zijn uitgekomen bij een mechanisme waarbij een B-cel antistoffen maakt die worden geselecteerd door het antigeen. In werkelijkheid worden antistoffen pas geproduceerd nadat een receptor op de B-cel een antigeen heeft herkend. In de eerste ronde is dit laatstgenoemde mechanisme leerlingen aangeboden zonder hen te vragen of aan te geven waarom het nodig is dat het antigeen eerst de receptor selecteert. Uit de resultaten van de eerste ronde bleek dat enkele leerlingen de receptor dan ook weglaten. Zij gaan er vanuit dat de B-cel antistoffen maakt die het antigeen selecteert. Daarom wordt nu nadrukkelijker ingegaan op de vraag waarom het nodig is dat de B-cel een receptor draagt.

De leerlingen kan vervolgens worden gevraagd naar het nadeel van een mechanisme waarbij het antigeen de antistof selecteert. Ik verwacht dat ze als nadeel zullen onderkennen dat de B-cellen niet van te voren 'weten' waarvoor ze antistoffen moeten aanmaken. De docent kan aangeven dat dit om eerder genoemde redenen ook onmogelijk is. Sommige leerlingen zullen zich ook realiseren dat op deze manier wel heel veel antistoffen verloren gaan. Alle B-cellen produceren nu namelijk voortdurend antistoffen. De docent kan vragen hoe dit kan worden verbeterd. Ze komen daarbij wellicht op het idee dat je eerst willekeurig een receptor aanmaakt en dat antistoffen pas worden geproduceerd nadat een antigeen bindt aan de receptor van een B-cel. Ik verwacht dat ze op dit idee komen omdat ook bij de instructiemechanismen die leerlingen eerder hebben bedacht, een antigeen eerst bindt aan een soort receptor, alvorens antistoffen worden geproduceerd.

De docent geeft aan dat B-cellen ook zo werken en vertelt dat een dergelijk mechanisme ook wel een variatie-selectie mechanisme wordt genoemd. De docent verklaart vervolgens de termen. Terwijl in een instructiemechanisme het antigeen de B-cel instrueert welke antistoffen moeten worden gemaakt, maken in een variatie-selectie mechanisme B-cellen willekeurig receptoren aan (variatie) waarna het antigeen de B-cel met de juiste receptor 'selecteert'.

genereren van variatie

In het hierboven beschreven selectiemechanisme blijft onduidelijk hoe variatie wordt gegenereerd. Het genherrangschikkingsmechanisme is hiervoor verantwoordelijk. Dit is een ingewikkeld mechanisme waarvan ik niet verwacht dat leerlingen dit zonder hulp zullen bedenken. Leerlingen hebben bij moleculaire genetica geleerd dat een gen codeert voor een eiwit. Zij zullen waarschijnlijk dan ook niet snel op het idee komen om gendelen te combineren. Uit de eerste ronde bleek dat ook hier de kledingzaak-analogie leerlingen op het juiste spoor kan brengen. Alvorens deze analogie te introduceren kan de docent eerst bij leerlingen in herinnering roepen waarom variatie moet worden gegenereerd en kan worden nagegaan in hoeverre de oplossingen die leerlingen hiervoor al in de groepsbesprekingen hebben bedacht, adequaat zijn.

De docent kan nu aangeven dat hiermee nog niet de vraag is opgelost hoe de variatie aan DNA voor de verschillende receptoren en antistoffen kan worden verkregen. De docent kan eerst in herinnering roepen waarom er variatie in DNA moet zijn. Leerlingen hebben zich al eerder gerealiseerd dat niet al het benodigde DNA van te voren aanwezig kan zijn, omdat er steeds nieuwe ziekteverwekkers en dus nieuwe antigenen ontstaan³.

De docent kan vervolgens de oplossing presenteren die ze eerder voor dit probleem hebben bedacht: aanmaak van DNA. De docent kan hen nu vragen welk nadeel een dergelijke oplossing heeft bij een selectiemechanisme. Leerlingen zullen zich waarschijnlijk realiseren dat er geen mogelijkheid is om door te geven wat er moet worden gemaakt. Dit betekent dat DNA kan worden aangemaakt voor antistoffen maar ook voor andersoortige eiwitten. Hierdoor is de kans klein dat er een code voor een antistof wordt samengesteld en de kans groot dat er een code wordt samengesteld voor eiwitten die schadelijke effecten kunnen hebben in je lichaam. De docent kan leerlingen vervolgens vragen hoe dan wel variatie aan DNA kan worden gegenereerd wanneer DNA niet wordt aangemaakt. Leerlingen zullen waarschijnlijk denken aan mutaties. Ze zullen zich echter wel realiseren dat hiervoor vergelijkbare problemen gelden, zeker als de mutatiefrequentie groot is.

Ik verwacht niet dat leerlingen zelf op een soort genherrangschikkingsmechanisme zullen komen. Zij hebben namelijk bij moleculaire genetica geleerd dat 1 gen codeert voor 1 eiwit en dat 1 gen bestaat uit een aaneengesloten stuk DNA. De docent kan leerlingen een hint geven door de analogie van de modezaak uit te

³ Giphart (1991) wijst nog op een ander nadeel van deze oplossing: ruimtegebrek. Hij gaat uit van een 'bescheiden' repertoire van een miljoen verschillende typen antistoffen. In dit geval zou al 60% van de totale capaciteit van het menselijk genoom moeten worden gebruikt om te coderen voor antistoffen.

breiden. De eigenaar van de modezaak verkoopt ook pakken (broeken en jasjes). Nu is het moeilijk om voor iedere persoon de juiste combinatie van broek en jasje voorradig te hebben. Sommige mensen hebben namelijk graag een bruin jasje en een zwarte broek, andere een paars jasje op een blauwe broek etc. Hoe zou de winkelier dit probleem kunnen oplossen? Ik denk dat leerlingen wel zullen bedenken dat je niet complete pakken in voorraad hebt maar dat je combinaties van jasjes en broeken gewoon samenstelt naar behoefte. De docent kan vragen wat dit voor antistofproductie zou betekenen. Ik denk dat leerlingen zich wel zullen realiseren dat dit betekent dat je niet de DNA-code voor een antistof kant en klaar in voorraad hebt, maar dat de DNA-code kan worden samengesteld door combinatie van meerdere delen. De docent kan aangeven dat dit ook daadwerkelijk plaatsvindt. Immunologen noemen dit mechanisme genherrangschikking, omdat gendelen opnieuw worden gerangschikt. Daarbij kan de docent aangeven dat ze bij moleculaire biologie hebben geleerd dat 1 gen codeert voor 1 eiwit. Dit geldt hier nog steeds maar het gen voor het eiwit is niet compleet aanwezig in het DNA maar wordt uit een drietal stukjes DNA (gendelen) samengesteld.

De docent kan leerlingen vragen waarom dit een oplossing is voor de twee gesignaleerde problemen van DNA-aanmaak en mutatie. Leerlingen realiseren zich waarschijnlijk dat op deze manier altijd antistoffen ontstaan, andersoortige eiwitten ontstaan niet omdat je er voor kunt zorgen dat er vanaf het begin alleen gendelen zijn opgenomen die in combinatie coderen voor een antistof. De docent kan vervolgens vragen hoe kan worden voorkomen dat er lichaamseigen antistoffen worden ontwikkeld? Ik verwacht dat leerlingen hier in eerste instantie hun oplossing zullen presenteren die ze ook voor gerichte instructie hebben bedacht. Ik verwacht dat ze daar hebben gedacht aan scannen van DNA. De docent kan vervolgens aangeven dat scannen wel erg ingewikkeld is en dat het in dit geval ook eenvoudiger kan. Ik verwacht dat leerlingen zich wel zullen realiseren er bij een genherrangschikkingsmechanisme eenvoudigweg voor kan worden gezorgd er geen gendelen worden opgenomen die kunnen coderen voor antistoffen tegen lichaamseigen antigenen. De docent geeft aan dat dit ook het geval is.

De docent tekent figuur 3.5.2 op het bord. Hij legt aan de hand van deze tekening uit hoe genherrangschikking werkt. B-cellen ontstaan door deling van stamcellen in het beenmerg. Waarschijnlijk kennen leerlingen stamcellen nog wel als de moedercellen van alle witte en rode bloedcellen. Een stamcel bevat alle gendelen voor het maken van receptoren en antistoffen (A1A2A3.. B1B2B3...C1C2C3...). Deze stamcel gaat delen en geeft elke dochtercel een bepaalde combinatie van gendelen mee. Dus de ene B-cel krijgt bijvoorbeeld A1B1C1, een andere B-cel krijgt bijvoorbeeld A1B3C2 etc. Wanneer nu een antigeen bindt aan de receptor van de B-cel gaat deze cel meer antistofmoleculen produceren van dezelfde specificiteit.

nadeel van een variatie-selectiemechanisme

In deze laatste fase van stap vier gaan leerlingen na wat het nadeel is van een variatie-selectiemechanisme. In een instructiemechanisme kan iedere B-cel nog meerdere receptoren of antistoffen aanmaken. Een selectiemechanisme sluit dit in principe niet uit. Wanneer echter de variatie wordt geproduceerd door een geherrangschikkingsmechanisme betekent dit dat elke B-cel slechts één type receptor (en antistof) kan produceren. Ik verwacht dat leerlingen zullen inzien dat hierdoor de kans gering is dat een antigeen een B-cel met de juiste receptor treft.

De docent kan nu aan de leerlingen vragen welk nadeel het ontwikkelde variatie-selectiemechanisme heeft. Ik verwacht dat leerlingen zullen aangeven dat op deze manier heel veel B-cellen voor niets worden aangemaakt. De docent kan hierbij opnieuw vragen waarom een dergelijke verspilling niet kan worden voorkomen. Ik verwacht dat leerlingen zullen aangeven dat dit niet kan worden voorkomen, omdat het antigeen de B-cel niet kan instrueren welke antistoffen het moet maken. De docent kan vervolgens doorvragen naar nadelen van dit mechanisme. Eventueel kan de docent leerlingen op de goede weg helpen door hen te vragen hoeveel verschillende receptoren een B-cel kan aanmaken. Ik verwacht dan dat leerlingen zich realiseren dat elke B-cel maar een type receptor kan maken en dat dus de trefkans tussen een B-cel met de juiste receptor en het antigeen gering is. De docent geeft aan dat in de volgende stap het probleem van de trefkans aan de orde wordt gesteld.

Beschrijving en verantwoording van de toepassingsvragen

Na afloop van deze stap dienen leerlingen te weten hoe een B-cel een macrofaag assisteert bij de herkenning van antigenen. Bovendien verwacht ik van leerlingen dat ze weten hoe voor ieder antigeen een antistof kan worden aangemaakt. In de vorige ronde hadden leerlingen enkele elementen uit deze doelstellingen niet goed begrepen. Deze elementen zijn reeds in deze stap besproken en worden weergegeven in tabel 3.5.1. Met toepassingsvraag 5 en 6 wordt deze kennis getoetst. Ik zal beide toepassingsvragen achtereenvolgens beschrijven en toelichten.

5. Tom is in staat zelf antistoffen te maken tegen het griepvirus. Marloes kan zelf geen antistoffen maken tegen het griepvirus. De dokter komt op het idee om stamcellen van Tom (uit zijn beenmerg) te transplanteren in het beenmerg van Marloes. De operatie is goed gelukt. Is het nu zeker dat Marloes ook antistoffen gaat maken tegen het griepvirus? Licht je antwoord toe.

elementen uit de doelstellingen	toepassingsvraag
de B-cel kan antigeen alleen herkennen, de macrofaag fagocyteert	6
de B-cel krijgt een willekeurige combinatie gendelen van stamcel	5
een B-cel draagt één type receptor en produceert één type antistof	6
antistoffen worden aangemaakt na binding van een antigeen aan een receptor van de B-cel	5,6

Tabel 3.5.1

Elementen uit de doelstellingen die met toepassingsvragen 5 en 6 worden getoetst

Voor het beantwoorden van deze vraag dienen leerlingen zich te realiseren dat: (1) Genherrangschikking een willekeurig proces is; (2) Een B-cel alleen na binding met antigeen antistoffen kan vormen. Het is dus niet zeker dat Marloes ook antistoffen gaat aanmaken tegen het griepvirus. Dit gebeurt alleen indien het benodigde gen ontstaat en vervolgens de B-cel met juiste receptor ook het antigeen ontmoet.

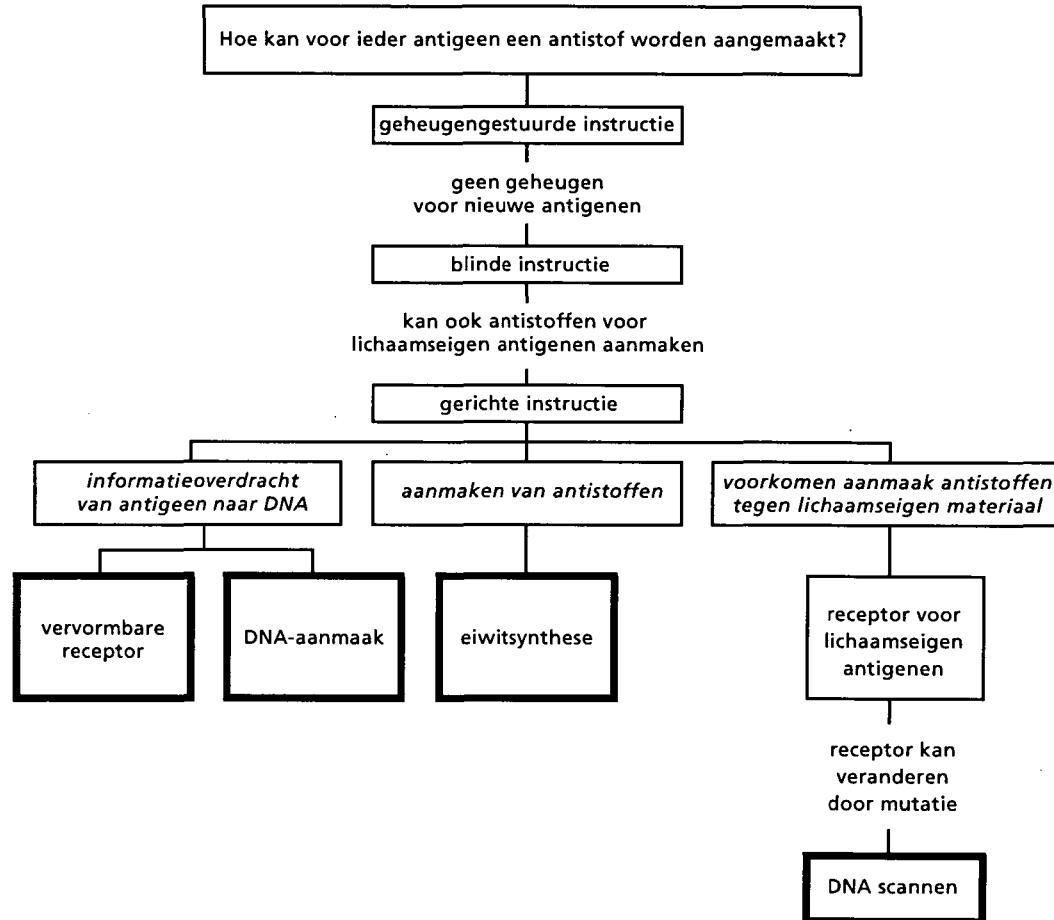
6. Paul Ehrlich heeft in het begin van deze eeuw al een theorie bedacht over de werking van het immuunsysteem, de zijketentheorie⁴. Ehrlich ging er vanuit dat er een cel is met receptoren van verschillende specificiteit (1). Wanneer een lichaamsvreemd deeltje aan deze receptoren bindt, gaat de cel meer receptoren produceren van dezelfde specificiteit (2). Lichaamsvreemde deeltjes kunnen aan deze receptoren binden (3) en worden vervolgens opgenomen in de cel (is niet afgebeeld). De receptoren kunnen vervolgens ook het oppervlak verlaten (4). Wat zijn de overeenkomsten en verschillen tussen de cel van Ehrlich en de B-cel?

Deze vraag doet vooral een beroep op kennis over macrofagen en B-cellen. De cel die Ehrlich voorstelde is een soort hybride tussen de macrofaag en de B-cel. Met de B-cel heeft deze cel gemeenschappelijk dat na binding van een lichaamsvreemd deeltje meer receptoren van dezelfde specificiteit kunnen worden geproduceerd en dat deze receptoren het oppervlak kunnen verlaten. Met de macrofaag heeft deze cel gemeen dat het meerdere receptoren bezit van verschillende specificiteit en dat het lichaamsvreemde deeltje na binding aan een receptor wordt opgenomen in de cel.

⁴ Leerlingen is een figuur aangeboden waarin de vier genoemde stappen zijn afgebeeld.

Figuur 3.5.4

Verwachte oplossingen en nadelen tijdens de groepsbespreking van stap 4



3.6 Stap 5

Leerlingen hebben in de vorige stap geleerd hoe B-cellen voor veel verschillende antigenen antistoffen kunnen aanmaken. Omdat elke B-cel maar één type receptor bezit, is de trefkans tussen een B-cel met juiste receptor en (het antigeen van) de ziekteverwekker klein. In deze stap gaan leerlingen dan ook een oplossing zoeken voor het volgende ontwerpprobleem:

Hoe kan de trefkans tussen een B-cel met een juiste receptor en de ziekteverwekker worden vergroot?

Beschrijving en verantwoording van de doelstellingen

Doelstellingen voor stap 5

Leerlingen leren in deze stap:

- dat de trefkans tussen een B-cel met een juiste receptor en de ziekteverwekker wordt vergroot (functie)
- dat B-cellen circuleren in bloed en lymfe. Signaalstoffen zorgen er voor dat de aanwezigheid van ziekteverwekkers in de weefsels kan worden vastgesteld. Indien de receptor van een B-cel past op het antigeen van de ziekteverwekker, verhuist de B-cel naar de lymfeklieren. De B-cel deelt zich daar (selectieve klonering). Een kloon B-cellen, en de antistoffen die ze produceren, worden vervolgens weer in de circulatie opgenomen (mechanisme).
- waarom het bovengenoemde mechanisme de functie beter vervult dan enkele alternatieven
- dat virusgeïnfecteerde cellen middels dit mechanisme niet onschadelijk kunnen worden gemaakt (nadeel)

In de vorige stappen is een immuunsysteem opgebouwd bestaande uit B-cellen en macrofagen. Eigenschappen van en interacties tussen deze cellen stonden centraal. Met het trefkansprobleem wordt de aandacht (opnieuw) gericht op de omgeving waarin dit systeem zijn functie moet vervullen. De locatie van het systeem in het menselijk lichaam staat in deze stap centraal.

Leerlingen leren in deze stap hoe de trefkans kan worden vergroot. Het mechanisme dat deze functie vervult bestaat uit een aantal onderdelen waarmee vier deelfuncties worden vervuld: circuleren, concentreren, signaleren en delen. Ik zal de vier deelfuncties kort bespreken en verantwoorden. Het bloed- en lymfevatenstelsel zorgt er voor dat B-cellen door het hele lichaam circuleren. Het bloed- en lymfevatenstelsel is niet opgenomen in de eindtermen met betrekking tot het immuunsysteem; beide zijn wel al eerder behandeld in het kader van transportsystemen. De kennis die leerlingen hierover hebben verworven is voldoende om te kunnen begrijpen dat beide een circulatiefunctie vervullen. In deze stap zal dan ook niet dieper worden ingegaan op de bouw van het bloed- en lymfevatenstelsel. In de begeleidende tekst bij deze stap is wel een figuur opgenomen waarin het lymfevatenstelsel en de lymfoïde organen zijn afgebeeld.

De trefkans wordt tevens vergroot door B-cellen te concentreren bij de plekken waar ziekteverwekkers binnen kunnen dringen. B-cellen zijn voornamelijk geconcentreerd in de lymfeklieren. In de eindtermen worden nog enkele andere lymfoïde organen vermeld die een concentratiefunctie vervullen: milt,

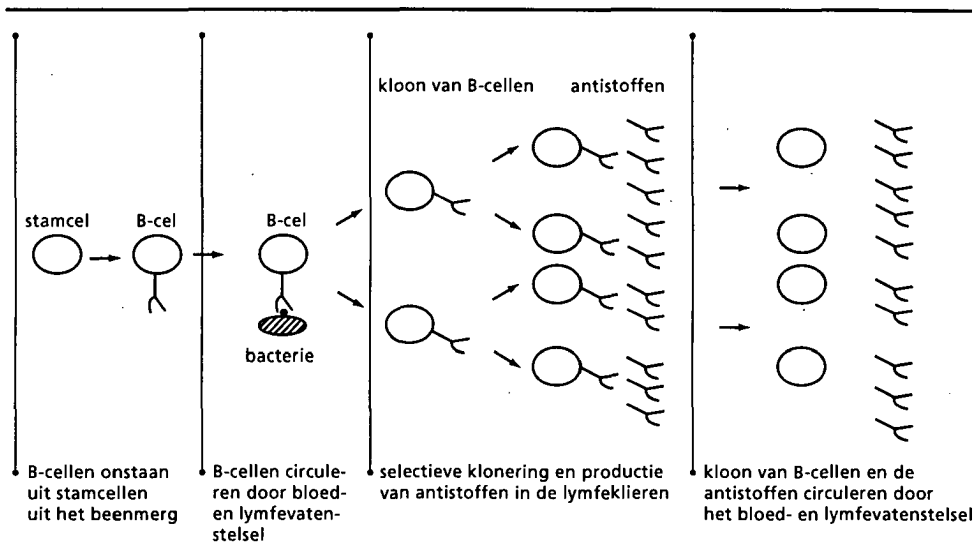
beenmerg en thymus. De milt speelt vooral een rol bij het wegvangen van antigenen die zich reeds in de bloedbaan bevinden. Dit orgaan wordt in de begeleidende tekst bij deze stap vermeld. Beenmerg en thymus vervullen weliswaar een concentratiefunctie, maar het zijn vooral organen waarin de rijping van respectievelijk B-cellen en Tkiller-cellen plaatsvindt. In de begeleidende tekst bij stap 4 en 5 wordt deze rijpingsplekken vermeld.

De trefkans wordt verder verhoogd door signaalstoffen die er voor zorgen dat de B-cellen de plekken kunnen vinden waar ziekteverwekkers zich bevinden (signaleerfunctie). Deze stoffen komen onder meer vrij bij beschadiging van cellen als gevolg van activiteiten van de ziekteverwekker. Dergelijke stoffen worden niet behandeld in de eindtermen. Omdat ze echter een belangrijke bijdrage leveren aan het vergroten van de trefkans worden ze hier wel aan de orde gesteld.

Tenslotte wordt de trefkans nog vergroot door deling van B-cellen (selectieve klonering). Deze B-cellen kunnen differentiëren tot kortlevende plasmacellen of langlevende geheugencellen. De plasmacellen gaan onmiddellijk antistoffen produceren. De geheugencellen zorgen er voor dat bij een hernieuwd contact met hetzelfde type antigeen de immuunreactie snel op gang kan komen. Beide laatstgenoemde cellen zijn opgenomen in de eindtermen. Selectieve klonering wordt daarentegen niet vermeld. Ik heb er voor gekozen klonale selectie wel in de stap te behandelen omdat deze een centrale rol speelt bij de vergroting van de trefkans. Het onderscheid tussen plasma-cellen en geheugencellen is secundair en wordt dan ook alleen in de begeleidende tekst vermeld.

Klonering vindt plaats in de lymfeklieren na contact met het antigeen. Het antigeen zal dus eerst naar de lymfeklieren moeten worden gebracht (figuur 3.6.1). In veel tekstboeken staat vermeld dat macrofagen het antigeen transporteren naar de lymfeklieren en daar presenteren aan B-cellen (Giphart, 1991; Roitt, 1997). Een macrofaag kan echter alleen antigeen transporteren en presenteren wanneer hij over receptoren beschikt waarmee een antigeen kan worden gebonden. B-cellen waren nu juist nodig omdat een macrofaag veelal niet over de vereiste receptoren beschikt. In deze stap wordt er dus ook vanuit gegaan dat de B-cel zelf het antigeen transporteert naar de lymfeklier en daar vervolgens gaat delen.

Leerlingen dienen ook bij deze stap te weten waarom het bovengenoemde mechanisme de functie beter vervult dan alternatieven. Ik verwacht in dit geval van leerlingen dat ze kunnen aangeven waarom een mechanisme waarin de vier deelfuncties worden vervuld beter is dan een mechanisme waar één van deze deelfuncties ontbreekt. Een belangrijk aspect van het complete mechanisme kunnen leerlingen niet functioneel verantwoorden: klonering in de lymfeklieren. Deling vindt plaats in de lymfeklieren omdat de B-cel twee signalen nodig heeft om te delen: contact met het antigeen en een signaal van de Thelper-cel. De trefkans tussen een B-cel en een Thelper-cel wordt vergroot wanneer beide zich bevinden in de lymfeklieren. In deze lessenserie wordt echter geen aandacht meer



Figuur 3.6.1

De ontwikkeling van B-cellen

besteed aan de Thelper-cel om eerder genoemde redenen (3.1.1). Het is dus ook niet inzichtelijk te maken voor leerlingen waarom het nodig is dat de B-cel na contact met het antigeen eerst naar de lymfeklieren moet voor hij kan delen.

Het systeem dat leerlingen tot nu toe hebben ontwikkeld, is geschikt voor het onschadelijk maken van bacteriën en vrijgekomen virussen. Virusgeïnfecteerde cellen kunnen echter niet onschadelijk worden gemaakt. Ik verwacht dat leerlingen dit nadeel aan het eind van deze stap zullen onderkennen.

Beschrijving en verantwoording van het onderwijsleerproces

Ik verwacht dat bovengenoemde doelstellingen na de introductie van het ontwerpprobleem in vier fasen kunnen worden gerealiseerd: (1) Ik verwacht dat leerlingen in de groepsbespreking de vier deelfuncties zullen bedenken; (2) In de klassikale evaluatie worden deze deelfuncties afzonderlijk besproken; (3) Vervolgens worden de relaties tussen deze deelfuncties aan de orde gesteld; (4) Ik verwacht dat leerlingen dan ook inzien welk nadeel aan het mechanisme is verbonden.

Klassikale introductie

In de eerste ronde is niet alleen het trefkansprobleem geïntroduceerd, maar is daar tevens aan toegevoegd dat leerlingen er rekening mee moeten houden dat de ziekteverwekker zich snel kan vermeerderen en verspreiden. Met deze instructie werd leerlingen een deelfunctie, namelijk deling van B-cellen, al min of meer aangeboden. Ik wil leerlingen nu de gelegenheid geven zelf te ontdek-

fase	docent	leerlingen
<i>klassikale introductie</i>	hoe kan de trefkans tussen een B-cel met juiste receptor en de ziekteverwekker worden vergroot	
<i>groepsbespreking</i>	waarom kan het niet eenvoudiger?	delen+circuleren+concentreren+signaleren
<i>klassikale evaluatie</i>	inventariseert en bespreekt de afzonderlijke deelfuncties	leggen uit waarom deze deelfuncties nodig zijn
	bouwt het complete mechanisme op met de leerlingen	
	nadeel mechanisme?	virusgeïnfekteerde cellen kunnen niet worden herkend en gefagocyteerd

Figuur 3.6.2

Overzicht onderwijsleerproces stap 5

ken dat deling van B-cellen nodig is. In de klassikale introductie wordt dan ook alleen het trefkansprobleem geïntroduceerd.

De docent introduceert het ontwerpprobleem: Hoe kan de trefkans tussen een B-cel met een juiste receptor en de ziekteverwekker worden vergroot?

Groepsbespreking

Ik verwacht dat leerlingen voor het trefkansprobleem een mechanisme zullen bedenken waarmee vier deelfuncties worden vervuld: delen, circuleren, concentreren en signaleren (figuur 3.6.3). Uit de eerste ronde bleek echter dat niet alle leerlingen wisten waarom de verschillende deelfuncties nodig waren. Ze konden niet aangeven wat het nadeel is van een mechanisme waarin één van deze deelfuncties ontbreekt. In deze ronde wil ik leerlingen stimuleren hierover na te denken door hen al tijdens de groepsbespreking te vragen waarom het mechanisme niet eenvoudiger kan.

Ik verwacht dat leerlingen tijdens de groepsbespreking nog niet komen tot een adequate voorstelling van de relatie tussen deze deelfuncties. Deze samenhang wordt vooral bepaald door het tijdstip en de plek van de deling van B-cellen. Uit de eerste ronde bleek dat de meeste leerlingen er vanuit gingen dat deling plaatsvindt voor het contact met het antigeen op een willekeurige plek in het lichaam. Dit lijkt ook zinvol omdat er op deze manier meerdere B-cellen worden aangemaakt met de juiste receptor zodat de trefkans tussen een B-cel met de juiste receptor en de ziekteverwekker wordt vergroot. Leerlingen zullen zich dus waarschijnlijk niet realiseren dat B-cellen pas kunnen delen nadat ze

contact hebben gemaakt met het antigeen en zijn verhuisd naar de lymfeklieren (concentratieplekken). Leerlingen kunnen zelf ook niet op deze adequate voorstelling van het mechanisme komen, omdat ze plek en tijdstip van deling met hun voorkennis niet functioneel kunnen verantwoorden (zie beschrijving en verantwoording van de doelstellingen). In de klassikale evaluatie zal hen dan ook plek en tijdstip van deling worden aangeboden.

Uit de eerste ronde blijkt dat leerlingen zich tijdens de groepsbespreking nog niet realiseren dat het mechanisme dat ze hebben ontwikkeld ongeschikt is voor het onschadelijk maken van virusgeïnfecteerde cellen. Dit nadeel wordt daarom pas in de klassikale evaluatie aan de orde gesteld wanneer het complete mechanisme is behandeld en de relatie is gelegd met eerder verworven kennis over macrofagen.

Ik verwacht dat leerlingen weten dat ziekteverwekkers op verschillende plekken het lichaam kunnen binnenkomen. Circulatie maakt het mogelijk dat B-cellen overal kunnen komen. Leerlingen zullen hierbij veelal aan het bloedvatstelsel denken. Uit de eerste ronde bleek dat leerlingen de circulatie van B-cellen niet in verband brengen met het lymfevatstelsel. Leerlingen zullen zich waarschijnlijk realiseren dat op deze manier B-cellen ook alle plekken bezoeken waar de ziekteverwekker zich niet bevindt, en dat daarom de trefkans nog steeds klein is.

Waarschijnlijk zullen leerlingen op het idee komen dat dit nadeel kan worden ondervangen door B-cellen te concentreren op de plekken waar de ziekteverwekkers binnenkomen. Ze denken dan wellicht aan plekken nabij de barrières, zoals de huid en het maagdarmkanaal. Leerlingen weten echter ook dat niet van te voren kan worden bepaald op welke plek de ziekteverwekker binnenkomt. Ik verwacht dan ook dat leerlingen zich zullen realiseren dat concentratie en circulatie beide nodig zijn. Ik verwacht dat leerlingen deze oplossing nog aanvullen met twee andere deeloplossingen. Het is tevens van belang dat de specifieke plek wordt bepaald waar de ziekteverwekker zich bevindt. Leerlingen komen dan waarschijnlijk op signaalstoffen waarmee B-cellen de ziekteverwekkers kunnen lokaliseren. Bovendien zullen leerlingen zich waarschijnlijk realiseren dat de trefkans wordt vergroot wanneer er meerdere B-cellen van hetzelfde type worden aangemaakt (deling).

Indien nodig, kan de docent tijdens de groepsbesprekingen leerlingen vragen of hun mechanisme niet eenvoudiger kan.

Klassikale evaluatie

De klassikale evaluatie start met de inventarisatie van de afzonderlijke deelfuncties van het mechanisme. Ik wil niet beginnen met de inventarisatie van het complete mechanisme dat leerlingen hebben bedacht, omdat dit waarschijnlijk toch niet adequaat is. Ik wil leerlingen eerst laten zien dat de deelfuncties die ze hebben bedacht wel adequaat zijn. Voor elke deelfunctie wordt tevens nagegaan, waarom hij nodig is. Ook worden de bijbehorende termen en aanvullende kennis aangeboden. De term klonale selectie wordt in deze fase van de klassikale evaluatie nog niet aangeboden. Klonale selectie veronderstelt

namelijk dat deling plaatsvindt na contact met het antigeen. Omdat dit voor leerlingen niet vanzelfsprekend is, wordt de term klonale selectie pas aan de orde gesteld bij de bespreking van het complete mechanisme. De term kloneren wordt wel al in deze fase besproken.

Na deze bespreking van de afzonderlijke deelfuncties worden de relaties tussen deze deelfuncties besproken. Hier wordt leerlingen verteld dat deling plaatsvindt in de lymfeklieren en wordt nagegaan welke consequenties dit heeft voor het mechanisme. Ook de reeds eerder verworven kennis over macrofagen en stamcellen krijgt een plek in dit geheel. Op deze manier worden alle onderdelen van het systeem dat leerlingen tot nu toe hebben ontwikkeld, geïntegreerd.

Wanneer de deelfuncties in samenhang zijn besproken vraagt de docent naar het nadeel van het mechanisme. Ik verwacht dat leerlingen, evenals in de eerste ronde, twee redenen kunnen geven waarom met macrofagen en B-cellen een virusgeïnfecteerde cel niet onschadelijk kan worden gemaakt. Ten eerste zullen leerlingen zich waarschijnlijk realiseren dat een virusgeïnfecteerde cel niet kan worden herkend. Ten tweede verwacht ik dat ze zich herinneren van de tweede stap dat een virusgeïnfecteerde cel niet kan worden gefagocyteerd.

De docent inventariseert de deelfuncties die de groepjes hebben bedacht. Ik verwacht dat leerlingen circuleren, concentreren, signaleren en delen hebben bedacht. De docent kan aangeven dat deze allemaal een rol spelen. Vervolgens vraagt de docent per deelfunctie waarom het nodig is dat deze wordt vervuld en biedt aanvullende termen en kennis aan ¹.

De docent kan eerst vragen hoe B-cellen circuleren. Ik verwacht dat leerlingen aan het bloedvatstelsel hebben gedacht. De docent kan aangeven dat B-cellen ook door het lymfevatstelsel worden vervoerd. De docent kan vervolgens vragen waar concentratie van B-cellen plaatsvindt. Leerlingen hebben waarschijnlijk aan plekken nabij de barrières gedacht. Nu het lymfevatstelsel is genoemd kunnen sommige leerlingen ook op het idee komen van lymfeklieren. De docent kan eventueel vragen wat opzwelt bij je keel wanneer je ziek bent. Leerlingen komen dan waarschijnlijk wel op lymfeklieren. De docent kan aangeven dat de lymfeklieren zich niet alleen bij je keel bevinden maar over je hele lichaam zijn verspreid en zich dus ook vlak bij de barrières bevinden. In de begeleidende tekst is een figuur opgenomen van het lymfevatstelsel waarnaar kan worden verwezen.

Leerlingen zullen waarschijnlijk ook een soort signaalstoffen hebben bedacht. Ik verwacht dat nog niet alle leerlingen hebben bedacht waar deze stoffen vandaan komen. De docent kan aangeven dat deze stoffen onder meer vrijkomen bij beschadiging van cellen door activiteiten van de ziekteverwekker. Tenslotte wordt ook de deling van B-cellen besproken. Leerlingen kan worden verteld dat delen ook wel kloneren wordt genoemd. Leerlingen kan worden gevraagd deze term uit te leggen. De meeste leerlingen zullen wel weten wat de term kloon betekent.

¹ In de beschrijving en verantwoording van de groepsbespreking (kleine letter) is reeds besproken waarom de verschillende deelfuncties nodig zijn. Dit wordt hier daarom niet herhaald. Hier wordt alleen per deelfunctie aangegeven welke termen en aanvullende kennis leerlingen krijgen aangeboden.

Nu voor elke deelfunctie is nagegaan waarom de functie moet worden vervuld en hoe deze wordt vervuld, kan het complete mechanisme worden opgebouwd.

De docent stelt leerlingen de vraag wat er achtereenvolgens gebeurt wanneer iemand een wondje krijgt aan z'n grote teen en bacteriën daar binnendringen. Leerlingen zullen waarschijnlijk aangeven dat B-cellen naar de plek van de infectie zullen moeten gaan. De docent kan nu eerst vragen waarom het niet voldoende is als macrofagen daar naar toe gaan. Ik verwacht dat leerlingen zich realiseren dat macrofagen waarschijnlijk niet over de juiste receptor beschikken. Vervolgens kan worden gevraagd hoe B-cellen 'weten' dat ze daar moeten zijn. Leerlingen zullen dan waarschijnlijk aan signaalstoffen denken.

Ik verwacht dat leerlingen er vanuit gaan dat een B-cel zich al heeft gedeeld of alsnog deelt indien hij met een receptor kan binden aan het antigeen van de ziekteverwekker. De docent kan aangeven dat je dit wel verwacht, maar dat dit niet gebeurt. Hij geeft aan dat de B-cel na contact met het antigeen eerst met de ziekteverwekker verhuist naar een lymfeklier en daar vervolgens pas gaat delen. De kloon van B-cellen en de antistoffen die ze produceren komen vervolgens weer in de circulatie terecht en uiteindelijk ook bij de plek waar de ziekteverwekkers zich bevinden.

De docent kan aangeven dat deze weg zo omslachtig is omdat de B-cel nog een extra signaaltje moet krijgen in de lymfeklier voor hij kan gaan delen. In deze lessenserie kan echter niet worden uitgelegd waarom dit nodig is. De docent kan vervolgens de term selectieve klonering verklaren. Leerlingen kan daarna worden gevraagd wat er gebeurt nadat de antistoffen bij de ziekteverwekkers zijn aangekomen. Leerlingen zullen zich dan wel realiseren dat macrofagen vervolgens het uiteinde van de antistoffen kunnen herkennen en de ziekteverwekkers kunnen fagocyteren. Tot slot kan de docent nog vragen waar de B-cel vandaan komt die als eerste de ziekteverwekker tegenkomt. Ik verwacht dat leerlingen zich dan realiseren dat B-cellen ontstaan door deling van stamcellen in het beenmerg en vervolgens in de circulatie terecht komen. De docent kan tenslotte met de leerlingen het proces nog eens stapsgewijs doorlopen.

Wanneer leerlingen inzicht hebben verkregen in de samenhang van de verschillende onderdelen van het mechanisme kan het nadeel van het mechanisme aan de orde worden gesteld.

De docent kan vervolgens vragen wat het nadeel is van het zo juist ontwikkelde mechanisme. Wanneer leerlingen niet op het nadeel komen kan hun worden gevraagd of het mechanisme ook geschikt is voor het onschadelijk maken van virussen. Sommige leerlingen zullen wellicht aangeven dat het wel geschikt is voor vrijgekomen virussen maar niet voor virusgeïnfecteerde cellen. De docent kan vervolgens doorvragen waarom virusgeïnfecteerde cellen niet onschadelijk kunnen worden gemaakt. Ik verwacht dat leerlingen zich zullen realiseren dat B-cellen en macrofagen pas iets onschadelijk kunnen maken wanneer het wordt herkend. Ze weten dat lichaamseigen cellen niet worden herkend. Een virusgeïnfecteerde lichaamseigen cel wordt dus waarschijnlijk ook niet herkend. Sommige leerlingen zullen ook denken aan de reden die al in stap 2 is genoemd. Een macrofaag kan een cel die zich in weefselverband bevindt, niet omringen en dus ook niet fagocyteren.

Beschrijving en verantwoording van de toepassingsvragen

Met toepassingsvraag 7 kan worden nagegaan of leerlingen het complete mechanisme kennen. Tevens kan worden vastgesteld of leerlingen deze kennis hebben geïntegreerd met eerder verworven kennis over macrofagen en stamcellen. Bij de analyse van de antwoorden wordt onder meer nagegaan of leerlingen weten waar en wanneer B-cellen zich delen. De ideeën die leerlingen hierover in de groepsbespreking hebben ontwikkeld, hebben ze namelijk moeten bijstellen zonder dat ze dit functioneel kunnen verantwoorden.

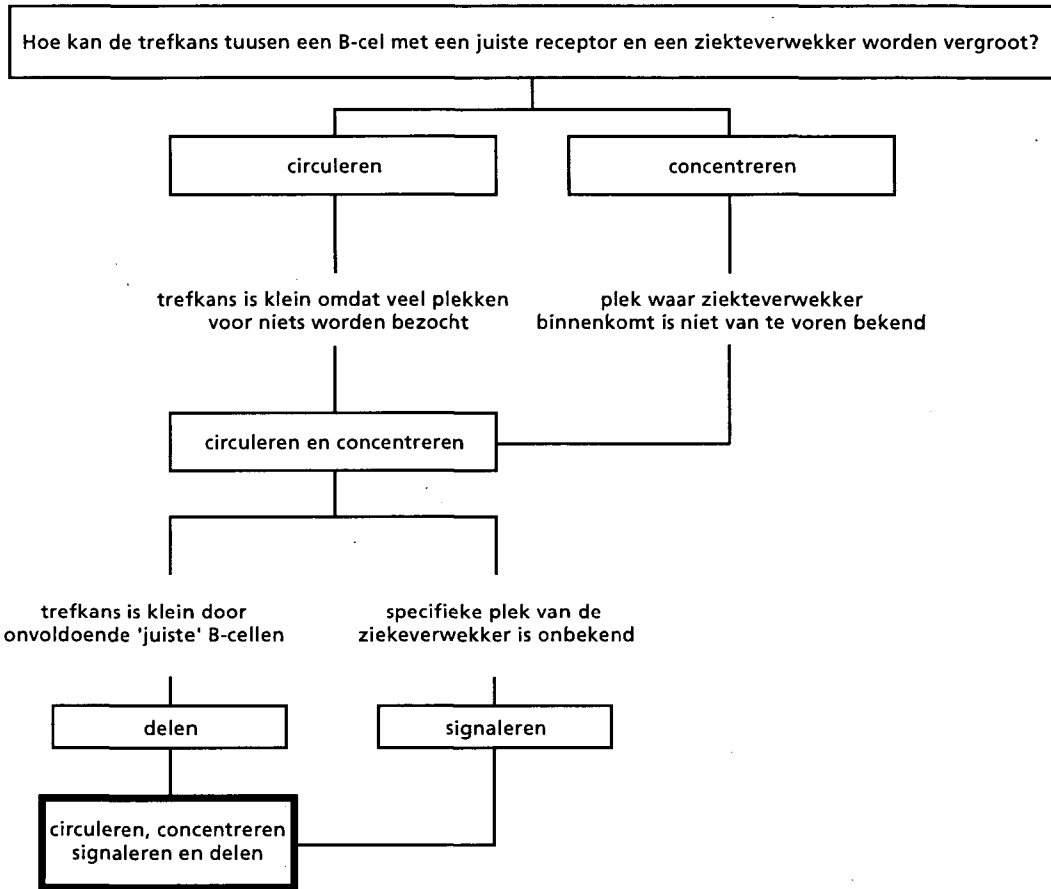
7. Beschrijf zo precies mogelijk wat er gebeurt nadat bacteriën via een wondje in je huid je lichaam zijn binnengedrongen. Gebruik tenminste de volgende termen in je verhaal: selectieve klonering/stamcellen/macrofagaag/lymfeklier/B-cel/bloed/lymfe/antistoffen/fagocytose/receptor

In de eindtoets is nog een vraag opgenomen waarmee kan worden nagegaan of leerlingen eerder verworven kennis over genherrangschikking hebben geïntegreerd met de kennis die ze in deze stap hebben verworven.

8. Marloes en Tom kunnen beide antistoffen maken tegen de mazelen. Beschrijf aan welke voorwaarden moet worden voldaan opdat een kind van hen ook antistoffen maakt tegen de mazelen.

Leerlingen dienen zich te realiseren dat aan de volgende voorwaarden moet worden voldaan:

- in stamcellen moeten de benodigde gensegmenten aanwezig zijn;
- middels genherrangschikking moet toevallig een gen voor de betreffende receptor worden samengesteld;
- een B-cel met juiste receptor moet in contact komen met een antigeen;
- selectieve klonering moet plaatsvinden in de lymfeklieren.



Figuur 3.6.3

Verwachte oplossingen en nadelen tijdens de groepsbespreking van stap 5

3.7 Stap 6

In vorige stappen hebben leerlingen een systeem opgebouwd waarmee bacteriën en vrijgekomen virussen onschadelijk kunnen worden gemaakt. Met dit systeem kunnen echter geen virusgeïnfekteerde cellen worden herkend en onschadelijk gemaakt. In deze stap gaan leerlingen dan ook een oplossing zoeken voor het volgende ontwerpprobleem:

Hoe kan een virusgeïnfekteerde cel worden herkend en onschadelijk gemaakt?

Beschrijving en verantwoording van de doelstellingen

Doelstellingen voor stap 5

Leerlingen leren in deze stap:

- dat virusgeïnfekteerde cellen worden herkend en onschadelijk gemaakt (functie)
- dat MHC-moleculen virale antigenen presenteren op het celmembraan van een virusgeïnfekteerde cel. Tkiller-cellen bezitten specifieke receptoren waarmee ze viraal antigeen in combinatie met MHC kunnen binden. Na binding kunnen Tkiller-cellen de virusgeïnfekteerde cel lek prikken middels afscheiding van perforine. Tkiller-cellen kunnen een geïnfekteerde cel pas lek prikken indien selectieve klonering in de lymfeklieren heeft plaatsgevonden (mechanisme)
- waarom bovengenoemd mechanisme de functie beter vervult dan enkele alternatieven

In deze stap wordt nagegaan hoe virusgeïnfekteerde cellen kunnen worden herkend en onschadelijk gemaakt. Hiermee wordt het immuunsysteem dat in deze lessenserie wordt behandeld, gecompleteerd. Deze stap kan worden beschouwd als een uitbreiding en een herhaling van de voorafgaande stappen. De Tkiller-cel beschikt namelijk enerzijds over specifieke kenmerken die van belang zijn voor het vervullen van zijn specifieke functie. Anderzijds heeft de Tkiller-cel ook veel kenmerken met de B-cel gemeen. Ik zal hier eerst de specifieke en vervolgens de gemeenschappelijke kenmerken kort behandelen.

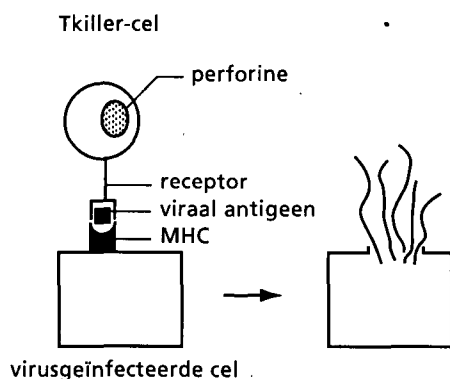
Macrofagen kunnen virusgeïnfekteerde cellen niet onschadelijk maken omdat ze deze niet kunnen omringen. Tkiller-cellen kennen dit probleem niet omdat ze de virusgeïnfekteerde cel lek prikken (figuur 3.7.1). Ze maken daarvoor perforine aan. Deze stof polymeriseert wanneer het in contact komt met het celmembraan van de cel en vormt hierbij een buisje waardoor de celinhoud kan weglekken (lysis). In deze stap wordt de leerlingen niet geleerd hoe perforine werkt. Deze details staan niet in de eindtermen en spelen geen rol in de voortgaande kennisontwikkeling. Leerlingen leren slechts dat middels perforine het celmembraan wordt lek geprikt.

Tkiller-cellen zullen de geïnfekteerde cel eerst moeten herkennen alvorens hem lek te prikken. Een virus bestaat uit een streng DNA (of RNA) en een eiwitmantel. Het virus vermeedert zich in de gastheercel. Hierbij wordt zijn eigen DNA gerepliceerd en worden de bijbehorende eiwitmantels aangemaakt. Deze eiwitmantels (delen ervan) kunnen door schotelvormige MHC-moleculen worden opgenomen en gepresenteerd op het celmembraan. MHC-molecu-

len bevinden zich in elke lichaamseigen cel. Elke Tkiller-cel draagt specifieke receptoren waarmee één type viraal antigeen in combinatie met MHC kan worden herkend (figuur 3.7.1).

Aan virussen en MHC wordt in de eindtermen aandacht besteed, alleen niet in het kader van herkenning van virusgeïnfecteerde cellen. Bouw en replicatie van virussen worden in het kader van bouw en functie van cellen aan de orde gesteld. MHC moleculen worden aan de orde gesteld in de context van transplantaties. MHC moleculen fungeren namelijk als antigenen die betrokken zijn bij transplantaatafstoting¹. In deze lessenserie wordt alleen aandacht besteed aan de rol die MHC speelt bij de herkenning van virusgeïnfecteerde cellen. De bijdrage van MHC aan afstotingsreacties wordt hier niet behandeld, omdat de kennis die leerlingen over het immuunsysteem verwerven onvoldoende is om afstotingsverschijnselen te kunnen begrijpen.

De bovengenoemde kenmerken zijn specifiek voor een Tkiller-cel. De Tkiller-cel heeft ook veel kenmerken met de B-cel gemeen. Deze komen alle voort uit het feit dat beide cellen niet in actie mogen komen tegen lichaamseigen materiaal. De hieronder genoemde kenmerken dienen leerlingen te kennen en functioneel te kunnen verantwoorden. Tkiller-cellen mogen niet in actie komen tegen gezonde lichaamseigen cellen. Dit gevaar is reëel omdat MHC moleculen ook lichaamseigen eiwitten kunnen presenteren op het celmembraan. Daarom beschikt een Tkiller-cel, evenals een B-cel, over een receptor waarmee alleen lichaamsvreemde antigenen kunnen worden herkend. Elke receptor is specifiek, d.w.z. kan slechts één type (i.c. viraal) antigeen binden. Dit is van belang omdat anders de kans wordt vergroot dat ook lichaamseigen antigenen worden herkend. Dit betekent dat voor elk type viraal antigeen dus een



Figuur 3.7.1

Herkenning en onschadelijk maken van een virusgeïnfecteerde cel door een Tkiller-cel

¹ MHC staat voor Major Histocompatibility Complex.

aparte receptor zal moeten worden aangemaakt. Deze receptordiversiteit ontstaat evenals bij B-cellen door genherrangschikking². Dit betekent dat elke Tkiller-cel slechts één type receptor bezit. Om toch effectief te kunnen optreden tegen virussen, die gemakkelijk steeds nieuwe cellen kunnen infecteren, zullen de Tkiller-cellen evenals B-cellen moeten delen. Selectieve klonering vindt ook hoofdzakelijk plaats in de lymfeklieren. De reden voor deze plek is dezelfde als voor B-cellen. Ook Tkiller-cellen kunnen pas in actie komen na contact met Thelper-cellen. Klonering in de lymfeklieren vergroot de trefkans met Thelper-cellen. Omdat leerlingen de kennis over Thelper-cellen niet krijgen aangeboden kunnen ze, evenals bij B-cellen, de plek van de deling niet functioneel verantwoorden.

Een bijzonder probleem doet zich voor bij het transport van het antigeen naar de lymfeklieren. Viraal antigeen dat door MHC wordt gepresenteerd kan namelijk niet getransporteerd worden naar de lymfeklieren. Tkiller-cellen kunnen immers het antigeen niet van het MHC 'afbijten'. Een Tkiller-reactie kan dus alleen worden opgestart indien er een vrijgekomen virus wordt gepresenteerd in de lymfeklieren. Eerder is echter geconstateerd dat Tkiller-cellen alleen antigeen in combinatie met MHC kunnen binden. Dit zou betekenen dat Tkiller-cellen geen vrijgekomen virussen kunnen binden en het antigeen dus niet naar de lymfeklieren kunnen transporteren. Langman (1989) nuanceert echter dit beeld. Binding van antigeen in combinatie met MHC is een voorwaarde voor het onschadelijk maken van de virusgeïnfecteerde cellen. Tkiller-cellen kunnen echter wel vrijgekomen virussen binden en transporteren naar de lymfeklieren. Ook is het mogelijk dat B-cellen vrijgekomen virussen binden en in de lymfeklieren aan Tkiller-cellen presenteren. Ze moeten dan echter wel over een receptor beschikken waarmee ze het betreffende type viraal antigeen ook kunnen binden.

De Tkiller-cel is niet het enige celtype waarmee virusgeïnfecteerde cellen kunnen worden herkend en onschadelijk gemaakt. Ook NK-cellen en K-cellen zijn hiertoe in staat. Beiden celtypen prikken evenals de Tkiller-cel de virusgeïnfecteerde cel lek. Zij herkennen de cel echter op een andere manier. K-cellen besteden evenals macrofagen de herkenning uit aan antistoffen. Sommige virussen laten namelijk bij het binnendringen van de gastheercel sporen op het celmembraan achter (delen van de eiwitmantel). Hier kunnen antistoffen tegen worden aangemaakt. K-cellen beschikken over receptoren waarmee ze de 'staart' van de antistoffen kunnen herkennen. Bij sommige virussen leidt virusactiviteit in de gastheercel tot veranderingen van het celmembraan. NK-cellen beschikken over receptoren waarmee ze bepaalde veranderingen op het celmembraan

² Tkiller-cellen rijpen in de thymus. In de begeleidende tekst bij deze stap wordt dit vermeld, omdat de thymus ook in de eindtermen is opgenomen.

van de virusgeïnfecteerde cel kunnen herkennen. K-cellen en NK-cellen zijn beperkt in hun mogelijkheden. Alleen wanneer de aanwezigheid van een virus aan het celmembraan waarneembaar is kunnen ze de virusgeïnfecteerde cel onschadelijk maken. In veel gevallen is dit echter niet het geval. Dan zal middels MHC viraal antigeen op het celmembraan moeten worden gepresenteerd, dat vervolgens door een receptor van de Tkiller-cel wordt herkend. In de eindtermen worden NK-cellen en K-cellen niet vermeld. In deze stap worden de namen van deze celtypen niet behandeld. De alternatieve herkenningssystemen van beide cellen worden leerlingen wel aangeboden. Herkenning middels Tkiller-cellen is immers pas nodig indien beide alternatieve vormen van herkenning niet mogelijk zijn.

Beschrijving en verantwoording van het onderwijsleerproces

Ik verwacht dat bovengenoemde doelstellingen in vier fasen kunnen worden gerealiseerd (figuur 3.7.2): (1) De introductie van het ontwerpprobleem wordt vooraf gegaan door de vraag ‘waarom een virusgeïnfecteerde cel moet worden herkend en onschadelijk gemaakt’; (2) Ik verwacht dat leerlingen in de groepsbespreking komen tot een adequate functionele typering van het mecha-

fase	docent	leerlingen
<i>klassikale introductie</i>	waarom is onschadelijk maken nodig?	virussen kunnen zich anders vermeerderen en nieuwe cellen infecteren
	waarom is herkenning van een virusgeïnfecteerde cel niet eenvoudig?	aanwezigheid van een virus is niet op het celmembraan waarneembaar
	hoe kan een virusgeïnfecteerde cel worden herkend en onschadelijk gemaakt?	
<i>groepsbespreking</i>	hoe werkt het?	virusdeeltjes worden gepresenteerd waarna antigeen door een cel met een specifieke receptor wordt herkend. Deze cel prikt vervolgens de geïnfecteerde cel lek
<i>klassikale evaluatie</i>	vertelt het mechanisme van herkennen en onschadelijk maken	
	gaat met de leerlingen na wat de consequenties zijn van specifieke herkenning	

Figuur 3.7.2
Overzicht onderwijsleerproces stap 6

nisme voor herkenning en onschadelijk maken; (3) In de klassikale evaluatie wordt vervolgens aanvullende informatie over dit mechanisme aangeboden; (4) Daarna wordt met de leerlingen nagegaan welke consequenties specifieke herkenning heeft voor de overige kenmerken van de Tkiller-cel. Hiermee wordt de eerder verworven kennis over het systeem herhaald, toegepast en uitgebreid.

Klassikale introductie

Ik verwacht dat leerlingen zich in de vorige stap hebben gerealiseerd dat macrofagen een virusgeïnfecteerde cel niet kunnen herkennen en onschadelijk maken. In de eerste ronde heb ik daarom meteen het ontwerpprobleem geïntroduceerd. In deze ronde wil ik eerst nader ingaan op de vraag waarom onschadelijk maken nodig is en waarom herkenning van een virusgeïnfecteerde cel problematisch is. De twee resultaten uit de eerste ronde die aanleiding waren voor deze bijstelling worden hieronder kort vermeld.

Tijdens de groepsbespreking discussieerden twee groepjes over de vraag of een virusgeïnfecteerde cel eigenlijk wel onschadelijk moet worden gemaakt. Sommige leerlingen vonden dit aanvankelijk niet nodig, omdat deze cel na enige tijd door activiteiten van de virussen vanzelf afsterft. Ze werden echter overtuigd door andere leerlingen die van mening waren dat een virusgeïnfecteerde cel wel snel onschadelijk moet worden gemaakt, omdat de virussen anders vermeerderd zijn en nieuwe cellen kunnen infecteren. Ik wil in deze ronde deze discussie al in de klassikale introductie laten plaatsvinden. Ik verwacht namelijk dat de meeste leerlingen wel al weten waarom een virusgeïnfecteerde cel onschadelijk moet worden gemaakt. De leerlingen die zich dit niet realiseren wil ik hiervan bewust maken vóór de groepsbespreking omdat ze anders niet weten waarom deze functie moet worden vervuld en het ontwerpprobleem dus ook niet als een eigen probleem ervaren.

Tijdens de groepsbespreking in de eerste ronde vroegen ook enkele leerlingen zich af of de aanwezigheid van virussen niet toch aan de buitenkant van de cel waarneembaar is. In de voorafgaande stap was weliswaar geconcludeerd dat een virus geen sporen achterlaat, maar tijdens de groepsbespreking gingen enkele leerlingen toch hier aan twijfelen. Sommige leerlingen dachten aan herkenning van de eiwitmantel die een virus achterlaat wanneer het een gastheercel binnendringt. Sommige leerlingen dachten dat het celmembraan als gevolg van virusactiviteit wel zou veranderen en zou kunnen worden herkend. Deze leerlingen kwamen ook niet op het idee om virusdeeltjes op het celmembraan te presenteren. Dit is immers ook niet nodig als de aanwezigheid van het virus al op bovengenoemde wijzen kan worden vastgesteld. In deze ronde wordt daarom herkenning opnieuw in de klassikale introductie geproblematiseerd. Leerlingen die van mening zijn dat het virus toch waarneembaar is, worden hierin deels bevestigd. In dit kader worden de alternatieve herkenningsmecha-

nismen van NK- en K-cellen behandeld. Tevens wordt aangegeven dat bij veel virussen de aanwezigheid echter niet waarneembaar is en dat het in deze stap gaat om de herkenning van dit type virussen.

Met de voorgestelde wijzigingen voor de klassikale introductie verwacht ik dat de leerlingen het ontwerpprobleem goed interpreteren en ook weten waarom dit een probleem is.

De docent vraagt leerlingen waarom een virusgeïnfecteerde cel eigenlijk onschadelijk moet worden gemaakt. Ik verwacht dat leerlingen zich in eerste of tweede instantie zullen realiseren dat virussen zich anders hebben vermeerderd en nieuwe cellen kunnen infecteren. De docent vraagt vervolgens leerlingen meer in detail te beschrijven hoe een virus zich in de cel vermeerderd. Ik verwacht dat leerlingen weten dat het virus bestaat uit DNA en een eiwitmantel en dat beide afzonderlijk worden aangemaakt. De docent kan dit anders ook zelf vertellen. De docent kan vervolgens vragen wanneer een geïnfecteerde cel het beste onschadelijk kan worden gemaakt. Ik verwacht dat leerlingen zich realiseren dat de cel het best onschadelijk kan worden gemaakt voordat het virus 'in elkaar wordt gezet'.

Vervolgens kan de docent aan leerlingen vragen waarom herkenning van een virusgeïnfecteerde cel problematisch is. Sommige leerlingen zullen evenals in de klassikale evaluatie van de voorgaande stap van mening zijn dat een virus niet aan de buitenkant van de celmembraan kan worden opgemerkt. Andere leerlingen denken wellicht dat een eiwitmantel wordt achtergelaten of dat het virus zijn aanwezigheid verradert door verandering van het celmembraan. De docent bevestigt beide opvattingen. Hij vraagt leerlingen hoe in het laatst genoemde geval de geïnfecteerde cellen kunnen worden herkend. Ik verwacht dat leerlingen denken aan herkenning middels antistoffen of receptoren. De docent geeft aan dat dit ook het geval is. De docent geeft vervolgens aan dat echter de meerderheid van de virussen niet op bovengenoemde wijze kan worden herkend omdat ze geen sporen achterlaten. De vraag is dan ook hoe dit type virussen kan worden herkend.

De docent introduceert vervolgens het ontwerpprobleem: hoe kan een virusgeïnfecteerde cel worden herkend en onschadelijk gemaakt?

Groepsbespreking

Ik verwacht dat leerlingen in de groepsbespreking wel tot een functionele typering van het gewenste mechanisme zullen komen (figuur 3.7.3). Daarvoor is wel van belang dat leerlingen nagaan hoe de verschillende oplossingen kunnen worden gerealiseerd. De docent zal hier leerlingen expliciet naar moeten vragen. Deze aanwijzing ontbrak in de eerste ronde. Veel leerlingen bleken toen niet tot het gewenste mechanisme te komen; dit werd zelfs niet overwogen. Alternatieve herkenningsmechanismen, zoals het herkennen van DNA en/of signaalstoffen, en alternatieve mechanismen van onschadelijk maken, zoals zelfvernietiging en leegzuigen, werden gekozen. Deze oplossingen lijken adequaat indien men niet nagaat hoe ze precies kunnen worden gerealiseerd. Pas dan kan men inzien dat specifieke herkenning nodig is en kan men zich realiseren dat

deze oplossingen minder adequaat zijn. Ik verwacht dan ook dat leerlingen uitkomen bij het gewenste mechanisme wanneer hun wordt gevraagd hoe een oplossing kan worden gerealiseerd.

Ik verwacht dat leerlingen bij herkenning waarschijnlijk zullen denken aan een soort signaalstof die de gastheercel afgeeft indien deze is geïnfecteerd. Een soortgelijke oplossing hebben leerlingen waarschijnlijk in de vorige stap al geformuleerd voor het opsporen van bacteriën. Ik verwacht echter dat, wanneer leerlingen nagaan hoe deze oplossing kan worden gerealiseerd, ze zich realiseren dat voordat de signaalstof wordt afgegeven eerst moet worden vastgesteld dat het virus is binnengedrongen.

Bij herkenning van het virus zullen leerlingen waarschijnlijk in eerste instantie denken aan herkenning van het DNA. Ik verwacht dat ze hierop zullen komen omdat ze weten dat een virus lichaamsvreemd DNA inbrengt in de gastheercel. In stap 4 hebben ze echter al ontdekt dat het heel moeilijk is om vreemd DNA te herkennen. Leerlingen komen dan wellicht op het idee om (delen van) de eiwitmantels van virussen te herkennen. Zij realiseren zich waarschijnlijk dat deze middels specifieke receptoren kunnen worden herkend. Deze receptoren moeten specifiek zijn omdat anders ook andere lichaamseigen antigenen kunnen worden herkend. Dit zou echter betekenen dat in elke geïnfecteerde cel alle mogelijke receptoren voor virale antigenen moeten kunnen worden aangemaakt. Leerlingen weten dat middels genherschikking voor ieder antigeen een receptor kan worden aangemaakt. Ik verwacht echter ook dat ze zich realiseren dat dit mechanisme niet in iedere lichaamseigen cel kan plaatsvinden. Ik verwacht dan ook dat ze tot de conclusie zullen komen dat specifieke herkenning in de cel niet mogelijk is.

Waarschijnlijk realiseren leerlingen zich wel dat een specifieke herkenning van buitenaf mogelijk is. Er kunnen namelijk, evenals bij B-cellen, cellen worden aangemaakt die ieder voor een ander type antigeen een receptor bezitten. Ik verwacht dan ook dat leerlingen tot de conclusie komen dat viraal antigeen op het celmembraan moet worden gepresenteerd, waar het vervolgens wordt herkend door een cel met een specifieke receptor. Leerlingen zullen zich dan ook realiseren dat een signaalstof niet mogelijk en niet nodig is. Een virusgeïnfecteerde cel kan immers pas een signaalstof afgeven indien het virus specifiek is herkend. Specifieke herkenning kan echter alleen van buitenaf plaatsvinden. Wanneer deze herkenning eenmaal heeft plaatsgevonden is een signaalstof niet meer nodig.

Ik verwacht ook dat leerlingen verschillende oplossingen zullen bedenken voor het onschadelijk maken van de virusgeïnfecteerde cel. Sommige leerlingen zullen wellicht denken aan een vorm van zelfvernietiging. De cel vernietigt zichzelf indien wordt waargenomen dat het virus is binnengedrongen. Ik verwacht dat leerlingen zich zullen realiseren dat ook deze oplossing niet mogelijk en niet nodig is, omdat viraal antigeen eerst van buitenaf specifiek moet worden herkend. Leerlingen zullen bij het onschadelijk maken van een geïnfecteerde cel waarschijnlijk ook denken aan een soort stofzuiger die de cel leegzuigt. Het voordeel hiervan is dat virussen niet vrijkomen. Wanneer leerlingen echter nagaan hoe de oplossing kan worden gerealiseerd zullen ze zich waarschijnlijk realiseren dat het moeilijk is een zodanige onderdruk te creëren dat de cel volledig wordt leeggezogen. Ik verwacht dat leerlingen dan ook zullen besluiten tot een vorm van lekprikken. Ze zullen

zich waarschijnlijk realiseren dat in dit geval intacte virussen vrij kunnen komen (indien de cel niet tijdig wordt lekgeprik). Ik verwacht echter dat ze zich realiseren dat de macrofaag in combinatie met antistoffen van de B-cellen deze vrijgekomen virussen kan fagocyteren.

Tijdens de groepsbesprekingen loopt de docent rond en vraagt leerlingen hoe hun oplossingen kunnen worden gerealiseerd.

Klassikale evaluatie

Ik verwacht dat leerlingen in de groepsbespreking zijn gekomen tot een functionele typering van het gewenste mechanisme van herkenning en onschadelijk maken. Leerlingen hebben dan ook al onderkend dat herkenning specifiek moet zijn. De klassikale evaluatie kan nu in twee fasen worden doorlopen. In de eerste fase wordt direct aangesloten bij het mechanisme dat leerlingen in de groepsbespreking hebben bedacht. Indien nodig kan leerlingen nog worden gevraagd wat er gebeurt wanneer virussen vrijkomen na het lekprikken van de virusgeïnfecteerde cel. Hiermee worden ze gestimuleerd hun kennis over B-cellen en macrofagen te integreren met kennis over Tkiller-cellen.

In de tweede fase van de klassikale evaluatie leren de leerlingen welke kenmerken de Tkiller-cel met de B-cel gemeen heeft en waarom deze kenmerken nodig zijn. In de eerste fase is al geconstateerd dat een Tkiller-cel over specifieke receptoren moet beschikken. Leerlingen gaan nu stap voor stap na welke consequenties dit heeft (specificiteit → genherrangschikking → 1 cel-1 receptor → selectieve klonering → in lymfeklieren). Speciale aandacht krijgt hierbij het transport van de Tkiller-cel naar de lymfeklieren. In de eerste ronde is hier geen aandacht aan besteed. De meeste leerlingen bleken zich toen niet te realiseren dat alleen vrijgekomen virussen door Tkiller-cellen kunnen worden vervoerd.

De docent gaat eerst na hoe een geïnfecteerde cel kan worden herkend. Ik verwacht dat leerlingen zijn uitgekomen op presentatie van viraal antigeen op het celmembraan, waarna dit wordt herkend door een cel met een specifieke receptor. Indien leerlingen nog alternatieve oplossingen voor de herkenning hebben bedacht kunnen deze worden besproken, zoals in de groepsbespreking is aangegeven. De docent vertelt vervolgens dat elke lichaamseigen cel over MHC-moleculen beschikt die viraal antigeen kunnen presenteren op het celoppervlak. Een Tkiller-cel beschikt over specifieke receptoren waarmee één type viraal antigeen in combinatie met MHC kan worden herkend. De docent kan vervolgens nog vragen waarom de Tkiller-cel specifieke receptoren moet bezitten. Leerlingen zullen zich waarschijnlijk realiseren dat dit nodig is omdat MHC ook lichaamseigen materiaal kan presenteren. Specifieke receptoren verkleinen de kans dat ook lichaamseigen materiaal wordt herkend.

Vervolgens wordt nagegaan hoe een geïnfecteerde cel onschadelijk kan worden gemaakt. Ik verwacht dat leerlingen op lekprikken zijn uitgekomen. De docent geeft aan dat Tkiller-cellen geïnfecteerde cellen kunnen lekprikken door middel van de stof perforine (van perforeren). Indien leerlingen het nadeel hiervan nog niet hebben onderkend kan door de docent hier naar worden gevraagd. Ik verwacht dat leerlingen zich zullen realiseren dat virussen ook vrij kunnen komen. De

docent kan nog vragen waarom een Tkiller-cel niet altijd op tijd de cel kan lekprikken. Leerlingen realiseren zich dan waarschijnlijk dat niet van te voren kan worden bepaald welke cel is geïnfecteerd en dat een Tkiller-cel met juiste receptor dus niet altijd op het juiste moment aanwezig kan zijn. Leerlingen kan vervolgens worden gevraagd wat er dan gebeurt met de virussen die vrijkomen. Ik verwacht dat leerlingen zich zullen realiseren dat B-cellen antistoffen gaan aanmaken waarna macrofagen de vrijgekomen virussen kunnen fagocyteren.

In de tweede fase van de klassikale evaluatie wordt nagegaan welke consequenties herkenning middels specifieke receptoren heeft voor de andere kenmerken van de Tkiller-cel.

Leerlingen kan vervolgens worden gevraagd hoe voor ieder viraal antigeen een aparte receptor kan worden aangemaakt. Ik verwacht dat leerlingen dan denken aan het genhorrangschikkingmechanisme. Waarschijnlijk hebben ze hieraan al in de groepsbespreking gedacht. De docent geeft aan dat ook Tkiller-cellen op deze manier worden aangemaakt. De docent vraagt wat dit betekent voor de Tkiller-cellen. Ik verwacht dat leerlingen zich zullen realiseren dat elke Tkiller-cel slechts één type receptor aanmaakt. Vervolgens kan worden gevraagd wat het nadeel hiervan is. Leerlingen zullen zich waarschijnlijk realiseren dat de trefkans tussen geïnfecteerde cellen en een Tkiller-cel klein is. Ik verwacht dan ook dat leerlingen zich realiseren dat ook Tkiller-cellen middels selectieve klonering vermeerderen. Leerlingen kan vervolgens worden gevraagd waar klonering plaatsvindt. Leerlingen weten waarschijnlijk dat dit in de lymfeklieren plaatsvindt.

De docent kan vervolgens de vraag stellen hoe een Tkiller-cel daar komt. Leerlingen zullen er waarschijnlijk vanuit gaan dat eerst een virusgeïnfecteerde cel wordt herkend, waarna een Tkiller-cel met antigeen naar een lymfeklier verhuist. De docent kan aangeven dat dit niet mogelijk is omdat het antigeen niet van het MHC kan worden 'afgebeten'. De docent kan leerlingen vervolgens vragen hoe transport dan wel mogelijk is. Leerlingen komen dan waarschijnlijk op het idee van transport van vrijgekomen virussen. De docent kan vragen door welke celtypen deze kunnen worden getransporteerd. Ik verwacht dat leerlingen zich realiseren dat macrofagen veelal niet over de juiste receptor beschikken. Waarschijnlijk zullen ze B-cellen als een mogelijke kandidaat beschouwen. De docent kan dit bevestigen. Ik verwacht dat ze niet zullen denken aan Tkiller-cellen, omdat ze hebben geleerd dat deze alleen in combinatie met MHC viraal antigeen kunnen herkennen. De docent geeft aan dat herkenning in combinatie met MHC niet nodig is voor transport maar wel voor het onschadelijk maken van een geïnfecteerde cel.

De docent vraagt vervolgens of een Tkiller-cel, evenals een B-cel, zijn receptoren kan uitscheiden na klonering. Ik verwacht dat leerlingen zich realiseren dat dit zinloos is, omdat met een receptor de virusgeïnfecteerde cel niet onschadelijk kan worden gemaakt. De docent geeft dan ook aan dat de Tkiller-cellen na klonering in de lymfeklieren terugkeren naar de plek van de infectie en daar de geïnfecteerde cellen onschadelijk maken.

Beschrijving en verantwoording van de toepassingsvragen

Middels een viertal toepassingsvragen wordt de kennis van leerlingen over Tkiller-cellen en de samenwerking met B-cellen en macrofagen getoetst. Met toepassingsvraag 9 wordt nagegaan of leerlingen zich realiseren waarom Tkiller-cellen eigenlijk nodig zijn. Deze vraag is opgenomen omdat leerlingen in de eerste ronde hiervan niet waren overtuigd.

9. Wat vind je van de volgende stelling: Met macrofagen en B-cellen kunnen we virusinfecties prima de baas. Licht je antwoord toe.

Leerlingen zullen zich enerzijds moeten realiseren dat bij virusinfecties de geïnfecteerde cellen zo vroeg mogelijk onschadelijk moeten worden gemaakt; het liefst voordat de virussen zich hebben vermeerderd. Tevens dienen ze zich te realiseren waarom herkenning en fagocytose van geïnfecteerde cellen middels B-cellen en macrofagen niet mogelijk is.

Met toepassingsvraag 10 wordt nagegaan of leerlingen het herkenningsmechanisme van Tkiller-cellen begrijpen.

10. Waarom kan een Tkiller-cel een virusgeïnfecteerde bacterie niet lekprikken?

Leerlingen dienen zich te realiseren dat een bacterie niet kan worden lekgeprik, omdat een bacterie geen MHC bevat dat viraal antigeen naar buiten kan brengen waarna het door Tkiller-cellen kan worden herkend en onschadelijk gemaakt.

In de eindtoets is een toepassingsvraag opgenomen waarmee kan worden nagegaan of leerlingen de werking van Tkiller-cellen in samenwerking met B-cellen en macrofagen begrijpen. Hiermee kan worden nagegaan of leerlingen hun kennis over de belangrijkste onderdelen van het immuunsysteem ook hebben geïntegreerd.

11. De persoon die hier is getekend³ is besmet met het virus Herpes labialis. Een infectie met dit virus leidt tot een koortslip (er ontstaan blaasjes op de lip). De situatie is als volgt: Enkele virussen bevinden zich buiten de cellen en enkele zitten reeds in de gastheercellen. Beschrijf nu (zo gedetailleerd mogelijk) wat er achtereenvolgens zou moeten gebeuren om deze koortslip voor eens en voor altijd te laten verdwijnen. Je kunt je beschrijvingen met een tekening illustreren.

In de vraag is opgenomen dat reeds enkele virussen zich buiten de cel bevinden omdat anders geen immunoreactie kan beginnen. De toevoeging 'zo gedetailleerd mogelijk' is opgenomen om leerlingen te stimuleren alle gebeurtenissen die ze kennen en noodzakelijk zijn voor het laten verdwijnen van de koortslip ook te expliciteren en te noteren. De toevoeging 'voor eens en voor

³ De tekening is hier niet afgebeeld. Het betreft een zijaanzicht van een hoofd. Een pijltje wijst naar blaasjes op de lip.

altijd' is opgenomen omdat leerlingen er zo op worden gewezen dat ook vrijgekomen virussen onschadelijk moeten worden gemaakt. In tabel 3.7.1. staan de tien gebeurtenissen vermeld die moeten plaatsvinden om de koortslip te laten verdwijnen. Dit zijn tevens de elementen uit de doelstellingen die middels deze vraag kunnen worden getoetst.

vrijgekomen virus wordt door Tkiller-cel (of B-cel) vervoerd naar een lymfeklier
in de lymfeklier vindt selectieve klonering van Tkiller-cellen plaats
een kloon van Tkiller-cellen verhuist naar de plek van de infectie
presentatie viraal antigeen door MHC-moleculen
de Tkiller-cel prikt de cel lek
vrijgekomen virus wordt door een B-cel vervoerd naar een lymfeklier
selectieve klonering van de B-cel in de lymfeklier
een kloon van B-cellen en antistoffen gaan weer naar de plek van de infectie
antistof kan binden aan vrijgekomen virus
een macrofaag kan een antistof-antigeen complex herkennen en fagocyteren

Tabel 3.7.1

Elementen uit de doelstellingen die met toepassingsvraag 11 worden getoetst

Tenslotte is in de eindtoets nog een toepassingsvraag opgenomen die leerlingen inzicht biedt in een nieuw ontwerpprobleem dat kan ontstaan. Daarbij moeten ze reeds verworven kennis gebruiken om te begrijpen waarom het probleem kan ontstaan en om een keuze te kunnen maken tussen twee oplossingen voor dit probleem.

12. Het tot nu toe ontwikkelde immuunsysteem is niet helemaal veilig. Er kunnen nog B-cellen en Tkiller-cellen ontstaan die gericht zijn tegen eigen lichaamscellen.

a. Hoe kan dat? (geef enkele mogelijkheden)

Momenteel denken onderzoekers aan twee mogelijkheden om er voor te zorgen dat eenmaal ontstane B-cellen en Tkiller-cellen niet in actie kunnen komen tegen lichaamseigen materiaal.

De ene groep onderzoekers denkt dat er een *suppressor-cel* bestaat. Indien er Tkiller-cellen of B-cellen ontstaan met receptoren voor lichaamseigen materiaal dan worden deze onderdrukt door de *suppressor-cel*. Met andere woorden Tkiller-cellen en B-cellen komen altijd in actie behalve wanneer ze worden onderdrukt door een *suppressor-cel*.

De andere groep onderzoekers denkt dat er een *helper-cel* bestaat. Hierbij gaat men er vanuit dat alle B-cellen en Tkiller-cellen alleen tot actie overgaan wanneer ze antigeen binden en een signaal

krijgen van de helper-cel.

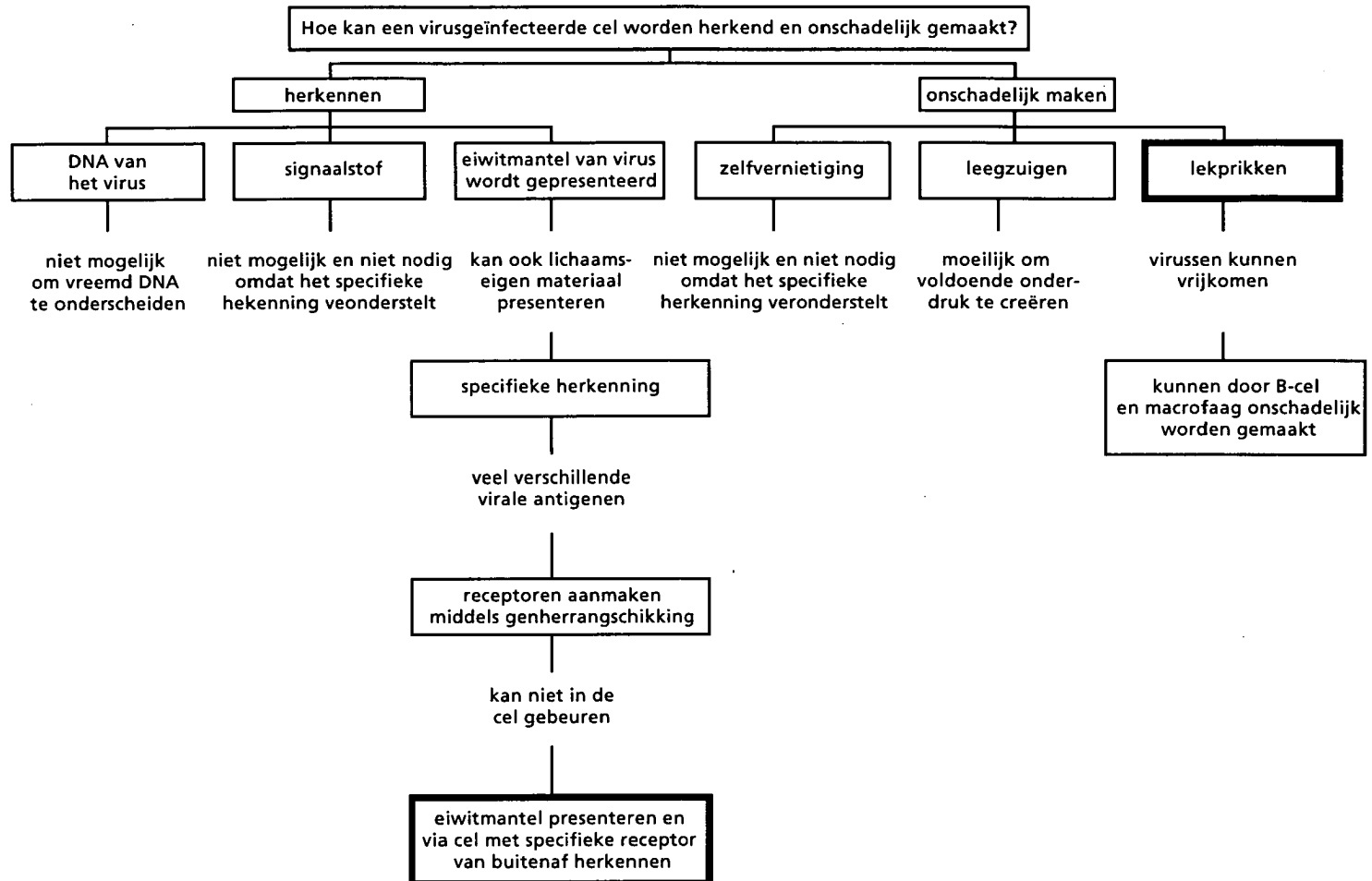
Helper-cellen en suppressor-cellen ontstaan evenals B-cellen en Tkiller-cellen uit stamcellen middels het mechanisme van genherrangschikking.

- b. Wat is een nadeel van de suppressor-cel?
- c. Wat is een nadeel van de helper-cel?
- d. Welke cel zou jij verkiezen? Licht je antwoord toe.

Leerlingen dienen zich bij 12a te realiseren dat door mutaties in Tkiller-cellen en B-cellen receptoren kunnen veranderen en dat door mutaties in lichaamseigen cellen antigenen kunnen veranderen. Met betrekking tot 12b en 12c dienen leerlingen zich te realiseren dat een suppressor-cel als nadeel heeft dat het minder veilig is dan een helper-cel. Wanneer immers een suppressor-cel niet op het juiste moment aanwezig is kunnen B-cellen en Tkiller-cellen met receptoren tegen lichaamseigen materiaal in actie komen. Een helper-cel kan er daarentegen voor zorgen dat de immuunrespons traag op gang komt, omdat deze cel altijd aanwezig moet zijn voordat B-cellen en Tkiller-cellen tegen de ziekteverwekkers in actie kunnen komen. Met betrekking tot 12d verwacht ik van leerlingen dat ze bovengenoemde nadelen afwegen en de cel zullen kiezen met de minste nadelen. Ik verwacht dat leerlingen de helper-cel zullen kiezen. Er zal zoveel mogelijk moeten worden voorkomen dat cellen in actie komen tegen lichaamseigen materiaal.

Figuur 3.7.3

Verwachte oplossingen en nadelen tijdens de groepsbespreking van stap 6



3.8 Leren werken met de ontwerpheuristiek

Ik wil het onderwijs zo inrichten dat leerlingen de gewenste kennis verwerven over het immuunsysteem en dat ze leren werken met de ontwerpheuristiek. In deze paragraaf worden de laatstgenoemde doelstelling en het bijbehorende onderwijsleerproces beschreven en verantwoord.

Beschrijving en verantwoording van de doelstellingen

In stap 2 tot en met 6 van de lessenserie werken leerlingen met de ontwerpheuristiek. De ontwerpheuristiek wordt vooral gebruikt in de individuele denkfase en de groepsbesprekingen van de betreffende stappen. Ik zal dan ook mijn verwachtingen ten aanzien van het werken met de ontwerpheuristiek in beide fasen beschrijven. Omdat bepaalde stappen van de ontwerpheuristiek in beide fasen zullen terugkomen zullen deze hier eerst kort worden beschreven (figuur 3.8.1).

-
- 1 Bepaal de functie van het systeem als geheel
 - 2 Formuleer het ontwerpprobleem
 - 3 Bedenk meerdere oplossingen voor het ontwerpprobleem
 - 4 Bedenk voor iedere oplossing één of meerdere nadelen
 - 5 Kies de oplossing met de minste nadelen en ga naar 2.
-

Figuur 3.8.1

Ontwerpheuristiek voor leerlingen

Werken met de ontwerpheuristiek

In stap 1 wordt de functie van het systeem als geheel bepaald. In deze lessenserie gaan leerlingen onder begeleiding van de docent na wat de functie is van het immuunsysteem. Ze ontdekken dat niet geheel kan worden voorkomen dat ziekteverwekkers ons lichaam binnendringen en concluderen dat de binnengedrongen ziekteverwekkers dus onschadelijk moeten worden gemaakt (3.2).

In stap 2 wordt het ontwerpprobleem geformuleerd. In deze lessenserie verwacht ik van leerlingen dat ze grotendeels zelf de ontwerpproblemen formuleren waaraan ze gaan werken. Een nadeel van een geselecteerde oplossing wordt in een ontwerpprobleem geherformuleerd. Alleen het nadeel van de eindoplossing uit iedere stap van de lessenserie wordt door de docent in een ontwerpprobleem geherformuleerd.

In stap 3 wordt van leerlingen verwacht dat ze meerdere oplossingen bedenken voor het centrale ontwerpprobleem van de betreffende stap. Uit de eerste ronde bleek dat leerlingen daarbij vaak nog onvoldoende nagaan hoe een bedachte oplossing zou kunnen worden gerealiseerd. Bij herkenning van de ziekteverwekker dachten sommige leerlingen bijvoorbeeld aan aftasten, maar gingen vervolgens niet na hoe dit in zijn werk zou moeten gaan. Dit is wel belangrijk. Op deze manier wordt reeds aanwezige kennis over het systeem geac-

tiveerd. Bovendien worden bepaalde nadelen van oplossingen pas duidelijk wanneer wordt nagegaan hoe ze kunnen worden gerealiseerd. Het nadeel van aftasten bijvoorbeeld wordt pas duidelijk wanneer de leerlingen zich realiseren dat dit gebeurt middels herkenning van structuren op de buitenkant van de ziekteverwekker. Ook wordt vaak pas dan duidelijk dat een oplossing biologisch onmogelijk is. Zo realiseert men zich dat een instructiemechanisme onmogelijk is wanneer men nagaat hoe de informatieoverdracht van antigeen naar DNA zou moeten plaatsvinden. In deze ronde verwacht ik daarom van leerlingen dat ze nagaan hoe een oplossing kan worden gerealiseerd. In stap 4 dienen leerlingen na te gaan wat de nadelen zijn van een oplossing. Hierbij is het van belang dat leerlingen de nadelen ook formuleren in termen van negatieve effecten op overleven en voortplanting van het organisme.

In stap 5 tenslotte wordt van leerlingen verwacht dat ze nagaan welke oplossing de minste nadelen heeft. Indien de geselecteerde oplossing nog een nadeel heeft, verwacht ik van leerlingen dat dit ook weer wordt geherformuleerd in een nieuw ontwerpprobleem waar dan weer opnieuw oplossingen voor zullen moeten worden bedacht en getoetst.

Werken met de ontwerpheuristiek in de individuele denkfase

In stap 2 tot en met stap 6 volgt na de klassikale introductie van het ontwerpprobleem een individuele denkfase. Leerlingen noteren in deze fase het ontwerpprobleem op hun ontwerpformulier. Ik verwacht dat leerlingen tenminste één oplossing en één nadeel bedenken voor het betreffende ontwerpprobleem en dat ze al enigszins nagaan hoe die oplossing kan worden gerealiseerd. Ik heb mijn verwachtingen hieromtrent niet per stap gespecificeerd. In het algemeen ga ik er vanuit dat deze oplossingen enerzijds verder zijn gespecificeerd dan bijvoorbeeld aftasten en afschieten en anderzijds minder ver zijn uitgewerkt dan de oplossingen die ik in de groepsbesprekingen verwacht. Indien leerlingen al meerdere oplossingen hebben bedacht met de bijbehorende nadelen, hoeven ze in de individuele denkfase nog niet te bepalen welke oplossing de minste nadelen heeft; dit gebeurt in de groepsbespreking. Ik verwacht dat leerlingen, overeenkomstig de resultaten uit de eerste ronde, in stap 2 nog begeleid moeten worden bij het werken met de ontwerpheuristiek (zie beschrijving en verantwoording van het onderwijsleerproces). Vanaf stap 3 verwacht ik dat leerlingen dit zelfstandig kunnen.

Werken met de ontwerpheuristiek in de groepsbespreking

In de groepsbespreking verwacht ik dat de oplossingen en bijbehorende nadelen van de verschillende groepsleden worden geïnventariseerd en verder ontwikkeld. Ik ga er vanuit dat leerlingen in het groepje nader nagaan hoe de oplossingen kunnen worden gerealiseerd en welke (andere) nadelen hieraan

verbonden zijn. Bovendien verwacht ik dat leerlingen de oplossing kiezen met de minste nadelen en het betreffende nadeel weer herformuleren in een nieuw ontwerpprobleem waar weer nieuwe oplossingen voor kunnen worden bedacht. De resultaten van de eerste ronde wijzen uit dat leerlingen een nadeel niet altijd expliciet in een ontwerpprobleem herformuleren alvorens hier een oplossing voor te zoeken. Veelal wordt onmiddellijk voor een nadeel een oplossing gezocht. Dit is meestal ook geen probleem. Ik verwacht wel dat leerlingen het ontwerpprobleem expliciteren wanneer er in het groepje onduidelijkheid bestaat over het ontwerpprobleem waarvoor een oplossing moet worden gezocht. In de scenario's voor de afzonderlijke stappen zijn mijn verwachtingen gespecificeerd met betrekking tot de mate van detaillering van de oplossingen die leerlingen bereiken en hoever ze doorgaan met het oplossen van nadelen van (voorlopig) geselecteerde oplossingen.

Ik verwacht dat leerlingen elkaar tijdens de groepsbespreking op twee manieren zullen stimuleren om met de ontwerpheuristiek te werken. Leerlingen stimuleren elkaar doordat ze van elkaars oplossingen nagaan hoe ze kunnen worden vervuld, wat de nadelen zijn en wat de oplossing is met de minste nadelen. Leerlingen kunnen elkaar ook stimuleren door ontwerp vragen te stellen (welke oplossing heb je?; hoe kan deze worden gerealiseerd?; wat is het nadeel?; wat is de oplossing met de minste nadelen?). Ik verwacht, overeenkomstig de resultaten uit de eerste ronde, dat de docent in stap 2 groepjes nog zal moeten stimuleren met de ontwerpheuristiek te werken. Ik verwacht dat dit vanaf stap 3 nauwelijks meer nodig is.

Beschrijving en verantwoording van het onderwijsleerproces

Voor het onderwijzen van de ontwerpheuristiek is gekozen voor het meester-gezel model (2.1.4). Leerlingen leren met de ontwerpheuristiek te werken, door zelf het immuunsysteem te ontwerpen onder begeleiding van de docent. Hieronder wordt beschreven hoe het onderwijs in de verschillende stappen is ingericht, zodat leerlingen met de ontwerpheuristiek leren werken.

Demonstratie van de ontwerpheuristiek

De docent zal het werken met de ontwerpheuristiek eerst moeten demonstreren, voordat leerlingen hier zelf mee kunnen gaan werken. In de eerste ronde werd de ontwerpheuristiek vóór stap 1 gedemonstreerd. Uit de resultaten van de eerste ronde bleek dat deze uitleg te vroeg kwam. Toen de leerlingen in stap 2 met de ontwerpheuristiek moesten gaan werken wisten velen van hen niet wat ze moesten doen en heeft de docent opnieuw voorgedaan hoe ze met de ontwerpheuristiek kunnen werken. Daarna konden de betreffende leerlingen er wel mee werken. In deze ronde wordt de ontwerpheuristiek daarom pas in stap 2 gedemonstreerd, tijdens de klassikale introductie. Dit heeft als bij-

komend voordeel dat leerlingen de meeste stappen van de ontwerpheuristiek al een keer doorlopen hebben. Leerlingen krijgen namelijk in stap 1 al het eerste ontwerpprobleem voorgelegd ('hoe kan worden voorkomen dat ziekteverwekkers ons lichaam binnendringen?'). Ze bedenken hier ook oplossingen voor (hygiëne en barrières) en gaan na wat het nadeel is van deze oplossingen (ziekteverwekkers kunnen nog het lichaam binnendringen). Dit nadeel wordt door de docent in een nieuw ontwerpprobleem geformuleerd ('hoe kan een binnengedrongen ziekteverwekker onschadelijk worden gemaakt?').

De docent kan nu het werken met de ontwerpheuristiek demonstreren en expliciteren aan de hand van het ontwerpproces dat leerlingen in stap 1 al hebben doorlopen. Op grond van resultaten uit de eerste ronde wordt hier een aanwijzing toegevoegd. Sommige leerlingen bleken in stap 2 tijdens de individuele denkfase en groepsbespreking geremd te zijn om creatieve oplossingen te bedenken. Zij gingen, evenals in de eerste stap, na welke oplossingen voor dit probleem ze al hadden gehad. Andere leerlingen bedachten wel creatieve oplossingen, maar gingen onvoldoende na hoe de oplossingen konden worden gerealiseerd. In deze ronde wordt leerlingen daarom verteld dat ze niet in eerste instantie moeten nagaan wat ze hierover al hebben gehad, maar dat ze zelf creatieve oplossingen voor het probleem moeten bedenken. Van deze oplossingen moeten ze echter vervolgens wel nagaan hoe deze kunnen worden gerealiseerd.

Begeleiding bij het werken met de ontwerpheuristiek in stap 2

De docent moet de leerlingen tijdens de lessenserie begeleiden bij het werken met de ontwerpheuristiek. In de eerste ronde bleken leerlingen al in stap 2 de verschillende stappen van de ontwerpheuristiek correct te hanteren. Het lijkt dus niet nodig leerlingen feedback te geven op de uitvoering van de stappen uit de ontwerpheuristiek. Wel blijkt het nodig te zijn dat de docent leerlingen tijdens de individuele denkfase en de groepsbesprekingen af en toe stimuleert de ontwerpheuristiek te gebruiken. Hiervoor kan hij leerlingen de eerder genoemde ontwerp vragen stellen. Ik verwacht niet dat het in deze ronde nodig is leerlingen te stimuleren creatieve oplossingen te bedenken omdat hieraan in de introductie van de ontwerpheuristiek al aandacht is besteed.

Begeleiding bij het werken met de ontwerpheuristiek in stap 3 tot en met 6

Ik verwacht dat het in de individuele denkfases voor de vervolgstappen, overeenkomstig de resultaten van de eerste ronde, niet meer nodig is leerlingen te stimuleren na te gaan hoe een oplossing moet worden vervuld en wat het nadeel is. Ook verwacht ik dat de docent tijdens de groepsbespreking leerlingen nog nauwelijks hoeft te stimuleren met de ontwerpheuristiek te werken. Ik verwacht dat leerlingen deze rol dan grotendeels voor elkaar vervullen.

Waarschijnlijk zal alleen in stap 4 en 6 de docent expliciet moeten door-

vragen naar hoe een oplossing kan worden gerealiseerd. In stap 4 verwacht ik dat dit nodig is omdat leerlingen waarschijnlijk in eerste instantie hun instructiemechanismen zullen verfijnen door de nadelen hiervan na te gaan en deze op te lossen. Omdat de uiteindelijke oplossing toch al middels een aantal bijstellingen tot stand is gekomen, is men waarschijnlijk minder geneigd de oplossing nog verder te onderzoeken. Dit is echter wel nodig om te beseffen dat voor antistofproductie DNA nodig is en welke consequenties dit heeft voor het proces van antistofproductie (zie 3.5). In stap 6 is het waarschijnlijk ook nodig dat leerlingen worden gestimuleerd na te gaan hoe de oplossing kan worden vervuld. Ik verwacht dat leerlingen er in eerste instantie vanuit gaan dat een virusgeïnfecteerde cel middels signaalstoffen kan worden herkend. Leerlingen ontdekken pas dat een signaalstof niet nodig is, en bovendien moeilijk mogelijk is, wanneer ze in detail nagaan hoe kan worden vastgesteld dat een virus de cel is binnengedrongen (zie 3.7).

In stap 5 zal de docent waarschijnlijk nog een ander type vraag moeten stellen. In de eerste ronde bleken de leerlingen tijdens de groepsbespreking wel te komen tot een mechanisme waarin alle gewenste deelfuncties waren opgenomen (delen, circuleren, concentreren, signaleren). Een aantal leerlingen ging echter onvoldoende na waarom de verschillende deelfuncties ook nodig zijn. Ze konden niet aangeven wat het nadeel is van een mechanisme waarin één van deze deelfuncties niet wordt vervuld. De docent zal leerlingen waarschijnlijk moeten stimuleren dit na te gaan door ze te vragen waarom het mechanisme niet eenvoudiger kan (zie 3.6).

4

Resultaten van 'Het immuunsysteem in zes stappen'

In het vorige hoofdstuk is het scenario van 'Het immuunsysteem in 6 stappen' beschreven. Dit scenario is uitgevoerd en geëvalueerd. De resultaten van de evaluatie worden in dit hoofdstuk gepresenteerd. In 4.1 wordt de opzet van het empirisch onderzoek beschreven en verantwoord. Vervolgens worden voor elk stap uit het scenario de resultaten beschreven met betrekking tot de ontwikkeling van de gewenste kennis (4.2-4.7). In 4.8 volgen de resultaten met betrekking tot het leren werken met de ontwerpheuristiek. Daarna wordt besproken hoe leerlingen ontwerpend leren hebben ervaren (4.9). Tenslotte worden de resultaten samengevat (4.10).

4.1 Beschrijving en verantwoording van het onderzoek

Introductie

Met het empirisch onderzoek wil ik nagaan of het scenario adequaat is en welke bijstellingen eventueel nodig zijn. Hiervoor zijn de volgende onderzoeksvragen geformuleerd.

- *Verloopt het onderwijsleerproces zoals verwacht en worden de beoogde doelstellingen gerealiseerd?*
- *Hoe kunnen onverwachte resultaten worden verklaard en hoe is hiermee omgegaan?*

Om na te gaan of het scenario adequaat is, wordt het verwachte onderwijsleerproces vergeleken met het werkelijke verloop van het onderwijsleerproces. Tevens wordt nagegaan of leerlingen de gewenste kennis over het immuunsysteem hebben verworven en met de ontwerpheuristiek kunnen werken.

Onverwachte resultaten kunnen aanleiding zijn tot het bijstellen van het scenario. Ideeën voor de bijstelling van het scenario kunnen worden verkregen door de onverwachte resultaten te analyseren en na te gaan hoe hiermee is omgegaan.

Opzet van het onderzoek

Voor de beoordeling en eventuele verbetering van het scenario is een gedetailleerde beschrijving en analyse van het werkelijke verloop van het onderwijsleerproces noodzakelijk. Deze procedure is zeer arbeidsintensief. Het onderzoek is dan ook kleinschalig van opzet. Het onderwijs is in elke ronde in één klas uitgevoerd en geëvalueerd. In de eerste ronde is het onderwijs gegeven aan een 5 VWO klas met 14 leerlingen van een scholengemeenschap in Almere. De resultaten gaven aanleiding tot bijstelling van het scenario. Dit bijgestelde scenario is gepresenteerd in hoofdstuk 3. Het onderwijs op basis van dit bijgestelde scenario, is gegeven aan een 6 VWO klas met 14 leerlingen van een scholengemeenschap in Uden.

Bij de selectie van de klassen speelden de volgende overwegingen een rol. Ik wilde het onderwijs in zowel een 5 als een 6 VWO klas uitproberen, omdat docenten het onderwerp immunologie in 5 of 6 VWO behandelen. Het verschil in voorkennis tussen de leerlingen van 5 en 6 VWO was gering doordat het onderwijs in de 5 VWO klas aan het eind van het schooljaar is gegeven. In beide klassen was het onderwerp moleculaire genetica al behandeld. Dit is van belang, omdat in de lessenserie enige voorkennis over eiwitsynthese wordt verondersteld. Bij de aanvang van het immunologieonderwijs hadden de leerlingen uit beide klassen nog weinig ervaring opgedaan met groepswork en het zelfstandig ontwikkelen van kennis. Ik heb hier bewust voor gekozen, omdat bij veel leerlingen in het gangbare biologieonderwijs deze ervaring ook zal ontbreken.

Beide klassen zijn relatief klein. Ook hiervoor is bewust gekozen. Omdat het scenario nog in ontwikkeling is, kan het vaker voorkomen dat leerlingen onverwachte oplossingen en nadelen bedenken. In een kleine klas kunnen onverwachte oplossingen van leerlingen eerder worden gesignaleerd en kan hieraan meer aandacht worden besteed. Hierdoor kan beter inzicht worden verkregen in waarom de onverwachte oplossing is bedacht en hoe hiermee kan worden omgegaan. Hier kunnen dan weer aanwijzingen voor de bijstelling van het scenario aan worden ontleend.

Het onderwijs heb ik in beide klassen zelf gegeven. Ik heb hiervoor gekozen om aan twee voorwaarden te kunnen voldoen. Ten eerste is het van belang dat het scenario wordt uitgevoerd zoals bedoeld, omdat anders niet kan worden nagegaan of het scenario adequaat is. Ten tweede is het voor de bijstelling van het scenario van belang dat adequaat wordt omgegaan met onverwachte resultaten. Omdat ik het scenario zelf heb ontwikkeld, verwacht ik dat ik aan deze voorwaarden beter kan voldoen dan een docent die minder ervaring heeft met

ontwerpend leren in het algemeen en met dit scenario in het bijzonder.

Dataverzameling en -analyse

In deze paragraaf wordt eerst voor de beide onderzoeksvragen beschreven welke data zijn gebruikt voor het beantwoorden van de vraag en hoe deze data zijn geanalyseerd. Vervolgens wordt een onderdeel van de data-analyse, i.c. de interpretatie van leerlinguitspraken, nader beschreven.

Voor de beantwoording van de eerste onderzoeksvraag heb ik nagegaan of:

- het onderwijsleerproces is verlopen zoals verwacht;
- leerlingen de gewenste kennis hebben verworven;
- leerlingen kunnen werken met de ontwerpheuristiek.

Deze drie aspecten worden hieronder besproken.

onderwijsleerproces

Het feitelijke onderwijsleerproces is vastgelegd om te kunnen nagaan of het is verlopen zoals werd verwacht. Hiervoor zijn de klassikale introductie, de groepsbesprekingen van de vier groepjes en de klassikale evaluatie opgenomen op audioband. Alle audio-opnames zijn letterlijk geprotocolleerd.

Bij de analyse ben ik als volgt te werk gegaan. Het onderwijsleerproces zoals beschreven in het scenario, heb ik vergeleken met het feitelijke onderwijsleerproces zoals beschreven in de protocollen. Wanneer het onderwijsleerproces is verlopen zoals verwacht, is dit kort vermeld en geïllustreerd. De onverwachte gebeurtenissen die het verloop van het onderwijsleerproces in belangrijke mate beïnvloeden of aanleiding zijn tot het bijstellen van het scenario zijn ook vermeld. Dit is het geval indien:

- de docent het ontwerpprobleem anders formuleert dan gepland; andere informatie aanbiedt of op een ander moment; de ontwerpheuristiek op een andere manier introduceert; leerlingen op andere manieren feedback geeft of stimuleert bij het werken met de ontwerpheuristiek.
- de leerlingen tijdens de groepsbespreking tot een andere eindoplossing of nadeel komen dan verwacht; in de klassikale evaluatie niet kiezen voor de geselecteerde oplossing of het nadeel van deze oplossing niet onderkennen.

gewenste kennis

De gewenste kennis is per stap beschreven in het scenario. Vier componenten kunnen worden onderscheiden:

- welke functie wordt vervuld;
- door welk mechanisme de functie wordt vervuld;
- waarom de functie zo beter wordt vervuld dan door enkele alternatieven;
- wat het nadeel is van het mechanisme.

Ik heb twee databronnen gebruikt om vast te stellen of leerlingen de ge-

wenste kennis hebben verworven: protocollen van het onderwijsleerproces en de antwoorden van de leerlingen op de toepassingsvragen. De toepassingsvragen kregen de leerlingen na afloop van iedere stap uitgedeeld. Bovendien hebben leerlingen na afloop van de lessenserie enkele toepassingsvragen gekregen in de vorm van een eindtoets.

De protocollen van de groepsbespreking verschaffen in de meeste stappen al informatie over alle componenten van de gewenste kennis. De leerlingen komen immers al vaak in de groepsbespreking middels afweging van alternatieven tot een globale typering van het mechanisme waarmee de functie kan worden vervuld. Bovendien wordt dan al vaak het bijbehorende nadeel onderkend.

Aanvullende informatie is verkregen middels de toepassingsvragen. De toepassingsvragen zijn gebruikt om na te gaan of de leerlingen adequate kennis hebben verworven over het mechanisme dat in de betreffende stap is behandeld en of deze kennis is geïntegreerd met de verworven kennis uit de voorafgaande stappen. In enkele gevallen is ook een toepassingsvraag opgenomen om na te gaan of leerlingen de kennis van het mechanisme ook functioneel kunnen verantwoorden. Dit kan namelijk niet altijd middels protocolanalyse van de groepsbesprekingen worden vastgesteld, omdat de leerlingen soms pas in de klassikale evaluatie tot een globale typering van het mechanisme en het bijbehorende nadeel komen.

Op basis van de analyse van de protocollen en de antwoorden van de leerlingen op de toepassingsvragen is vastgesteld of leerlingen de gewenste kennis hebben verworven. Ook hier zijn de verwachte en onverwachte resultaten vermeld.

werken met de ontwerpheuristiek

In het scenario staan ook mijn verwachtingen beschreven ten aanzien van het werken met de ontwerpheuristiek in de individuele denkfase en de groepsbespreking. In de individuele denkfase noteren leerlingen hun oplossingen en bijbehorende nadelen op een ontwerpformulier. Deze ontwerpformulieren zijn gebruikt om vast te stellen of leerlingen in de individuele denkfase adequaat met de ontwerpheuristiek hebben gewerkt. De protocollen van de groepsbespreking heb ik gebruikt om na te gaan of leerlingen de ontwerpheuristiek in de groepsbespreking hanteren zoals verwacht. Daarbij heb ik niet alleen nagegaan of ze de stappen van de ontwerpheuristiek adequaat doorlopen, maar heb ik ook bekeken of ze elkaar hebben gestimuleerd zoals verwacht. Ook hier zijn weer de verwachte en onverwachte resultaten vermeld.

De onverwachte resultaten zijn vervolgens voor de beantwoording van de tweede onderzoeksvraag nader geanalyseerd. Ik heb nagegaan:

- hoe onverwachte resultaten kunnen worden verklaard;
- hoe met deze onverwachte resultaten is omgegaan en welk effect dit had.

Informatie over beide aspecten kan leiden tot (aanwijzingen voor) bijstelling van het scenario. Voor beide aspecten zal hieronder worden beschreven welke data ik heb gebruikt en hoe ik deze heb geanalyseerd.

verklaring van onverwachte resultaten

Wanneer een beoogde doelstelling niet is gerealiseerd, heb ik de protocollen van het onderwijsleerproces geraadpleegd. Voor leerlingen die bijvoorbeeld niet wisten hoe een Tkiller-cel antigeen naar de lymfeklieren transporteert, is nagegaan in hoeverre dit uit het feitelijke verloop van het onderwijsleerproces kan worden verklaard.

Voor de twee typen onverwachte resultaten met betrekking tot het onderwijsleerproces heb ik als volgt een verklaring gezocht. Wanneer de docent (i.c. FJ) anders heeft gehandeld dan gepland heb ik nagegaan of de docent:

- eenvoudigweg heeft vergeten de geplande aanwijzing uit te voeren;
- tijdgebrek dit verhinderde;
- het voorafgaande onderwijsleerproces een andere handelwijze noodzakelijk maakte.

Om dit laatste na te gaan heb ik weer de protocollen geraadpleegd. Wanneer leerlingen in de groepsbespreking of de klassikale evaluatie tot andere oplossingen of nadelen kwamen dan verwacht, heb ik nagegaan of:

- de docent anders heeft gehandeld dan gepland;
- leerlingen het ontwerpprobleem anders hebben geïnterpreteerd;
- leerlingen over andere voorkennis beschikken dan verwacht;
- leerlingen niet adequaat met de ontwerpheuristiek hebben gewerkt.

Ook hiervoor heb ik weer de protocollen geraadpleegd, indien nodig aangevuld met een analyse van de ontwerpformulieren uit de individuele denkfase.

omgang met onverwachte resultaten

Tenslotte heb ik voor de onverwachte resultaten met betrekking tot het onderwijsleerproces nagegaan hoe hiermee is omgegaan en met welk effect. Voor het niet geplande handelen van de docent heb ik nagegaan hoe dit het leerproces van de leerlingen beïnvloedde. Hiervoor zijn de protocollen en de antwoorden van de toepassingsvragen geraadpleegd. Wanneer leerlingen in de groepsbespreking of klassikale evaluatie tot onverwachte oplossingen en nadelen zijn gekomen, heb ik nagegaan hoe daarmee in de klassikale evaluatie door de andere leerlingen en de docent is omgegaan. Hiervoor zijn ook de protocollen geraadpleegd. Daarbij heb ik vooral nagegaan of de leerlingen aan het eind van de klassikale evaluatie inzien dat de geselecteerde oplossing beter is dan hun alternatief en of ze het nadeel van de geselecteerde oplossing onderkennen.

De bovengenoemde analyse van de data is eerst door mij uitgevoerd. De gerapporteerde resultaten zijn vervolgens diepgaand bediscussieerd met de twee

begeleiders. Waar er sprake was van meningsverschillen kon gemakkelijk overeenstemming worden bereikt. Tevens heeft een tweede onderzoeker onafhankelijk van mij de volledige analyse van de data van stap drie volgens de geschetste procedure uitgevoerd. Dit leidde tot overeenkomstige resultaten. De analyse kan dan ook als betrouwbaar worden beschouwd.

interpretatie van leerlinguitspraken

Tijdens de analyse van de data moeten uitspraken van leerlingen worden geïnterpreteerd. Het is niet altijd eenvoudig om vast te stellen wat een leerling met een bepaalde uitspraak bedoelt. Bij het interpreteren van leerlinguitspraken ga ik er vanuit dat leerlingen rationeel denken en handelen (Klaassen, 1995). Toegepast op ontwerpnd leren betekent dit dat ik de volgende vuistregel hanteer bij de interpretatie van leerlinguitspraken: leerlingen formuleren een adequate oplossing voor het ontwerpprobleem zoals zij dit opvatten. Wanneer ik van mening ben dat een oplossing van een leerling niet adequaat is, gegeven het ontwerpprobleem, dan ga ik er in eerste instantie vanuit dat ik de oplossing of het ontwerpprobleem zoals leerlingen dit opvatten, nog niet goed heb begrepen. In dit geval formuleer ik een nieuwe hypothese over wat een leerling met een uitspraak bedoelt. Voor het toetsen van een hypothese maak ik niet alleen gebruik van de uitspraak zelf, maar tevens van de context waarin deze uitspraak wordt gedaan. Ik zal deze interpretatieprocedure met twee voorbeelden illustreren.

Een leerling stelt in stap 2 de volgende oplossing voor: 'je hebt een cel die de bacterie omringt en vervolgens worden er antistoffen bijgedaan en de bacterie is dood'. Uitgaande van bovengenoemde vuistregel stel ik vast dat de leerling het woord antistof niet in zijn immunologische betekenis gebruikt. Immers een antistof is een eiwit dat aan een antigeen kan binden, maar niet een bacterie kan doden. Antistof betekent voor de leerling waarschijnlijk een soort stof die bacteriën kan doden (hoe is uit deze uitspraak niet op te maken).

Een andere leerling beschrijft eveneens in stap 2 hoe een bacterie onschadelijk kan worden gemaakt: 'hij moet eerst worden losgekoppeld vervolgens worden opgenomen in de cel, onschadelijk gemaakt en afgevoerd'. In eerste instantie lijkt deze oplossing op de oplossing die hiervoor werd gegeven. Ik vroeg me echter af wat 'loskoppelen' hier betekent. Wellicht dacht de leerling dat de bacterie ergens aan vast zit. Maar waaraan? In het protocol van de groepsgesprekken kon ik dit in eerste instantie niet terugvinden. Uit de ontwerpformulieren van de individuele denkfase bleek dat een leerling van het groepje eerder aan een soort enzym had gedacht: een enzym dat specifiek past op een bacterie en hem vervolgens onschadelijk maakt. Deze oplossing had de groep echter al verworpen, omdat de bacterie dan in het lichaam blijft. Ze leken vervolgens meer te zien in een cel die de bacterie omringt, onschadelijk maakt en afvoert. Ze hadden echter hier weer als nadeel van onderkend dat hij niet specifiek is en dus alles kan omringen. Ik kwam toen op de hypothese dat de betreffende leerling waarschijnlijk het idee van een enzym en van de cel had gecombineerd: het

specifieke enzym maakt de bacterie niet onschadelijk, maar overhandigt hem aan een cel die hem onschadelijk maakt en afvoert. In het groepsprotocol en het protocol van de klassikale evaluatie vond ik ondersteuning voor deze hypothese.

Rapportage van de resultaten

In 4.2 tot en met 4.7 worden de resultaten per stap beschreven. Hier wordt nagegaan of leerlingen over de gewenste kennis beschikken en of het bijbehorende onderwijsleerproces is verlopen zoals verwacht. Deze resultaten worden als volgt gerapporteerd.

resultaten samengevat

De verwachte en onverwachte resultaten voor de betreffende stap worden eerst samengevat. Voor een overzicht van de beoogde doelstellingen en het verwachte onderwijsleerproces wordt verwezen naar de scenario's van de betreffende stappen die in de corresponderende paragrafen in hoofdstuk 3 zijn beschreven.

illustratie van verwachte resultaten

Middels protocolfragmenten worden vervolgens enkele verwachte resultaten met betrekking tot het onderwijsleerproces geïllustreerd. Hierdoor wordt de beschrijving levensechter. Bovendien stelt het de lezer in staat onze interpretaties van de protocollen te controleren. De oplossingen en nadelen die in de vier groepjes tijdens de groepsbespreking zijn bedacht, worden in een overzichtsschema weergegeven. In dit schema is ook aangegeven welke oplossingen en nadelen ik van leerlingen had verwacht. Tevens wordt een overzicht gegeven van de antwoorden op de toepassingsvragen.

analyse van onverwachte resultaten

Daarna worden onverwachte resultaten besproken en geanalyseerd. Voor onverwachte oplossingen en nadelen die leerlingen hebben bedacht, zal tevens worden beschreven hoe hiermee is omgegaan en welk effect dit had.

conclusie en bijstelling van het scenario

Op grond van de resultaten wordt een conclusie voor de betreffende stap geformuleerd. Vervolgens wordt aangegeven welke onverwachte resultaten aanleiding zijn voor bijstelling van het scenario voor de betreffende stap. Globale en meer specifieke aanwijzingen voor de bijstelling van het scenario worden beschreven en verantwoord. De specifieke aanwijzingen zijn in een kleiner lettertype afgedrukt.

In paragraaf 4.8 worden de resultaten met betrekking tot het leren werken met de ontwerpheuristiek op een overeenkomstige wijze beschreven.

4.2 Stap 1

In deze stap hebben leerlingen nagegaan wat de functie is van het immuunsysteem en waarom het nodig is dat deze functie wordt vervuld.

Resultaten samengevat

Het onderwijsleerproces is verlopen zoals verwacht. Een leerling geeft aan dat het immuunsysteem ons beschermt tegen ziekteverwekkers. Enkele leerlingen geven ook aan waarom virussen en bacteriën schadelijk zijn. Leerlingen noemen, zoals verwacht, verschillende hygiënische maatregelen en lichamelijke barrières die kunnen voorkomen dat ziekteverwekkers het lichaam binnendringen. Leerlingen realiseren zich ook dat de barrières kunnen worden gepasseerd. Een leerling geeft aan dat in dit geval het immuunsysteem in actie komt.

De doelstellingen voor deze stap zijn gerealiseerd. De leerlingen weten waarom bacteriën en virussen schadelijk zijn. De leerlingen kunnen enkele hygiënische maatregelen en lichamelijke barrières noemen die voorkomen dat ziekteverwekkers het lichaam binnendringen. Bovendien realiseren de leerlingen zich dat ziekteverwekkers de barrières kunnen passeren. Uit de protocollen van stap 2 blijkt dat alle leerlingen de functie van het immuunsysteem kennen.

Illustratie van verwachte resultaten

Illustratie van het onderwijsleerproces

Protocol 4.2.1 laat zien dat leerlingen verschillende oplossingen bedenken voor het probleem 'hoe kan worden voorkomen dat ziekteverwekkers het lichaam binnendringen?'

Protocol 4.2.1a Klassikale bespreking

D=docent

D: Nou kun je je afvragen: Kunnen we dat nou niet voorkomen? Dat die virussen in onze cellen komen en dat die bacteriën in ons komen en gifstoffen gaan produceren. Bedenk eens wat. Hoe zou je kunnen voorkomen dat dit gebeurt? Dat je dus feitelijk ziek wordt?

JA: Steriel maken of zo.

D: Steriel maken. Ja. Andere dingen? Roept u maar, dames en heren.

NR: Antistoffen.

D: Antistoffen.

AK: Ja, dan voorkom je het toch niet?

D: Dat is inderdaad zo, dat is goed. Je kunt hiermee voorkomen dat je ziek wordt, maar de vraag is hoe voorkom je dat ze binnendringen.

JT: Afsluiten.

D: Afsluiten, ja hoe kun je dat doen? Hoe doen we dat? Afsluiten? Wat is het grootste orgaan van ons lichaam?

- JT: Ja, je huid.
- D: Je huid. Dus dat is ook een manier, afsluiten. Nog andere dingen, waarmee kan worden voorkomen dat ze in ons lijf komen.
- JD: Slijmvlies.
- D: Slijmvlies, ja. Ja, dus in je keel, overal eigenlijk heb je slijmvliesen die slijm produceren. Als je gaat hoesten komt dat slijm weer los. En dan worden de bacteriën die er al inzaten weer verwijderd.
- (PB hoest demonstratief)
- D: Even kijken, dan zullen we deze even classificeren. Steriel maken, je kunt natuurlijk een wondje steriel maken, maar er is nog een andere manier van steriel maken, hoe kun je zorgen dat je steriel blijft?
- JR: Door te wassen.
- D: Door te wassen, dus door hygiëne.

De docent classificeert de oplossingen. Daarna vraagt hij de leerlingen of middels barrières kan worden voorkomen dat de ziekteverwekkers het lichaam binnendringen.

Protocol 4.2.1b Vervolg van de klassikale bespreking

D=docent

- D: Kunnen we met de barrières het nu helemaal voorkomen? Ik zie mensen nee schudden, maar waarom niet?
- PB: Nou je wordt toch altijd weer ziek, dus.
- D: Ja, je wordt toch af en toe weer ziek, maar hoe zou dat kunnen dan?
- JD: Er zit toch altijd wel een foutje in een huid, een wondje of zo.
- D: Precies. Er zit altijd wel een foutje in he. Dus je kunt het nooit helemaal waterdicht maken. Dat zou ook niet goed zijn, want je kunt je natuurlijk helemaal afsluiten, dan krijg je geen ziekteverwekkers binnen, maar ook geen eten en alle andere dingen die je nodig hebt. Dus dat is niet zo praktisch. Dus die barrières laten altijd wel enkele ziekteverwekkers door. Nou en als dat allemaal niet werkt, wat hebben we dan?
- PB: Het immuunsysteem.
- D: Geweldig! Dan hebben we het immuunsysteem. Ja? En als dat zelfs niet werkt?
- PB: Word je ziek.
- JR: Ga je dood.
- D: Ben je ziek en op lange termijn kun je er ook aan dood gaan.

Leerlingen realiseren zich dus dat ziekteverwekkers de barrières kunnen passeren en dat deze binnengedrongen ziekteverwekkers onschadelijk moeten worden gemaakt.

Resultaten van de toepassingsvraag

In toepassingsvraag 1 is aan leerlingen gevraagd hoe kan worden verklaard dat je van clostridiumbacteriën ziek kan worden en van yoghurtbacteriën niet. Alle leerlingen (n=13) gaan er vanuit dat clostridiumbacteriën schadelijker zijn dan yoghurtbacteriën, omdat ze een gifstof kunnen produceren. De leerlingen realiseren zich dus dat bepaalde bacteriën schadelijk kunnen zijn door gifstofproductie. Enkele leerlingen geven ook aan dat clostridiumbacteriën schadelijker kunnen zijn, omdat ze beter het lichaam kunnen binnendringen (4) of zich sneller kunnen vermeerderen (2). Uit de protocollen van deze stap en de resultaten van stap 5 en 6 (4.6 en 4.7) blijkt, dat ook de andere leerlingen zich realiseren dat bacteriën eerst de barrières moeten passeren en zich moeten vermeerderen, alvorens schade aan te kunnen richten.

Analyse van onverwachte resultaten

In deze stap hebben zich geen onverwachte resultaten voorgedaan.

Conclusie en bijstelling van het scenario

De doelstellingen voor deze stap zijn gerealiseerd en het onderwijsleerproces is verlopen zoals verwacht. De resultaten geven dan ook geen aanleiding tot bijstelling van het scenario.

4.3 Stap 2

In deze stap hebben leerlingen nagegaan hoe een binnengedrongen ziekteverwekker onschadelijk kan worden gemaakt.

Resultaten samengevat

Het onderwijsleerproces is grotendeels verlopen zoals verwacht. Het probleem is adequaat geïntroduceerd. Tijdens de groepsbespreking komen de meeste groepjes (1,3 en 4) na afweging van alternatieven tot een soort eetcel (figuur 4.3.1). Enkele groepjes (1 en 4) voegen nog elementen toe aan de eetcel. Groep 2 overweegt ook een eetcel, maar vervangt deze door een wielklem. Alle groepjes realiseren zich dat lichaamseigen materiaal niet mag worden aangevalen, maar alleen groep 1 en 4 formuleren dit nadeel ook voor de eetcel. De docent heeft niet gevraagd, zoals gepland, of de eetcellen ook geschikt zijn voor virusgeïnfecteerde cellen. Alleen leerlingen van groep 1 gaan na of de macrofaag hiervoor geschikt is. De klassikale evaluatie is grotendeels verlopen zoals verwacht. Met de onverwachte oplossingen van leerlingen is adequaat omgegaan. Aan de nadelen van de macrofaag is echter onvoldoende aandacht besteed.

De doelstellingen zijn grotendeels gerealiseerd. De leerlingen weten dat ziekteverwekkers onschadelijk worden gemaakt. Ze weten dat een macrofaag bacteriën en 'vrijgekomen' virussen onschadelijk maakt door fagocytose. Er kan niet met zekerheid worden vastgesteld of alle leerlingen zich realiseren dat bij fagocytose de ziekteverwekker zich in een ingesloten stukje buitenmilieu bevindt. De leerlingen hebben de kennis over fagocytose geïntegreerd met de kennis die in de vorige stap is verworven. De leerlingen weten ook waarom dit mechanisme de functie beter vervult dan enkele alternatieven en dat de macrofaag als nadeel heeft dat ook lichaamseigen materiaal kan worden gefagocyteerd. Het is echter niet duidelijk wat de leerlingen precies onder lichaamseigen materiaal verstaan. De meeste leerlingen realiseren zich na afloop van stap 2 niet dat een macrofaag ongeschikt is voor virusgeïnfecteerde cellen.

Illustratie van verwachte resultaten

Illustratie van het onderwijsleerproces

Protocol 4.3.1 illustreert hoe leerlingen van groep 3 middels afweging van alternatieven uitkomen op een soort eetcel.

Protocol 4.3.1 Groepsbespreking groep 3

CL: Ik had door cellen die de ziekteverwekkers meenemen en uit het lichaam verwijderen, volgens mij heb jij dat ook trouwens.

JT: Nee, ik heb niet dat ze uit het lichaam worden verwijderd. Gewoon inkapselen zeg maar. Een muur er omheen bouwen. En jij?

- KE: Bij mij moeten ze er ook uit. Met iets wat het dan omsluit en dan er uit gaat, ik weet niet helemaal hoe ze dat voor elkaar kunnen krijgen.
- JT: Maar het nadeel is dat ze nog door het hele lichaam heen moeten.
- KE: Ja en als ze (bacteriën: F.J) ook maar half vermenigvuldigd zijn, dan heb je er wel veel nodig in ieder geval.
- CL: Wat had jij voor nadeel?
- JT: Dat ze in je lichaam blijven zitten. Als je ze alleen maar inkapselt.
- CL: Maar zou er dan niet iets in kunnen zitten dat het dan afbreekt zodra het ingekapseld is? Dat daar iets, een stofje inzit wat het dan af kan breken?
- JT: Ja maar dan weet ik niet of dat kunstmatig zou moeten zijn.
- KE: Geen idee! Hoe maak je zo iets?
- JT: Dat weet ik niet.
- CL: Misschien is er wel een ander stofje wat er dan in kan. Wat breekt een ding af? Hoe zou je dat kunnen afbreken?
- JT: Dat weet ik niet.
- KE: Maar ze zijn zo wel onschadelijk. We hebben dus eigenlijk allemaal insluiten door een bepaalde cel en dan moet het verwijderd worden.
- CL: Ja.
- JT: Bij mij blijven ze d'r in zitten.
- KE: Maar nog altijd door 'bepaalde' cellen.
- CL: Ja dat vind ik ook zo vaag, bepaalde cellen, dat bepaalde.
- JT: Ja.
- CL: Vind ik trouwens ook wel een goeie, gewoon dat ze erin blijven en dat die cel die omsluit zelf iets kan doen waardoor ze afgebroken worden of zo.
- KE: Kan ook, je kan ook iets erbij doen.
- JT: Ja maar hoe moet je je dat voorstellen? Dan moet er dus iets in de cel zitten wat dan wel, want de bacterie blijft dan..., komt eigenlijk niet in de cel. Hij blijft, ja hij wordt omsloten, dus hij zit er niet helemaal in, maar dan moet er dus wel een stofje zijn wat er wel weer uit kan naar die bacterie toe, wat wel die cel kan verlaten maar dan ook alleen naar die bacterie gaat en niks verder aantast.

Leerlingen van groep 3 overwegen verschillende oplossingen. KE en CL gaan er aanvankelijk vanuit dat de bacterie wordt omringd en vervolgens uit het lichaam wordt verwijderd. JT meent in eerste instantie dat inkapselen (omringen) voldoende is. Van beide oplossingen worden de nadelen onderkend. Ze komen uiteindelijk tot een soort eetcel die echter de bacterie niet helemaal omsluit en met een soort gifstof onschadelijk kan maken. Daarbij realiseren ze zich dat lichaamseigen materiaal niet mag worden aangetast. De stof die de bacterie onschadelijk maakt, moet wel naar de bacterie toe maar mag verder niets aantasten. In het vervolg van de groepsbespreking gaan de leerlingen na hoe en waar die cellen dan gevormd zouden moeten worden.

Resultaten van de toepassingsvraag

Uit de resultaten van toepassingsvraag 2 (n=14) blijkt dat de leerlingen de functie van macrofagen kennen en deze ook in verband kunnen brengen met de verworven kennis over barrières uit de vorige stap. Alle leerlingen geven aan dat de macrofagen zich waarschijnlijk zullen bevinden op (en nabij) de plekken waar ziekteverwekkers binnenkomen. RH specificeert deze plekken niet. De andere leerlingen geven ook voorbeelden van deze plekken: huid (4); slijmvliesen van de) luchtwegen (4); maagdarmkanaal (7).

Analyse van onverwachte resultaten

De volgende onverwachte resultaten worden besproken en geanalyseerd:

- Groep 2 verwerpt een eetcel en kiest voor een wielklem.
- Groep 1 en 4 voegen elementen toe aan de eetcel.
- Groep 2 en 3 realiseren zich niet dat een eetcel ook lichaamseigen materiaal kan aanvallen.
- Groep 2, 3 en 4 realiseren zich niet dat een eetcel ongeschikt is voor virusgeïnfecteerde cellen.

De wielklem

Leerlingen van groep 2 hebben tijdens de groepsbespreking een soort eetcel verworpen, omdat ze denken dat deze langzamer is dan een gifstof (figuur 4.3.1). RH bedenkt vervolgens een cel die tegen de bacterie aan gaat zitten; een wielklem. Ze realiseren zich dat deze wielklem nog moet worden uitgebreid met een gifstof, omdat anders de bacterie niet onschadelijk kan worden gemaakt. Ze lijken zich echter niet te realiseren dat deze cel de nadelen niet kan oplossen die ze eerder hebben geformuleerd voor omringen en afvoeren en voor de eetcel. Ze kiezen dus niet de oplossing met de minste nadelen.

De docent vergelijkt in de klassikale evaluatie de wielklem met de eetcellen die de andere groepjes hebben bedacht. Hij concludeert zelf dat een eetcel beter is, omdat bij de wielklem de vrijgekomen gifstoffen lichaamseigen materiaal kunnen aantasten. Hoewel leerlingen van groep 2 niet de kans hebben gekregen zelf dit nadeel te formuleren verwacht ik wel dat ze zullen onderkennen dat een eetcel beter is dan een wielklem. Ze hebben zich namelijk in de groepsbespreking al eerder gerealiseerd dat gifstoffen schadelijk kunnen zijn voor lichaamseigen materiaal (figuur 4.3.1). Ook hebben ze al eerder nadelen bedacht die ook van toepassing zijn op de wielklem en die door een eetcel kunnen worden opgelost. Protocolanalyse wijst uit dat de leerlingen van groep 2 in de vervolgstappen de wielklem niet meer gebruiken. Alle leerlingen gaan er dan vanuit dat een macrofaag de ziekteverwekkers fagocyteert.

Elementen toegevoegd aan de eetcel

De groepen 1, 3 en 4 zijn na afweging van alternatieven tot een eetcel gekomen. De groepen 1 en 4 voegen hier op grond van bepaalde argumenten elementen aan toe (figuur 4.3.1). Groep 1 realiseert zich dat de gifstoffen waarmee de bacterie onschadelijk wordt gemaakt ook de eetcel zelf kan aantasten. Ze lossen dit probleem op door de ziekteverwekker op te nemen in een blaasje waarin vervolgens de gifstoffen vrijkomen. Groep 4 realiseert zich dat de eetcel ook lichaamseigen materiaal kan aanvallen. Zij lossen dit probleem op door de eetcel uit te rusten met een herkenningsmechanisme. De herkenning wordt uitgevoerd door enzymen die de bacteriën specifiek herkennen. Wanneer de docent tijdens de groepsbespreking de leerlingen vraagt naar het nadeel van deze oplossing realiseren ze zich dat je voor elke ziekteverwekker een andere herkenningsstof moet hebben.

In de klassikale evaluatie is als volgt met de onverwachte oplossingen van groep 1 en 4 omgegaan. De docent bevestigt dat eetcellen inderdaad als nadeel hebben dat ook lichaamseigen materiaal kan worden aangevallen en geeft aan dat dit probleem in de volgende stap wordt behandeld. Hij vertelt groep 4 niet dat hun oplossing adequaat is, maar geeft wel aan dat dit een mogelijke oplossing is voor het probleem. De docent bevestigt ook dat moet worden voorkomen dat gifstoffen de eetcel zelf afbreken. Bij de behandeling van de macrofaag geeft de docent aan dat dit echter niet gebeurt door een blaasje, maar door de bacterie niet in de cel op te nemen. De macrofaag omsluit namelijk de bacterie in z'n geheel. De enzymen komen dan ook niet vrij in de celinhoud van de macrofaag, maar in een stukje ingesloten buitenmilieu waar ze vervolgens de bacterie afbreken (zie figuur 3.3.1). De docent geeft vervolgens aan dat de enzymen zelf wel in een blaasje zijn verpakt om te voorkomen dat ze vrijkomen in de celinhoud van de macrofaag.

Protocolanalyses van de vervolgstappen laten zien dat alle leerlingen het proces van fagocytose tot een bepaald niveau begrijpen. Ze weten allen dat het hier niet alleen gaat om het omringen van de ziekteverwekker, maar ook om het vervolgens onschadelijk maken en uitscheiden van afvalstoffen. Het is op grond van de protocollen niet mogelijk voor alle leerlingen na te gaan of ze van mening zijn dat de bacterie in de celinhoud wordt opgenomen, of dat deze zich in een ingesloten stukje buitenmilieu bevindt. Aan dit aspect van fagocytose zal in het vervolg meer aandacht moeten worden besteed.

Eetcel kan lichaamseigen materiaal niet aanvallen

Alle groepen zijn zich er van bewust dat lichaamseigen materiaal niet mag worden aangevallen. Ze formuleren dit namelijk allemaal als nadeel van een stof die bacteriën onschadelijk maakt (figuur 4.3.1). Echter, alleen de leerlingen van groep 1 en 4 gaan er vanuit dat ook een eetcel dit nadeel heeft. Het is mogelijk

dat de leerlingen van groep 2 en 3 niet op het nadeel komen van de eetcel, omdat ze bij lichaamseigen materiaal denken aan lichaamseigen cellen in solide weefselverband. Deze cellen kunnen namelijk niet worden omringd en dus ook niet onschadelijk worden gemaakt. De protocollen van de groepsbesprekingen geven geen uitsluitsel over wat leerlingen precies verstaan onder lichaamseigen materiaal. In ieder geval denken alle leerlingen aan lichaamseigen cellen en niet aan stoffen.

In de klassikale evaluatie gaf groep 4 aan dat een eetcel eigen cellen kan opvreten. De docent heeft dit slechts bevestigd. Hij heeft niet verder doorgevraagd wat ze onder eigen cellen verstaan en of de leerlingen van groep 2 en 3 het hier mee eens zijn. Uit de protocollen van de vervolgstappen blijkt wel dat alle leerlingen weten dat macrofagen, maar ook de B-cellen en Tkiller-cellen, potentieel gevaarlijk kunnen zijn voor lichaamseigen materiaal. Aan de betekenis van lichaamseigen materiaal zal in het vervolg meer aandacht moeten worden besteed.

Ongeschiktheid van een eetcel voor virusgeïnfekteerde cellen wordt niet onderkend

De meeste groepjes realiseren zich niet dat een eetcel ongeschikt is voor het onschadelijk maken geïnfekteerde cellen. Alleen leerlingen van groep 1 twijfelen aan de geschiktheid van een eetcel voor deze taak (figuur 4.3.1). Omdat de leerlingen slechts heel kort dit probleem aanstippen is niet goed na te gaan waarom ze twijfelen. Deze onverwachte resultaten kunnen waarschijnlijk worden toegeschreven aan de uitvoering van het scenario. De docent heeft vergeten leerlingen te vragen naar de geschiktheid van een eetcel voor het onschadelijk maken van virusgeïnfekteerde cellen. In de klassikale introductie van stap 5, waar de Tkiller-cellen worden behandeld, heeft de docent deze vraag wel gesteld. Enkele leerlingen geven dan wel aan dat een macrofaag cellen in weefselverband niet kan omringen.

Conclusie en bijstelling van het scenario

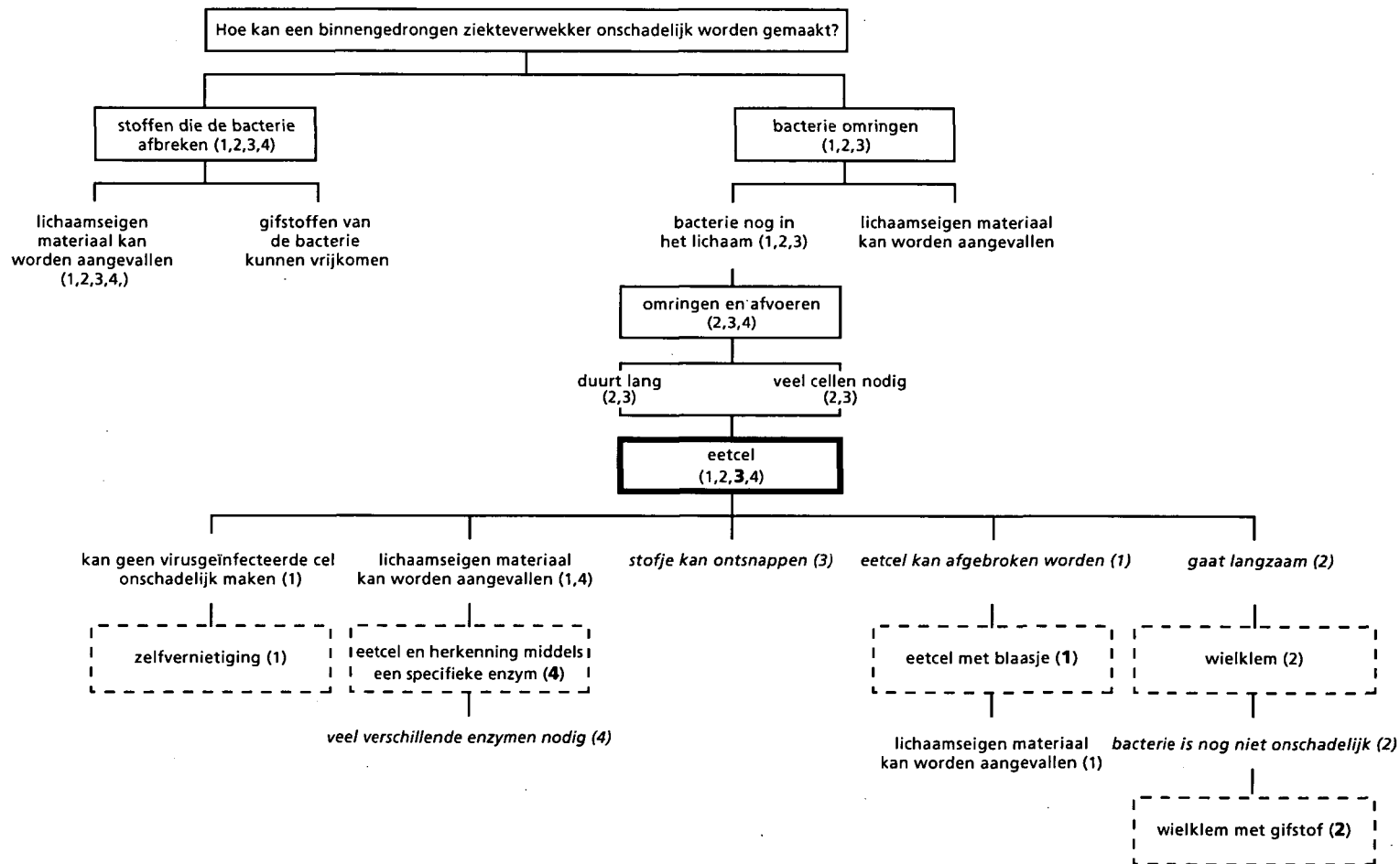
Het onderwijsleerproces is grotendeels verlopen zoals verwacht. De doelstellingen zijn ook grotendeels gerealiseerd. Twee onverwachte resultaten geven echter wel aanleiding tot bijstelling van het scenario.

Ten eerste zal meer aandacht moeten worden besteed aan het proces van fagocytose. Het is mogelijk dat leerlingen van mening zijn dat bij fagocytose de ziekteverwekker niet alleen wordt omringd, maar ook wordt opgenomen in de cel. In het nieuwe scenario zal de opvatting van leerlingen hierover moeten worden geëxpliciteerd en indien nodig bijgesteld. Het probleem dat leerlingen van groep 1 onderkenden, dat stoffen die de bacteriën onschadelijk maken ook de eetcel kunnen aantasten, kan hiervoor als ingang worden gebruikt.

Bij de bespreking van de macrofaag kan de docent aan leerlingen vragen (indien dit probleem niet eerder al door leerlingen is onderkend) hoe kan worden voorkomen dat de enzymen de macrofaag zelf aantasten. Leerlingen die van mening zijn dat de ziekteverwekker in de cel wordt opgenomen zullen nu wellicht denken aan een soort blaasje (zie oplossing van groep 1). Andere leerlingen zullen aangeven dat dit probleem kan worden voorkomen doordat de ziekteverwekker niet in de cel wordt opgenomen. De docent kan aangegeven dat dit laatste inderdaad het geval is. Hij kan daaraan toevoegen dat de macrofaag wel blaasjes bezit. De enzymen zijn namelijk verpakt in blaasjes, zogenaamde lysosomen, zodat wordt voorkomen dat de enzymen alsnog de macrofaag aantasten.

Ten tweede zal in het nieuwe scenario meer aandacht moeten worden besteed aan opvattingen van leerlingen over lichaamseigen materiaal. De betekenis die leerlingen hieraan toekennen bepaalt namelijk of leerlingen onderkennen dat een eetcel/macrofaag lichaamseigen materiaal kan aanvallen. Denkt men bij lichaamseigen materiaal aan cellen in solide weefselverband dan vormt de eetcel geen gevaar. Denkt men daarentegen aan 'vrijlevende' lichaamseigen cellen en stoffen dan bestaat dit gevaar wel. In het bijgestelde scenario kunnen tijdens de klassikale evaluatie de opvattingen van leerlingen over de aard van lichaamseigen materiaal worden geëxpliciteerd. Dit biedt tevens de mogelijkheid leerlingen inzicht te verschaffen in de relatie tussen de beide nadelen van de eetcel/macrofaag: fagocytose van lichaamseigen materiaal en ongeschiktheid voor virusgeïnfecteerde cellen.

Waarschijnlijk hebben alle leerlingen zich gerealiseerd dat stoffen die ziekteverwekkers onschadelijk maken ook schadelijk kunnen zijn voor lichaamseigen materiaal. Aan leerlingen die dit nadeel niet onderkennen voor eetcellen kan worden gevraagd waarom eetcellen niet schadelijk zijn voor lichaamseigen materiaal. Ik verwacht dan dat ze zullen aangeven dat lichaamseigen cellen niet kunnen worden omringd door een eetcel (omdat ze in een weefselverband liggen). Leerlingen die het nadeel wel hebben onderkend, kan nu worden gevraagd waarom zij denken dat de eetcel wel een gevaar vormt voor lichaamseigen materiaal. Waarschijnlijk zullen zij dan voorbeelden geven van 'vrijlevende' lichaamseigen cellen. De docent kan vervolgens bevestigen dat eetcellen niet gevaarlijk zijn voor lichaamseigen cellen in weefselverband, maar wel belangrijke 'vrijlevende' lichaamseigen cellen kunnen aanvallen. De docent kan hieraan toevoegen dat er ook belangrijke stoffen zijn die niet mogen worden gefagocyteerd. Leerlingen kan vervolgens worden gevraagd of een eetcel geschikt is voor het onschadelijk maken van virusgeïnfecteerde cellen. Leerlingen die dit nadeel nog niet hebben geformuleerd tijdens de groepsbespreking zullen zich dan waarschijnlijk realiseren dat virusgeïnfecteerde cellen die in een solide weefselverband zijn opgenomen, niet kunnen worden aangevallen. De docent kan tenslotte aan leerlingen vragen wat het voordeel en het nadeel is van het gegeven dat een eetcel lichaamseigen cellen in weefselverband niet kan fagocyteren. Gezonde lichaamseigen cellen kunnen niet worden gefagocyteerd. Geïnfecteerde lichaamseigen cellen kunnen echter ook niet onschadelijk worden gemaakt.



Figuur 4.3.1

Oplossingen en nadelen die tijdens de groepsbespreking van stap 4 zijn besproken

4.4 Stap 3

Leerlingen hebben in deze stap nagegaan hoe kan worden voorkomen dat een macrofaag lichaamseigen materiaal fagocyteert.

Resultaten samengevat

Het onderwijsleerproces is grotendeels verlopen zoals verwacht. Het ontwerpprobleem is geïntroduceerd zoals gepland. De meeste groepjes kiezen in de groepsbespreking, na afweging van alternatieven, voor herkenning van lichaamseigen materiaal (figuur 4.4.1). Alle groepjes zijn van mening dat voor herkenning van de ziekteverwekker veel verschillende herkenningsstructuren nodig zijn. Groep 3 en 4 zijn echter van mening dat ook voor herkenning van lichaamseigen materiaal veel verschillende herkenningsstructuren nodig zijn. Groep 3 kiest om die reden tijdens de groepsbespreking voor herkenning van de ziekteverwekker. De meeste groepjes kiezen voor structuurherkenning. Alleen groep 2 kiest voor herkenning middels een herkenningsstof terwijl ze structuurherkenning hebben overwogen. Tijdens de klassikale evaluatie onderkent een leerling het nadeel van herkenning van lichaamseigen materiaal: door mutaties kan een receptor veranderen en kan lichaamseigen materiaal worden gefagocyteerd. Vervolgens kiezen leerlingen, zoals verwacht, voor herkenning van de ziekteverwekker. Het nadeel van deze oplossing hebben ze al eerder onderkend.

De doelstellingen voor deze stap zijn gerealiseerd. De leerlingen realiseren zich dat moet worden voorkomen dat lichaamseigen materiaal wordt gefagocyteerd. Ze weten ook dat een macrofaag middels specifieke receptoren antigenen op ziekteverwekkers kan herkennen. Ze kunnen aangeven waarom deze functie zo beter wordt vervuld dan door enkele alternatieven. Bovendien weten de leerlingen dat herkenning van de ziekteverwekker als nadeel heeft dat er veel verschillende receptoren nodig zijn.

Illustratie van verwachte resultaten

Illustratie van het onderwijsleerproces

Protocol 4.4.1 illustreert hoe leerlingen van groep 4 middels afweging van alternatieven uitkomen op structuurherkenning van lichaamseigen materiaal.

Protocol 4.4.1 Groepsbespreking groep 4

NR: Nou wat zijn de verschillende oplossingen?

JA: Nou, ik heb dus dat die bacteriën een eigen structuur hebben waaraan ze herkend kunnen worden. En waardoor die macrofaag ook weet of het een slechte cel is of een goede.

JD: Ja of gewoon, hij herkent alles wat qua vorm en uiterlijk van zichzelf is, en alles wat er niet aan voldoet, vernietigt ie gewoon. Denk ik.

JA: Zou kunnen.

- NR: Is het niet heel sterk, of ja, dat ie dan alles kent van z'n eigen? En hoe herkent hij?
- JA: Door de uiterlijke structuur van de cel.
- PS: Zou het niet zo zijn dat het gewoon een enzym is en dat hij het DNA kan aflezen van eigen cellen.
- A: Dat zou een stuk gemakkelijker zijn.
- PS: En dan kan hij verschil maken tussen: dit is van me eigen en dat is vreemd.
- JA: Ja dat zou makkelijk zijn.
- JD: Nee, dat is het volgens mij toch ook niet, want hij kan niet in de cel het DNA aflezen. Dan is de cel al kapot.
- NR: Dat klopt. Dus dan moet het toch op de buitenkant gedaan worden. Aan de structuur dus.
- JA: Ja, maar dan moet wel zo'n macrofaag verdomd veel dingen weten, tenminste kunnen herkennen. Want daar zijn me toch veel bacteriën.
- NR: Probleem. Nadeel.
- JA: Ja, een groot nadeel.
- NR: Tsja. Dus door structuur, en dan verder. Hoe krijgt ie dat voor elkaar?
- JA: Geen idee.
- JD: Kweenie, misschien kan een macrofaag zijn eigen cellen wel herkennen? En als ie dan een andere cel heeft die hij niet kan herkennen, dat ie die dan vernietigt. Van je eigen cellen heb je er minder verschillend. Maar dan zijn er nog veel cellen.
- NR: Ja dan hebben we nog een probleem.

De leerlingen kiezen voor structuurherkenning van lichaamseigen materiaal maar voorzien nog een probleem, omdat ze van mening zijn dat lichaamseigen materiaal onderling ook verschillend is. Ze realiseren zich dat dit probleem zich niet voordoet wanneer de macrofaag structuren kan herkennen op moleculair niveau (zie onverwachte resultaten).

Tijdens de klassikale evaluatie onderkent een leerling wat het nadeel is van herkenning van lichaamseigen materiaal (protocol 4.4.2).

Protocol 4.4.2 Klassikale evaluatie

D=docent

- D: Wanneer ontstaat er hier (wijst op het bord naar herkenning van lichaamseigen materiaal) een groot probleem?
- AK: Ja, als je eigen cellen bijvoorbeeld veranderen.
- D: Als je eigen cellen veranderen, want dan?
- AK: Dan kan het immuunsysteem jou ook aanvallen.
- D: Ja dus als je eigen cellen veranderen dan heb je een probleem, want dan vreet ie ze op, maar dat is beperkt want hij vreet alleen maar die cellen op die veranderd zijn.
- AK: Of de macrofaag verandert.
- D: Precies, kijk. Als die macrofaag, als deze receptor verandert, stel nou dat door een foutje hij zoiets krijgt ja. Dan herkent ie hem niet meer en dan vreet ie alles op wat ie tegenkomt. Waarom is dit probleem minder groot hier (wijst op het bord naar herkenning ziekteverwekker).
- JD: Dan laat ie op z'n hoogst die bacterie zitten.

AK komt eerst op het idee dat eigen cellen kunnen veranderen, waardoor deze niet meer worden herkend door de macrofaag en vervolgens worden gefagocyteerd. Zij realiseert zich vervolgens dat ook de (receptoren op de) macrofaag kan veranderen. Overeenkomstig het scenario vraagt de docent daarna aan de klas of dit probleem zich ook niet voordoet bij het andere alternatief. JD realiseert zich dat in dit geval alleen een bacterie niet wordt herkend.

Resultaten van de toepassingsvragen

Uit de antwoorden van de toepassingsvraag 3 ($n=13$) blijkt dat de leerlingen zich realiseren waarom receptoren een antigeen specifiek moeten herkennen. Alle leerlingen onderkennen namelijk het nadeel van een receptor waarmee meerdere typen antigenen kunnen worden herkend: de kans wordt dan groter dat ook lichaamseigen materiaal wordt herkend.

Alle leerlingen geven bij toepassingsvraag 4 ($n=14$) aan dat door mutaties in de macrofaag of lichaamseigen cellen, een macrofaag in actie kan komen tegen lichaamseigen materiaal. Hieruit blijkt dat de leerlingen ook het nadeel van lichaamseigen herkenning hebben begrepen.

Analyse van onverwachte resultaten

De volgende onverwachte resultaten worden hieronder besproken en geanalyseerd:

- Groep 2 kiest voor herkenning middels een herkenningsstof, hoewel herkenning van structuren is overwogen
- Groep 3 en 4 zijn van mening dat ook voor de herkenning van lichaamseigen structuren veel verschillende herkenningsstructuren nodig zijn.

Herkennen middels herkenningsstof

Leerlingen van groep 2 verwerpen structuurherkenning en kiezen voor herkenning middels een herkenningsstof. Zij komen tot deze keuze omdat ze er in eerste instantie vanuit gaan dat één macrofaag structuren van lichaamseigen materiaal én de ziekteverwekker kan herkennen. Omdat ze niet weten hoe de macrofaag vervolgens kan vaststellen of het object moet worden gefagocyteerd, kiezen ze voor herkenning middels een herkenningsstof. In dit geval kan namelijk de macrofaag een onderscheid maken op grond van reactieproducten. Pas tegen het einde van de groepsbespreking realiseren ze zich, dat het onderscheid ook kan worden gemaakt als de macrofaag alleen lichaamseigen materiaal kan herkennen. Ze gaan dan echter nog niet na welke consequentie deze keuze heeft voor de wijze waarop iets moet worden herkend. In de klassikale evaluatie realiseren ze zich echter dat in dit geval herkenning beter kan plaatsvinden middels structuurherkenning.

Nadeel herkenning lichaamseigen materiaal: veel herkenningsstructuren nodig

Alle groepjes zijn van mening dat herkenning van de ziekteverwekker als nadeel heeft dat dan veel verschillende herkenningsstructuren nodig zijn (figuur 4.4.1). Groep 3 en 4 formuleren echter dit nadeel ook voor de herkenning van lichaamseigen materiaal. Beide groepen zijn echter wel van mening dat de verschillen tussen lichaamseigen materiaal onderling minder groot zullen zijn dan tussen ziekteverwekkers (figuur 4.4.1; protocol 4.4.2). Ik was er impliciet van uitgegaan dat leerlingen bij structuurherkenning zouden denken aan herkenning op moleculair niveau. Op dat niveau zijn de verschillen tussen lichaamseigen materiaal gering. Leerlingen van groep 3 en 4 gaan er daarentegen vanuit dat macrofagen lichaamseigen materiaal herkennen op het niveau van de cel of delen ervan. Leerlingen weten dat er veel verschillende celtypen bestaan die alle een andere vorm hebben (spiercellen, bloedcellen, zenuwcellen, etc.) (protocol 4.4.3). Ze gaan er daarom vanuit dat ook voor herkenning van lichaamseigen materiaal veel herkenningsstructuren nodig zijn.

Groep 4 realiseerde zich dat herkenning op een lager niveau plaatsvindt toen tijdens de groepsbespreking de docent hen vroeg naar het niveau van herkenning (protocol 4.4.3).

Protocol 4.4.3 Groepsbespreking groep 4

D=docent

D: Hoe gaat het hier?

NR: Moeizaam.

D: Moeizaam. Ja, het is ook niet makkelijk. Wat hebben jullie gekozen tot nu toe?

NR: Hij herkent structuren van de eigen cellen.

D: En wat is daar verder moeizaam aan, dat is toch een perfecte oplossing of toch niet?

NR: Ja, maar er zijn een hoop verschillende cellen.

JD: Je hebt natuurlijk wel groepjes cellen die hetzelfde zijn, maar er zijn natuurlijk wel heel veel verschillende soorten.

D: Maar als je nu macrofaag bent, wat zou je dan van je eigen cellen herkennen? Stulp je je daar helemaal omheen of, hoe herken je dan zo iets.

(stilte)

NR: Samenstelling van het celmembraan of zo.

D: Ja. Kijk je moet dus bij herkennen niet denken op het niveau van de hele cel, maar je moet denken op het niveau van moleculen van het celmembraan.

De leerlingen van groep 4 komen vervolgens tot de conclusie dat op moleculair niveau de verschillen tussen lichaamseigen materiaal wellicht niet zo groot zijn, en dat dus niet veel verschillende herkenningsstructuren nodig zijn.

Groep 3 heeft zich dit niet gerealiseerd tijdens de groepsbespreking. De docent heeft hen hier ook niet op gewezen. Zij zijn in de groepsbespreking

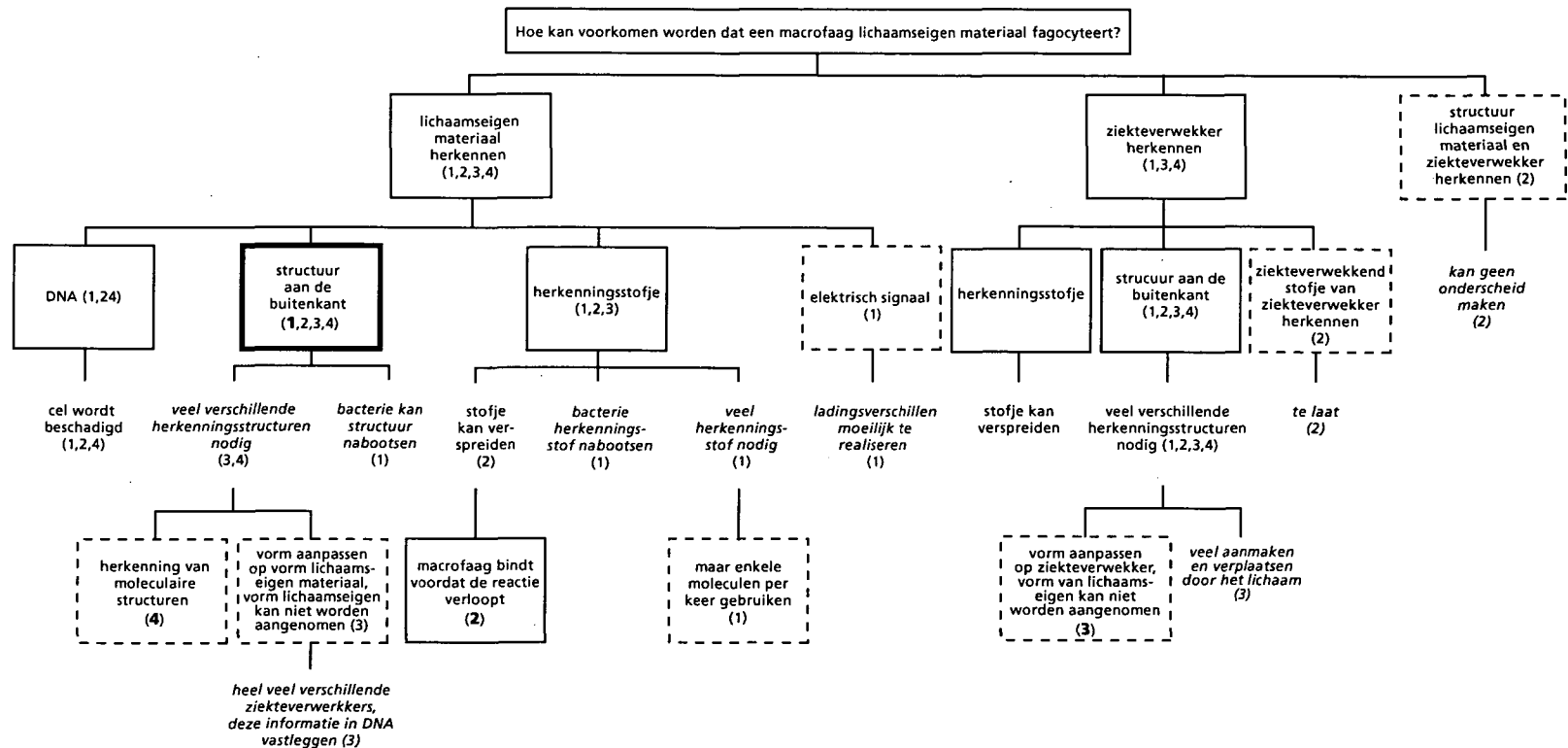
dan ook gaan nadenken over het probleem 'hoe voor veel verschillende structuren een herkenningsstructuur kan worden aangemaakt'. Een soortgelijk probleem wordt in stap 4 aan de orde gesteld. Zij komen in de groepsbespreking tot een geavanceerde vorm van gerichte instructie (zie figuur 4.4.1).

Tijdens de klassikale evaluatie is de docent als volgt met de oplossing van groep 4 omgegaan. Wanneer het deelprobleem 'wat moet een macrofaag herkennen' wordt behandeld, geeft een leerling van groep 3 aan dat lichaamseigen herkenning problematisch is, omdat er heel veel verschillende lichaamseigen cellen zijn. Naar aanleiding hiervan vertelt de docent dat herkenning plaatsvindt op het niveau van moleculen en dat op dat niveau de verschillen tussen lichaamseigen materiaal niet zo groot zijn. Daarna volgt de discussie die in protocol 4.4.2. is weergegeven. Uit de antwoorden op toepassingsvraag 4, 5, 11 en 12 blijkt dat alle leerlingen zich realiseren dat receptoren eiwitten zijn en dat herkenning dus op moleculair niveau plaatsvindt.

Conclusie en bijstelling van het scenario

Het onderwijsleerproces is grotendeels verlopen zoals verwacht en de doelstellingen voor deze stap zijn gerealiseerd. Een onverwacht resultaat geeft wel aanleiding tot bijstelling van het scenario van stap 3. Ik heb er in het scenario onvoldoende rekening mee gehouden dat structuurherkenning volgens leerlingen op verschillende niveaus kan plaatsvinden. Zowel in de groepsbespreking als in de klassikale evaluatie zal hieraan meer aandacht moeten worden besteed.

Wanneer leerlingen tijdens de groepsbespreking een vorm van structuurherkenning hebben bevestigd, kan de docent vragen wat een macrofaag precies herkent van de ziekteverwekker of van lichaamseigen materiaal. Ik verwacht dat enige leerlingen, evenals in deze ronde, zich zullen realiseren dat herkenning op moleculair niveau plaatsvindt. Waarschijnlijk realiseren deze leerlingen zich ook dat op moleculair niveau lichaamseigen materiaal onderling niet veel verschilt, maar de ziekteverwekkers onderling wel. Omdat het vrijwel onmogelijk is op het juiste moment bij alle groepjes deze vraag te stellen, kan hier (indien nodig) in de klassikale evaluatie opnieuw naar worden gevraagd bij de behandeling van het deelprobleem 'hoe een macrofaag iets herkent?'



Figuur 4.4.1

Oplossingen en nadelen die tijdens de groepsbespreking van stap 3 zijn besproken

- De andere nadelen van deze oplossing die in groep 2 zijn besproken, zijn weergegeven onder 'herkennen van de ziekteverwekker' en onder 'herkennen van lichaamseigen materiaal'

4.5 Stap 4

In deze stap hebben leerlingen nagegaan hoe voor ieder antigeen een receptor kan worden aangemaakt.

Resultaten samengevat

Het onderwijsleerproces is grotendeels verlopen zoals verwacht. De klassikale introductie is uitgevoerd zoals gepland. Een leerling geeft aan dat een macrofaag hulp kan krijgen bij de herkenning middels een soort verloopsteker. De groepsbespreking heeft langer geduurd dan verwacht. Leerlingen komen, zoals verwacht, na afweging van alternatieven tot een gericht instructiemechanisme (figuur 4.5.1). Leerlingen van groep 1 en 2 geven hier echter een andere invulling aan dan verwacht. Groep 1 bedenkt al een soort genherrangschikkingsmechanisme. Groep 2 ontleent het DNA voor de productie van antistoffen aan de ziekteverwekker ('DNA-brug'). Als gevolg van deze afwijkende resultaten en door tijdgebrek, is de bespreking van de informatieoverdracht van antigeen naar DNA en de wijze waarop variatie wordt gegenereerd, anders behandeld dan gepland. Leerlingen realiseren zich tijdens de klassikale evaluatie, zoals verwacht, dat een variatie-selectiemechanisme het nadeel heeft dat de trefkans tussen een B-cel met de juiste receptor en een antigeen klein is. Enkele leerlingen blijken echter aan het eind van de klassikale evaluatie op-nieuw na te gaan of een instructiemechanisme toch niet mogelijk is.

De doelstellingen voor deze stap zijn grotendeels gerealiseerd. De leerlingen weten hoe B-cellen macrofagen assisteren bij de herkenning van de ziekteverwekker. De leerlingen weten ook hoe een variatie-selectiemechanisme voor antistofproductie werkt. Alleen is niet duidelijk of de leerlingen zich realiseren dat bij genherrangschikking genen uit ketens van nucleotiden i.p.v. uit afzonderlijke nucleotiden worden samengesteld. Bovendien gaan enkele leerlingen er wellicht nog vanuit dat antistofproductie beter door een instructiemechanisme kan worden vervuld. De leerlingen weten dat bij een variatie-selectiemechanisme de trefkans tussen een B-cel met de juiste receptor en een antigeen klein is.

Illustratie van verwachte resultaten

Illustratie van het onderwijsleerproces

De ontwikkeling van een gericht instructiemechanisme en de ontdekking van het nadeel van een variatie-selectiemechanisme zullen hieronder worden geïllustreerd. Alle groepjes kiezen tijdens de groepsbespreking voor een gericht instructiemechanisme (figuur 4.5.1). Het ontwerpproces wordt geïllustreerd aan de hand van enkele fragmenten uit de bespreking van groep 1. Protocol 4.5.1a laat zien dat leerlingen geheugengestuurde instructie overwegen: de informatie voor de aanmaak van antistoffen is reeds aanwezig in de cel.

Protocol 4.5.1a Groepsbespreking groep 1

- PB: Oké. De oplossing is: Geheugencellen! Als er ooit één in aanraking is geweest met een antigeen waar die op dat moment effe geen antistoffen voor kan maken.
- JR: Hoe doe je dat bij de eerste aanraking?
- PB: Ja nou, bij die eerste aanraking wordt ie dan een beetje ziek van, ofzo. En dan maakt ie snel die antistof.
- JR: Maar hoe maakt ie die antistof, daar gaat het toch om?
- AK: Ja, dan is die structuur of zoiets die wordt afgemeten, en die B-cel maakt dan zo'n anti-stof. Nou, dan wordt die ziekte bestreden, zeg maar. Daar kun je dan even ziek van worden, maar die structuur die wordt wel onthouden, door geheugencellen.

Leerlingen onderkennen dus dat niet voor alle antigenen een antistof aanwezig kan zijn en bedenken dan ook een voorziening zodat de B-cel ook voor nieuwe antigenen een antistof kan aanmaken. Dit blinde instructiemechanisme wordt in het vervolg van de bespreking nader gespecificeerd. Leerlingen gaan er vanuit dat de B-cel middels een soort vervormbare receptor kan bepalen voor welk antigeen een antistof moet worden gemaakt. Vervolgens vraagt de docent hen naar het nadeel van hun blinde instructiemechanisme. De leerlingen realiseren zich dan ook dat antistoffen tegen lichaamseigen materiaal kunnen worden gevormd. Protocol 4.5.1b laat zien hoe leerlingen dit probleem oplossen.

Protocol 4.5.1b Vervolg groepsbespreking groep 1

- MV: Nou dan moet je ze (antistoffen: F.J) allemaal klaar hebben liggen ofzo.
- PB: Ja maar dat kan dus niet.
- MV: Ja, want het zijn steeds verschillende.
- AK: Maar hij kan ze niet onderweg maken, want dan zou die ze ook voor z'n eigen kunnen maken.
- MV: Ja hij moet ze dus, op de een of andere manier moet hij die antistoffen uit elkaar zien te houden van zichzelf en van bacteriën.
- AK: Ja.
- PB: Maar hoe. Maar hij kan ze dus wel maken, maar hij moet ze niet kunnen vervormen. Hij moet niet...
- MV: Daar moet dus iets tussen zitten. Waardoor het wel kan.
- AK: Heeft ie niet, een af andere code ofzo, met alle dingen erop, waar je allemaal verschillende dingen mee kan maken, behalve die van zichzelf.
- P/A/M:(tegelijk) DNA!
- (..)
- PB: Nou, dan hebben we 't toch?? Dus effe samenvatten hè, dus er komt een bacterie aan, lbrlbrllbrlm, komt een macrofaagje aan en die heeft vier of twintig, weet ik veel, van die ...
- JR: Maar niet de goeie.
- PB: Van die receptoren. Maar niet de goeie, ja. Dan komt de B-cel die antistofjes maakt. Die B-cel die gaat onderzoeken en zo, dit en dat, dan kijken..

AK: Welk DNA hij moet hebben voor dat stekkertje.

PB: Ja oke. En dan komt ie d'r achter het een bacterie is en dan maakt ie een anti-stof. En komt ie d'r achter dat het een eigen cel is, dan doet ie niks.

(..)

JR: Maar hij kan toch nooit van z'n leven al die codes hebben.

P/A/M:(tegelijk) Nee-ée.

Leerlingen gaan er dus vanuit dat er geen antistoffen voor lichaamseigen antigenen kunnen worden aangemaakt omdat in de B-cel hiervoor geen DNA aanwezig is. Dit gerichte instructiemechanisme wordt nader uitgewerkt. Leerlingen zijn het er over eens dat er niet voor elke antistof al een DNA-code in B-cellen aanwezig kan zijn. In het vervolg van de bespreking gaan leerlingen na hoe nieuwe DNA-codes kunnen worden aangemaakt. Ze komen dan tot een soort genherrangschikkingsmechanisme (zie onverwachte resultaten: protocol 4.5.5).

In de klassikale evaluatie worden de gerichte instructiemechanismen van de leerlingen besproken en vervangen door een variatie-selectiemechanisme. Protocol 4.5.2 laat zien dat een leerling al tijdens de samenvatting van het genherrangschikkingsmechanisme het probleem van de trefkans onderkent.

Protocol 4.5.2 Klassikale evaluatie

D=docent

D: Er worden dus voortdurend door die stamcel nieuwe B-cellen aangemaakt, die zijn allemaal verschillend, dat gebeurt gewoon at random, dus gewoon 'blind' gaat dat, hij maakt er willekeurig een heleboel aan.

CL: Maar hoe weet ie dat dan?

D: He?

CL: Ja maar stel daar komt een macrofaag en die komt die bacterie tegen en hoe weet ie dan dat ie juist die B-cel er naar toe moet. Dat die de juiste receptor heeft? Hoe vinden die elkaar?

D: Nou, dat weet ie niet. Dat gaat dus toevallig. Die B-cel die moet die bacterie tegenkomen. En als ie 'm tegenkomt, dan gaat ie meerdere van deze antistoffen aanmaken, en die bindt aan het antigeen van de bacterie en de macrofaag kan de bacterie vervolgens opvreten. Maar dat weet ie dus niet van te voren. Dat is namelijk het volgende probleem: hoe zorg je dat die 'trefkans' groot genoeg is? Ja? Dus dat ie 'm inderdaad tegenkomt. Als ie 'm niet tegenkomt dan heb je hier al dat werk voor niks gedaan. Ja?

Resultaten van de toepassingsvragen

Uit de antwoorden op toepassingsvragen 5 en 6 blijkt dat de meeste leerlingen weten hoe de taken tussen macrofaag en B-cel zijn verdeeld. De meeste leerlingen kennen tevens de belangrijkste kenmerken van een variatie-selectiemechanisme (tabel 4.5.1). Voor een aantal leerlingen kan niet op basis van deze

toepassingsvragen worden vastgesteld of ze over de gewenste kennis beschikken. Op grond van de antwoorden op andere toepassingsvragen en protocolanalyse kan echter worden vastgesteld dat ook deze leerlingen over de gewenste kennis beschikken.

elementen uit de doelstellingen	begrepen	niet vast te stellen
een B-cel kan antigeen alleen herkennen, de macrofaag fagocyteert	13	-
de B-cel krijgt willekeurige combinatie gendelen van de stamcel	11	3
een B-cel draagt één type receptor en produceert één type antistof	10	3
antistoffen worden aangemaakt na binding van een antigeen aan de receptor van de B-cel	14	-

Tabel 4.5.1

Resultaten van de toepassingsvraag 5 (n=14) en toepassingsvraag 6 (n=13)

Analyse van onverwachte resultaten

Drie onverwachte resultaten zullen hier worden besproken en geanalyseerd:

- Groep 2 kiest tijdens de groepsbespreking voor een DNA-brug.
- Leerlingen van groep 1 bedenken tijdens de groepsbespreking een soort genherrangschikkingsmechanisme.
- Enkele leerlingen gaan aan het eind van de klassikale evaluatie opnieuw na of een instructiemechanisme toch niet mogelijk is.

De DNA-brug

Groep 2 kiest tijdens de groepsbespreking voor een onverwachte invulling van het gerichte instructiemechanisme (figuur 4.5.1). Zij weten niet hoe de B-cel informatie kan verkrijgen over de vorm van het antigeen, omdat ze niet komen op het idee van een vervormbare receptor. Ze gaan er vervolgens vanuit dat het DNA van de bacterie wellicht kan worden gebruikt als mal voor de productie van antistoffen (DNA-brug). Wanneer de leerlingen van groep 2 tijdens de klassikale evaluatie van de andere groepjes vernemen dat zij dit probleem eenvoudigweg hebben opgelost met een vervormbare receptor, kiezen ze ook voor deze oplossing.

Een soort genherrangschikkingsmechanisme

Ook de leerlingen van groep 1 ontwikkelen een ander gericht instructiemechanisme dan ik had verwacht (figuur 4.5.1). Zij komen in de groepsbespreking tot de conclusie dat er niet voor alle antistoffen al een code aanwezig kan zijn (protocol 4.5.1b). Zij bedenken een soort genherrangschikkingsmechanisme om dit probleem op te lossen (protocol 4.5.3)

Protocol 4.5.3 Groepsbespreking groep 1

D=docent

JR: Hij kan toch nooit van z'n leven al die codes hebben?

P/A/M:(tegelijk) Nee-éé.

AK: Nee, maar je kunt combinaties maken. Net zoals met T, C, G, en A of zo. En dat ie daar die codes mee kan maken, behalve z'n eigen.

MV: Oh bedoel je het zo.

AK: Ja.

D: Jullie zitten warm. Heel warm.

(gelach)

AK: Snap je?

MV: Ja, ik snap het niet helemaal, want welke kan hij dan niet maken?

AK: Ik bedoel hij heeft verschillende onderdeeljes, zeg maar bouwstenen, waarmee die de code kan maken voor de bijpassende antistof. Maar hij heeft niet de bouwstenen waarmee hij de code kan maken die hij zelf heeft. Snap je?

MV: Ja.

AK: Ja nou 't is heel handig. Het gaat net zo als met, weet je nog wel, met moleculaire erfelijkheid. Dan heb je vier verschillende bouwstenen, A,T,G en C. Nou en dan komt er een bacterie aan en die B-cel ziet dat daar een AAT voor nodig is, zal ik maar zeggen. Z'n eigen cellen hebben allemaal dit, bijvoorbeeld DDD. Hij kan dat niet maken.

MV: Ja, ja. Dat zou kunnen. Maar stel dat dan die eigen cel muteert. Dan krijg je dus bijvoorbeeld AAA.

PB: Maar het risico van mutaties dat zit er gewoon altijd in, ik bedoel welke oplossing je ook bedenkt, dat is altijd.

Leerlingen van groep 1 gaan er dus vanuit dat door combinaties van bouwstenen verschillende DNA-codes kunnen worden gemaakt. Antistoffen tegen lichaamseigen materiaal kunnen niet worden aangemaakt omdat de bouwstenen hiervoor niet aanwezig zijn.

Het mechanisme dat door AK wordt voorgesteld lijkt op het genherrangschikkingsmechanisme dat ik in de lessenserie aan de orde zou willen stellen. Er zijn tenminste twee belangrijke verschillen: (1) Genherrangschikking vindt hier gericht plaats i.p.v. willekeurig; (2) Het DNA voor alle mogelijke combinaties is aanwezig in de B-cel i.p.v. in de stamcel. Het is mogelijk dat het mechanisme van groep 1 zich nog op een ander aspect onderscheidt van het gewenste genherrangschikkingsmechanisme: het niveau waarop de bouwstenen van het DNA worden gecombineerd. Wanneer volgens AK de letters A,T,G,C verwijzen naar nucleotidenbasen, betekent dit dat ze er vanuit gaat dat DNA op het niveau van nucleotiden combineert. Terwijl in werkelijkheid niet afzonderlijke nucleotiden, maar hele ketens van (tenminste 100) nucleotiden worden

gecombineerd. Op grond van de protocollen kan niet eenduidig worden vastgesteld waar de letters naar verwijzen¹. Protocolanalyse heeft me er wel bewust van gemaakt dat leerlingen verschillende opvattingen zouden kunnen hebben over het niveau waarop DNA wordt gecombineerd. In de klassikale evaluatie heeft de docent dit aspect niet geïmpliciteerd, in het vervolg zal hier meer aandacht aan moeten worden besteed.

De onverwachte oplossing van groep 1 leidde er toe dat de klassikale bespreking, over de wijze waarop variatie wordt gegenereerd, anders is verlopen als gepland. Nadat leerlingen hebben onderkend wat het nadeel is van aanmaken van DNA, is het genherschikingsmechanisme van groep 1 besproken. De docent heeft dus niet, zoals gepland, de kledingzaak-analogie aangeboden om leerlingen op het idee van genherschikking te laten komen. Leerlingen van de andere groepen onderkennen dat de oplossing van groep 1 beter is dan aanmaak van DNA, maar voorzien nog wel enkele problemen: er kunnen altijd nog mutaties optreden zodat antistoffen tegen lichaamseigen materiaal worden gemaakt (CL); en wanneer het antigeen van de bacterie zo is opgebouwd dat er een 'D' voor nodig is, kunnen hier geen antistoffen voor worden gemaakt (RH). De docent vertelt hun dat beide problemen kunnen ontstaan, maar moeilijk zijn te voorkomen. Vervolgens geeft hij aan dat een soortgelijk mechanisme ook daadwerkelijk voorkomt en legt het genherschikingsmechanisme uit overeenkomstig het scenario. Daarbij benadrukt de docent dat genherschikking willekeurig plaatsvindt en dat stamcellen over alle gendelen beschikken en slechts één combinatie van gendelen doorgeven aan de B-cel. Uit het vervolg van het onderwijsleerproces en de resultaten van de toepassingsvragen (tabel 4.5.1) blijkt dat de leerlingen deze karakteristieken van het genherschikingsmechanisme ook hebben begrepen.

Enkele leerlingen overwegen opnieuw een instructiemechanisme

Aan het eind van de klassikale evaluatie blijken enkele leerlingen zich opnieuw af te vragen of een instructiemechanisme toch niet mogelijk is (protocol 4.5.4).

¹ Ik acht het echter om twee redenen onwaarschijnlijk dat de letters A,T,G,C volgens AK verwijzen naar nucleotidebasen. Ten eerste zou dit betekenen dat AK van mening is, dat de code voor een antistof slechts bestaat uit drie nucleotiden. Dit lijkt me onwaarschijnlijk, omdat ze weet dat antistoffen eiwitten zijn en waarschijnlijk ook weet dat de code voor een eiwit uit een hele reeks van nucleotiden wordt samengesteld. Ten tweede zou dat betekenen dat ze van mening is, dat de code voor een lichaamseigen antistof ('DDD') uit heel andere nucleotidebasen zou bestaan dan een code voor een antistof voor een ziekteverwekker ('AAT'). Dit lijkt me ook onwaarschijnlijk, omdat AK weet dat het in beide gevallen om eiwitten gaat die slechts andere antigenen kunnen herkennen.

Protocol 4.5.4 Klassikale evaluatie

D=docent

D: Nou ik heb wel een vermoeden, waarom jullie niet op dit idee zijn gekomen.

JT :Het is gewoon hartstikke omslachtig.

D: Het is omslachtig. Waarom is het omslachtig?

JT: Omdat er heel veel misschien voor niks wordt gemaakt.

MV: En als er dan een, zeg maar een heel onbekend antigeen is of zo, een nieuwe weet ik veel wat.. dan word je keiziek.

D: Als er geen antistof tegen kan worden gemaakt word je ziek ja.

PB: Ja als je het niet kan maken, maar misschien kan je dat wel, maar heb je dat op dat moment niet.

D: Ja dat is mogelijk. Het is gewoon.... een loterij, ja. Maar dan moet je je wel voorstellen, dit is een loterij waarbij miljoenen loten per dag worden uitgegeven, dus er zit vaak wel een goed lot bij, maar het blijft een loterij. Het is niet zo, dat van te voren wordt gekeken, hee, deze bacterie komt binnen, dan moet ik dit maken. Zo werkt het niet.

MV: D'r wordt dus helemaal niks afgelezen?

D: D'r wordt niks afgelezen, d'r wordt gewoon gemaakt, en dan hoop je dat je 'm tegenkomt, en als je 'm tegenkomt, dan gaat die dus antistoffen maken.

RH: Is dat toch niet een beetje raar. Want hoe kan je nou van te voren weten dat ie de juiste vorm maakt, de juiste receptor?

D: Dat weet ie niet.

Waarschijnlijk overwegen leerlingen een instructiemechanisme opnieuw, omdat ze enerzijds de nadelen van een selectiemechanisme onderkennen en anderzijds niet overtuigd zijn van de onmogelijkheid van een instructiemechanisme. Leerlingen realiseren zich dat bij een selectiemechanisme de trefkans gering is (protocol 4.5.2) en er veel cellen voor niets worden aangemaakt (protocol 4.5.4). MV wijst bovendien nog op een zwaarwegender nadeel: het is niet zeker of er wel een B-cel ontstaat met de juiste receptor, in dit geval word je 'keiziek' (protocol 4.5.4). Ik had dit nadeel niet verwacht. De docent wilde aangeven dat er elke dag heel veel verschillende B-cellen worden aangemaakt zodat er bijna altijd wel een B-cel met de juiste receptor bij zit. Hij presenteert dit echter in de vorm van een analogie die wellicht niet helemaal duidelijk is voor leerlingen: een loterij waarbij miljoenen loten per dag worden uitgegeven zodat er altijd wel een goed lot bijzit. In ieder geval overtuigt dit leerlingen nog niet helemaal, zoals blijkt uit de reacties van MV en RH.

Leerlingen onderkennen niet alleen de nadelen van een selectiemechanisme, ze zijn waarschijnlijk ook niet overtuigd dat een instructiemechanisme onmogelijk is. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de wijze waarop de docent tijdens de klassikale evaluatie de informatieoverdracht van antigeen naar DNA heeft geproblematiseerd. Hij is hier afgeweken van het scenario. Hij heeft

leerlingen niet gevraagd wat er achtereenvolgens moet gebeuren om het antigeen af te lezen en om te zetten in DNA. Dit is hen verteld. De docent heeft vervolgens geconcludeerd dat informatieoverdracht niet mogelijk is. De cake-analogie die ik had opgenomen in het scenario, naar aanleiding van de resultaten uit de eerste ronde, is niet aangeboden wegens tijdgebrek. De leerlingen hadden ongeveer 10 minuten langer nodig dan gepland om tot een gespecificeerd gericht instructiemechanisme te komen. De docent heeft naar aanleiding van de resultaten van de klassikale evaluatie de cake-analogie alsnog aan de orde gesteld in de klassikale introductie van stap 5. Leerlingen zijn toen echter niet uitgenodigd zelf de verbanden te leggen tussen cake- en antistofproductie. Ik weet dus niet of de cake-analogie de leerlingen alsnog heeft overtuigd.

Conclusie en bijstelling van het scenario

Het onderwijsleerproces is grotendeels verlopen zoals verwacht en de doelstellingen voor deze stap zijn grotendeels gerealiseerd. Enkele onverwachte resultaten geven wel aanleiding tot bijstelling van het scenario.

Ten eerste dient er in het nieuwe scenario ongeveer 20 minuten meer te worden uitgetrokken voor deze stap. Deze tijd is nodig om leerlingen een gespecificeerd gericht instructiemechanisme te laten bedenken, om de informatieoverdracht te bespreken zoals bedoeld en om de hierna voorgestelde wijzigingen van het scenario te kunnen doorvoeren.

Ten tweede dient speciale aandacht te worden besteed aan het niveau waarop genherrangschikking plaatsvindt. Analyse van protocol 4.5.3 heeft me hiervan bewustgemaakt.

Wanneer de docent het genherrangschikkingsmechanisme heeft behandeld kan aan leerlingen worden gevraagd waaruit een gendeel bestaat. Het is mogelijk dat enkele leerlingen nu van mening zijn dat een gendeel bestaat uit een nucleotide². De docent kan dit op twee manieren problematiseren. De docent kan de leerling vragen of met drie nucleotiden een eiwit kan worden gecodeerd. De leerlingen zullen zich dan waarschijnlijk realiseren dat met een combinatie van drie nucleotiden slechts een aminozuur kan worden gecodeerd. De docent kan echter ook de leerlingen vragen wat het nadeel zou zijn van een genherrangschikkingsmechanisme waarbij een gen wordt samengesteld uit vele afzonderlijke nucleotiden. Ik verwacht dat leerlingen zich dan zullen realiseren dat in dit geval dezelfde problemen zich voordoen als bij DNA-aanmaak. Er kunnen dan ook codes voor lichaamseigen antistoffen en andere typen eiwitten ontstaan. Leerlingen kan vervolgens worden gevraagd waarom dit probleem zich niet voordoet als een gen wordt samengesteld uit enkele ketens van nucleotiden.

2 In dit scenario zijn de letters A, B en C gebruikt om de gendelen mee aan te duiden. Omdat A en C ook verwijzen naar een nucleotidabase kan in het vervolg beter een andere set letters worden gekozen (bijvoorbeeld X, Y, Z).

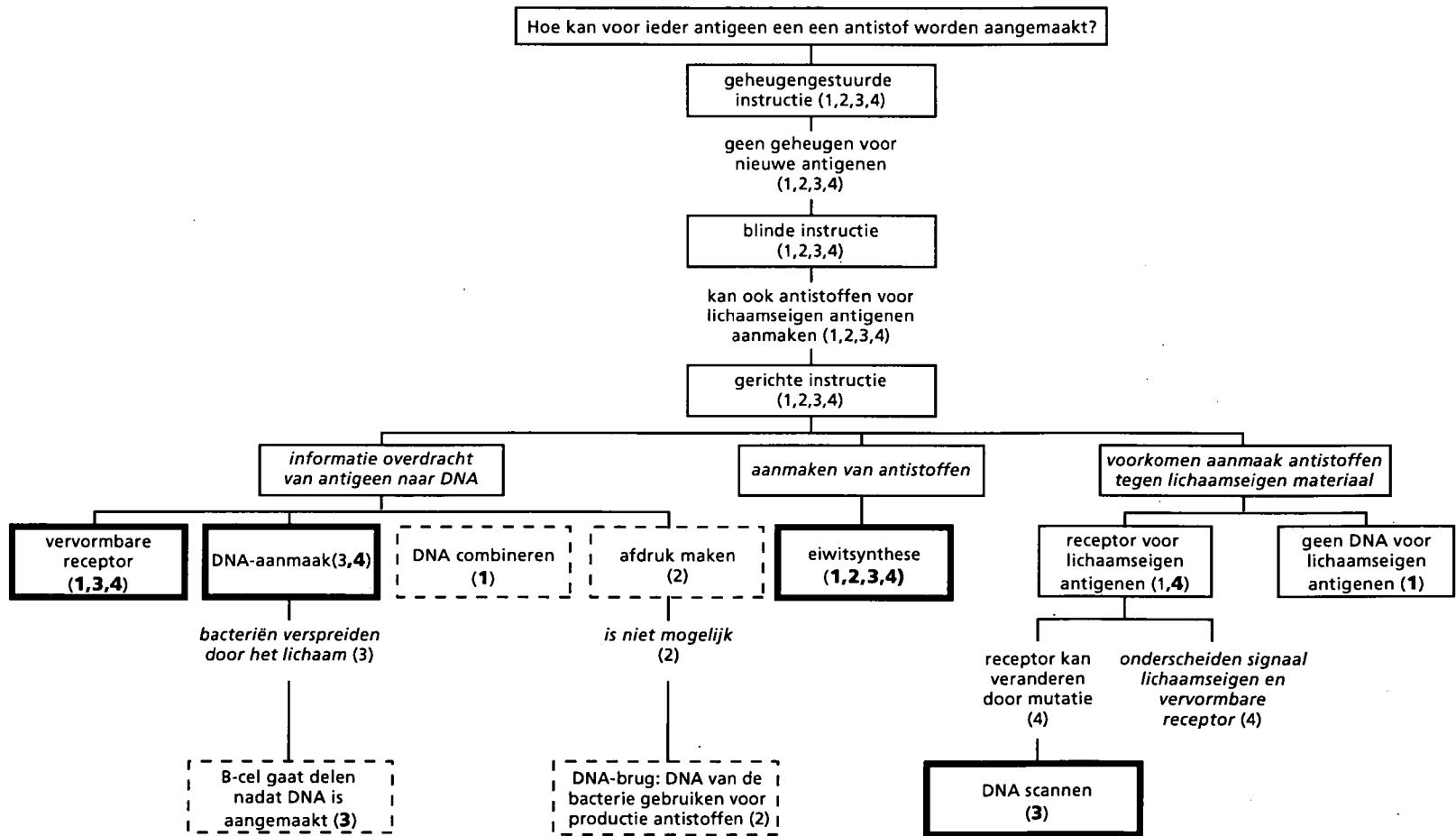
Tenslotte zal ook de laatste fase van de klassikale evaluatie moeten worden uitgebreid. Zowel uit de eerste als tweede ronde blijkt dat, wanneer het genherangschikkingsmechanisme aan de orde is gesteld, leerlingen zich (opnieuw) bewust worden van de nadelen van een selectiemechanisme. Dit leidt vervolgens tot een heroverweging van een instructiemechanisme. Ik houd er voortaan rekening mee dat leerlingen tenminste de volgende drie nadelen zullen onderkennen:

- de B-cel met juiste receptor ontstaat niet;
- de B-cel met juiste receptor ontmoet het antigeen niet (trefkans);
- er worden veel B-cellen voor niets aangemaakt (verspilling).

Ik verwacht dat leerlingen het eerste nadeel het meest zwaarwegend vinden. Het is dan ook van belang dat leerlingen wordt verteld dat er vele miljoenen verschillende B-cellen per dag worden aangemaakt, zodat de kans groot is dat er een goede bij zit. Nadeel hiervan is dan wel dat er nog meer cellen voor niets worden aangemaakt. Hoewel de trefkans hierdoor wat groter wordt, blijft deze gering. Dit laatste probleem wordt in de volgende stap aan de orde gesteld.

Ik verwacht dat wanneer de informatieoverdracht van antigeen naar DNA middels de cake-analogie is geproblematiseerd, de meeste leerlingen niet opnieuw een instructiemechanisme zullen overwegen. Mochten leerlingen toch nog twijfelen over de onmogelijkheid van een instructiemechanisme dan kunnen eerder genoemde theoretische argumenten worden aangevuld met empirische argumenten, waaruit blijkt dat B-cellen antistoffen genereren middels een selectiemechanisme. Nu zal het veelal niet mogelijk zijn leerlingen een selectiehypothese en een instructiehypothese empirisch te laten toetsen. Het is echter wel mogelijk leerlingen uit te nodigen voorspellingen voor beide hypothesen op te stellen. De docent kan deze voorspellingen dan confronteren met resultaten uit empirisch onderzoek. Een instructiehypothese voorspelt bijvoorbeeld dat een B-cel meerdere typen receptoren kan aanmaken en dat B-cellen met bepaalde receptoren alleen aanwezig kunnen zijn, wanneer het organisme ooit met het corresponderende antigeen in aanraking is geweest. Een selectiehypothese voorspelt daarentegen dat een B-cel maar één type receptoren draagt³ en dat er B-cellen met bepaalde receptoren aanwezig kunnen zijn zonder dat het organisme ooit met het corresponderende antigeen is geconfronteerd.

³ In Nossal & Lederberg (1958) worden de opzet en de resultaten van een experiment beschreven waarmee deze voorspelling is getoetst.



Figuur 4.5.1

Oplossingen en nadelen die tijdens de groepsbespreking van stap 4 zijn besproken

4.6 Stap 5

In deze stap hebben leerlingen nagegaan hoe de trefkans tussen een B-cel met de juiste receptor en een ziekteverwekker kan worden vergroot.

Resultaten samengevat

Het onderwijsleerproces is grotendeels verlopen zoals verwacht. De meeste groepjes komen in de groepsbespreking tot een mechanisme waarin vier deelfuncties worden vervuld: circuleren, concentreren, delen en signaleren (figuur 4.6.1). Groep 2 komt echter niet op signaleren. De groepjes weten ook waarom de deelfuncties moeten worden vervuld. Het bleek echter niet nodig leerlingen daar expliciet naar te vragen. In de klassikale evaluatie verliep de inventarisatie van de afzonderlijke deelfuncties en de bespreking van het complete mechanisme zoals gepland. Enkele leerlingen geven aan, zoals verwacht, welke rol stamcellen en macrofagen vervullen in het mechanisme. Bij de bespreking van het nadeel van het mechanisme geeft een leerling aan dat het niet geschikt is voor de herkenning van virusgeïnfekteerde cellen. In tegenstelling tot gepland heeft de docent het andere nadeel, de onmogelijkheid van fagocytose, zelf verteld.

De doelstellingen voor deze stap zijn grotendeels gerealiseerd. De leerlingen weten dat de trefkans tussen een B-cel met de juiste receptor en de ziekteverwekker moet worden vergroot. De leerlingen kennen ook de onderdelen van het mechanisme dat deze functie vervult. Voor enkele leerlingen kan echter niet met zekerheid worden vastgesteld of ze weten dat klonering van B-cellen in de lymfeklieren plaatsvindt. De leerlingen kunnen voor de deelfuncties aangeven waarom ze moeten worden vervuld. Uit de resultaten van stap 6 blijkt dat leerlingen de nadelen van het mechanisme ook kennen. Ze weten dat virusgeïnfekteerde cellen niet kunnen worden herkend en gefagocyteerd.

Illustratie van verwachte resultaten

Illustratie van het onderwijsleerproces

Het verloop van de groepsbespreking en van onderdelen uit het verloop van de klassikale evaluatie wordt hier geïllustreerd. De meeste groepjes komen tijdens de groepsbespreking tot een mechanisme waarin vier deelfuncties worden vervuld (figuur 4.6.1). Het ontwerpproces van groep 4 illustreert dit. Protocol 4.6.1a laat zien dat leerlingen zich realiseren dat B-cellen moeten circuleren.

Protocol 4.6.1a Groepsbespreking groep 4

PS: Ja ik weet het niet, ik dacht misschien, sneller door het lichaam gaan of zo.

JA: Maar hoe gaan ze door het lichaam?

PS: Ja dat zou ik verder ook niet weten, ik weet het niet.

NR: Door de zwaartekracht.

JD: Door de bloedbaan. Gewoon, zorg dat ie overal komt.

JA: Met de bloedbaan mee laten circuleren. Bloed zit bijna overal. Ben je het daar mee eens?

NR: Ja.

JD: Hij blijft dan nog... De kans blijft dan nog steeds klein, want stel dat er zeg, een B4 (F.J: een B-cel met een receptor voor een bepaald type antigeen) gemaakt wordt, dan gaat die door de hele bloedbaan, dan is die kans nog veeeeeeel kleiner.

De leerlingen denken eerst aan het circuleren van B-cellen door de bloedbaan. Zij komen vervolgens op het idee dat B-cellen (voor het contact met het antigeen) kunnen delen. Protocol 4.6.1b laat zien dat een leerling nog twijfelt of de trefkans dan voldoende groot is.

Protocol 4.6.1b Vervolg groepsbespreking groep 4

JD: Alleen de kans is vrij klein nog. Want hij kan wel 100 keer rondgaan, terwijl die hem nog niet tegenkomt.

NR: Ja, maar je bent met miljoenen. Als er miljoenen zijn dan zal er heus wel een hem tegenkomen.

JA: Ja, er worden er gewoon miljoenen aangemaakt. Je moet je gewoon voorstellen dat er in elk adertje, elk haarvatje, dat ze daar allemaal een keer langskomen. Om de zoveel tijd. Anders kun je wel bezig blijven, er blijft natuurlijk altijd wel een probleempje.

NR: Ik denk dat er elke dag wel zo'n ding overal langskomt hoor.

JA: Ja en zo'n bacterie kan ook wel heééééel eventjes blijven zitten voordat je er aan doodgaat.

JD acht de trefkans dus nog vrij klein. NR en JA zijn echter van mening dat de trefkans voldoende groot is. Enige tijd later bezoekt de docent het groepje en vraag welke oplossing ze hebben bedacht. NR formuleert de oplossing en JD formuleert als nadeel dat de trefkans dan nog gering is. Wanneer de docent hen vervolgens vraagt hoe de trefkans verder kan worden vergroot, komen leerlingen uiteindelijk ook op concentreren van B-cellen en het uitscheiden van signaalstoffen (protocol 4.6.1c).

Protocol 4.6.1c Vervolg groepsbespreking groep 4

D=docent

JD: Dan is de trefkans nog zeer beperkt.

D: Ja. Dus zijn er nog additionele, extra dingen die de trefkans nog verder kunnen verhogen?

JD: Zie je, dat zei ik toch. Dit is niet genoeg.

JA: Additionele dingen, dus dat is wel een deel van de oplossing.

JD: Ja, hoor.

PS: Deel 1.

JA: Misschien zodra er een wond is dat al die beesten zich op een bepaalde plek laten concentre-

ren. Zodra er een wond is.

JD: Hoe weten ze dat er een wond is?

PS: Nou waarschijnlijk als je cellen beschadigen. Is het niet zo dat als de zaak kapot gaat dat een stof wordt uitgescheiden, een soort signaaltje.

JA: Ja heel goed joh.

JD: Maar niet elke bacterie komt via een wond binnen. Dat is ook weer een probleem.

PS: En ik zit ook te denken. Als het (F.J: signaalstof) in de bloedbaan komt, dan zit de stof ook meteen in je hele lichaam, dus dat schiet niet op he. Dat schiet niet op.

Leerlingen voegen dus aan circuleren en delen, concentreren en signaleren toe. Bovendien voorzien ze nog twee problemen. JD realiseert zich dat niet elke bacterie via een wond binnenkomt. Dit probleem lossen de leerlingen later op door de B-cellen op verschillende plekken te concentreren. PS realiseert zich dat als signaalstoffen in de bloedbaan komen, B-cellen dan ook niet meer weten waar ze moeten zijn. Dit probleem wordt niet meer opgelost.

In de eerste fase van de klassikale evaluatie zijn de afzonderlijke deelfuncties geïnventariseerd en is aanvullende kennis aangeboden. Vervolgens is het complete mechanisme besproken. Beide fasen zijn verlopen zoals verwacht. In de derde fase van de klassikale evaluatie onderkent een leerling ook een nadeel van het mechanisme. Protocol 4.6.2 laat zien hoe een leerling zich realiseert dat herkenning van een virusgeïnfecteerde cel niet mogelijk is.

Protocol 4.6.2 Klassikale evaluatie

D=docent

D: We hebben nu een prachtig systeem met B-cellen en macrofagen, zit daar nu nog een nadeel aan?

PB: Daar kun je geen virus mee aan.

D: En waarom kun je daar geen virus mee aan?

PB: Omdat die in de cel zitten.

D: En waarom kun je dan met een B-cel en een macrofaag geen virus in een cel aan?

PB: Omdat het een eigen cel is.

D: Ja. En als het een vreemde cel is, zou je hem dan aankunnen?

PB: Daar zit ie niet in.

JR: Er zit geen vreemd antigeen op.

D: Dat is het ja. En waarom is dat belangrijk dat er een vreemd antigeen is?

JR: Anders kun je er niet op reageren, dan heb je er geen receptoren voor.

Resultaten van de toepassingsvragen

De docent heeft toepassingsvraag 7 vergeten uit te delen. Hierdoor kan niet middels deze toepassingsvraag worden nagegaan of leerlingen zich realiseren dat klonering van B-cellen plaatsvindt in de lymfeklieren. De antwoorden op toepassingsvraag 8 (tabel 4.6.1.) en toepassingsvraag 11 (tabel 4.7.1), geven

hier echter ook informatie over. Zeven leerlingen geven expliciet aan dat klonering van B-cellen in de lymfeklieren plaatsvindt. Voor de overige leerlingen kan niet met zekerheid worden vastgesteld of ze dit aspect van de doelstelling begrijpen¹.

Uit de antwoorden van toepassingsvraag 8 blijkt dat alle leerlingen aspecten van het genherrangschikkingsmechanisme begrijpen (tabel 4.6.1). Niet alle leerlingen noemen echter als voorwaarde dat de B-cel eerst in contact moet komen met het antigeen om antistoffen te kunnen produceren. Uit protocolanalyse en de antwoorden op toepassingsvraag 5 en 6 blijkt echter dat alle leerlingen wel weten dat aan deze voorwaarde moet worden voldaan. Ook hebben enkele leerlingen niet aangegeven dat klonering moet plaatsvinden in de lymfeklieren. Zoals hierboven is vermeld kan niet voor alle leerlingen worden vastgesteld dat ze dit aspect hebben begrepen.

voorwaarden	frequentie
in stamcellen moeten de benodigde gensegmenten aanwezig zijn	12
middels genherrangschikking moet toevallig het gen voor de betreffende receptor worden samengesteld	12
een B-cel met de juiste receptor moet in contact komen met het antigeen	6
selectieve klonering moet plaatsvinden in de lymfeklieren	5

Tabel 4.6.1

Antwoorden op toepassingsvraag 8 (n=12). Voorwaarden waaraan moet worden voldaan wil een kind antistoffen kunnen vormen. Weergegeven is het aantal leerlingen dat een voorwaarde heeft genoemd.

Analyse van onverwachte resultaten

De volgende onverwachte resultaten worden hieronder besproken en geanalyseerd:

- Groep 2 komt niet op de deelfunctie signaleren.
- De onmogelijkheid om virusgeïnfecteerde cellen te fagocyteren is niet door de leerlingen zelf aangegeven.

¹ Ik heb hier wel indirecte aanwijzingen voor. De leerlingen die niet expliciet hebben vermeld dat klonering van B-cellen in de lymfeklieren plaatsvindt, geven wel aan bij toepassingsvraag 11 (tabel 4.7.1) dat klonering van Tkiller-cellen in de lymfeklieren plaatsvindt. Bovendien is toepassingsvraag 8 in de eerste ronde door de meeste leerlingen goed beantwoord (n=12). Tien leerlingen gaven toen expliciet aan dat klonering van B-cellen in de lymfeklieren plaatsvindt.

Signaleren wordt niet bedacht

Groep 2 komt niet op de deelfunctie signaleren. Ze realiseren zich wel dat de ziekteverwekker moet worden opgespoord. Ze lossen dit probleem echter op door concentratie van cellen op de plekken waar de bacteriën binnenkomen. Later in de groepsbespreking realiseren ze zich dat niet van te voren kan worden bepaald waar de bacteriën binnenkomen, ze gaan er echter vanuit dat het circuleren van B-cellen voldoende is om dit probleem op te lossen. Wanneer in de klassikale evaluatie een leerling van een ander groepje signaleerstoffen noemt, vraagt de docent aan groep 2 waarom deze stoffen van belang zouden kunnen zijn. De leerlingen blijken dan het belang hiervan te onderkennen.

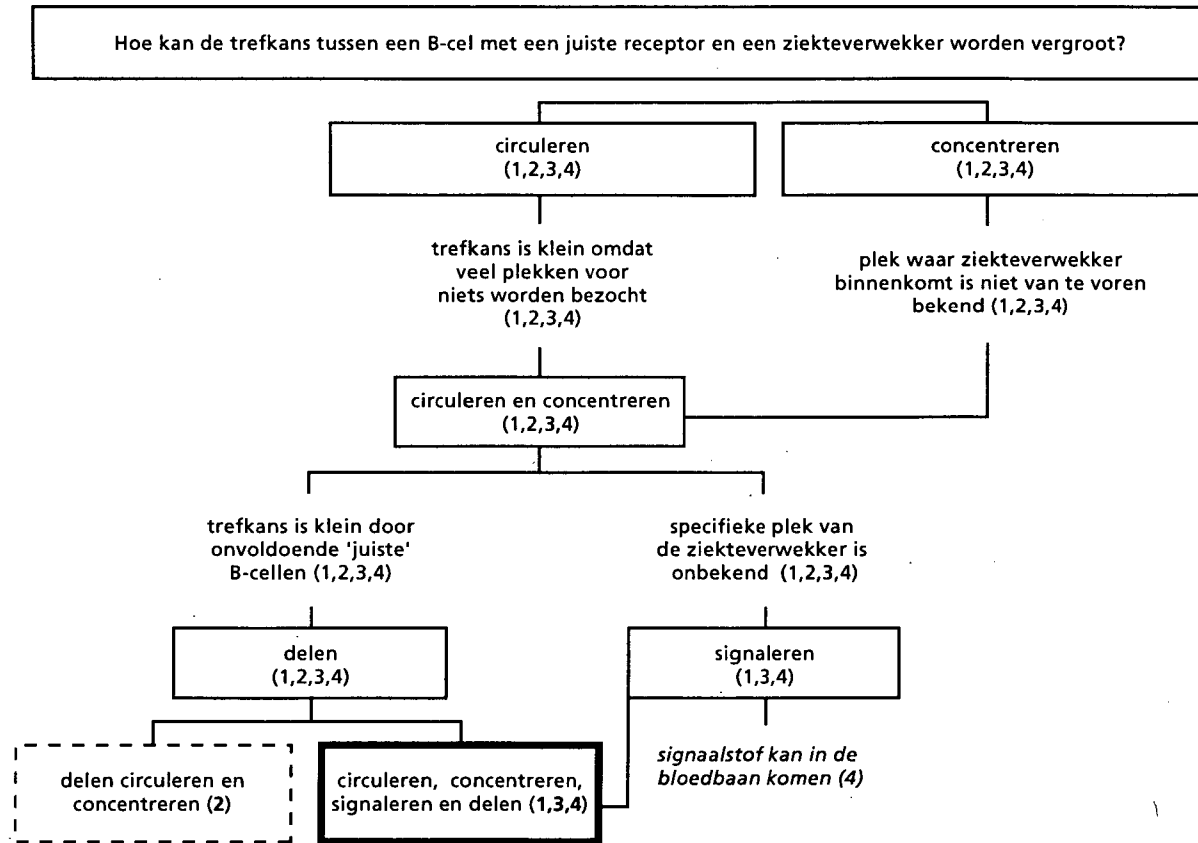
Een nadeel wordt niet door leerlingen aangegeven

Leerlingen lijken zich wel te realiseren dat met het ontwikkelde systeem een virusgeïnfecteerde cel niet kan worden herkend (protocol 4.6.2.). Leerlingen komen echter niet op het idee dat virusgeïnfecteerde cellen ook niet kunnen worden gefagocyteerd. De docent heeft de leerlingen vervolgens met behulp van een tekening uitgelegd waarom fagocytose van een geïnfecteerde cel niet mogelijk is. In de tekening was een rij cellen afgebeeld die nauw aan elkaar aansluiten en waarin de middelste cel is geïnfecteerd. De docent had beter de leerlingen zelf dit probleem kunnen laten formuleren aan de hand van de tekening. Uit de resultaten van stap 6 blijkt dat leerlingen zich realiseren dat fagocytose van een virusgeïnfecteerde cel niet mogelijk is.

Ik verwacht dat leerlingen dit nadeel zelf hadden onderkend als stap 2 was uitgevoerd zoals gepland. Daar heeft de docent echter vergeten te vragen of een eetcel geschikt is voor het onschadelijk maken van virusgeïnfecteerde cellen (4.3). Ik acht het dan ook niet noodzakelijk dat het scenario van deze stap op dit punt wordt bijgesteld.

Conclusie en bijstelling van het scenario

Het onderwijsleerproces is grotendeels verlopen zoals verwacht en de doelstellingen zijn grotendeels gerealiseerd. De onverwachte resultaten geven geen aanleiding tot bijstelling van het scenario.



Figuur 4.6.1

Oplossingen en nadelen die tijdens de groepsbespreking van stap 5 zijn besproken

4.7 Stap 6

In deze stap hebben leerlingen nagegaan hoe virusgeïnfecteerde cellen kunnen worden herkend en onschadelijk gemaakt.

Resultaten samengevat

Het onderwijsleerproces is niet geheel verlopen zoals verwacht. Omdat stap 4 langer heeft geduurd was er minder tijd beschikbaar voor stap 6. Hierdoor heeft de docent bepaalde onderdelen anders uitgevoerd dan gepland en hadden leerlingen in de groepsbespreking maar enkele minuten de tijd om oplossingen en nadelen te bedenken. In de klassikale introductie is leerlingen gevraagd, zoals gepland, waarom geïnfecteerde cellen onschadelijk moeten worden gemaakt. Leerlingen realiseren zich ook waarom dit nodig is. In de klassikale introductie is echter niet behandeld dat de aanwezigheid van veel virussen niet aan de buitenkant van de cel waarneembaar is en dat herkenning dus problematisch is. Tijdens de groepsbespreking kiest geen enkel groepje het verwachte mechanisme (figuur 4.7.1). Groep 1 gaat er vanuit dat de aanwezigheid van een virus aan de buitenkant waarneembaar is. Volgens de groepjes 2, 3 en 4 kunnen geïnfecteerde cellen middels signaalstoffen worden herkend. Alle groepjes kiezen voor onschadelijk maken middels leegzuigen. De docent heeft de leerlingen niet gevraagd, zoals gepland, hoe de alternatieve oplossingen kunnen worden gerealiseerd. In de klassikale evaluatie is niet met alle onverwachte oplossingen adequaat omgegaan. Het mechanisme van herkenning en onschadelijk maken door Tkiller-cellen is behandeld zoals gepland. De docent heeft vervolgens leerlingen gevraagd waarom specifieke receptoren nodig zijn, maar hij heeft leerlingen niet zelf de consequenties van specifieke herkenning laten bedenken. De wijze waarop een Tkiller-cel viraal antigeen naar lymfeklieren transporteert is niet besproken.

De doelstellingen voor deze stap zijn grotendeels gerealiseerd. De leerlingen weten dat virus-geïnfecteerde cellen moeten worden herkend en onschadelijk gemaakt en weten ook waarom dit nodig is. De leerlingen weten ook hoe Tkiller-cellen deze functie vervullen. Slechts één leerling weet dat een Tkiller-cel alleen vrijgekomen virus kan transporteren naar de lymfeklier. Alle leerlingen weten hoe en waarom Tkiller-cellen bij het onschadelijk maken van geïnfecteerde cellen worden geassisteerd door B-cellen en macrofagen. De leerlingen realiseren zich waarschijnlijk wel waarom het betreffende mechanisme de functie beter vervult dan enkele alternatieven die ze hebben overwogen. De leerlingen weten echter waarschijnlijk niet waarom herkenning middels MHC en specifieke receptoren beter is dan een signaalstof.

Illustratie van verwachte resultaten

Illustratie van het onderwijsleerproces

Onderdelen uit het verloop van de klassikale introductie en de groepsbespreking worden hieronder geïllustreerd. De klassikale introductie is gedeeltelijk verlopen zoals verwacht. Protocol 4.7.1 laat zien dat twee leerlingen zich realiseren waarom een geïnfecteerde cel onschadelijk moet worden gemaakt.

Protocol 4.7.1 Klassikale introductie

D = docent

D: Waarom hebben we eigenlijk een aparte cel nodig die dit oplost? Kunnen we niet gewoon zeggen: Nou, dat virus komt hierin, die vermenigvuldigt zich, op een gegeven moment knapt die cel weer en komen de virus-sen vrij, en als ze vrij komen, wat kan er dan gebeuren?

JT: an kunnen ze in de volgende cel gaan zitten.

D: Dat is een nadeel, ze gaan in de volgende cel zitten. Maar als ze vrij komen kunnen ze dan wel worden aangepakt?

JT: Ja, want dan kan dit hele systeem ze gewoon aanpakken. Dan kunnen er antistoffen worden gemaakt en die macrofaag kan dan zo'n antistof plus virus opvreten.

D: Dus als ze al vrijkomen heb je geen probleem? Waarom moet je er dan toch iets mee doen, met deze cel?

JT: Ja, om ze niet te laten vermenigvuldigen.

D: Precies.

MV: Ja anders verspreidt het zich toch.

D: Ja, anders is het vechten tegen de bierkaai.

JT realiseert zich dat vrijgekomen virussen door antistoffen en een macrofaag onschadelijk kunnen worden gemaakt. Ze onderkent echter ook dat een geïnfecteerde cel snel onschadelijk moet worden gemaakt omdat de virussen zich anders al vermeerderd hebben en in de 'volgende cel' kunnen gaan zitten. MV bevestigt dit.

Tijdens de groepsbesprekingen komt geen enkel groepje op het mechanisme dat ik had verwacht. Wel overwegen de groepjes de meeste alternatieve oplossingen die ik had verwacht (figuur 4.7.1). Met enkele fragmenten uit de groepsbespreking van groep 1 wordt dit geïllustreerd. Leerlingen bespreken eerst oplossingen voor het herkenningsprobleem (protocol 4.7.2a).

Protocol 4.7.2a Groepsbespreking groep 1

MV: Zeg het maar, iemand.

PB: Nou zullen we eerst effe herkenning doen?

MV: Nou, ik heb als oplossing dat de cel waarin de virus inzit, dat die seintjes uitgeeft.

PB: Red light leieieh.

- MV: Dat was toch net ook bij die bacterie, daar kon die beschadigde cel ook een lokstof uitscheiden.
- PB: Dus dan wordt ie door die seintjes herkend.
- AK: Ja, dat zou wel eens kunnen ja. Ja dat heb ik eigenlijk ook.
- JR: Ja, maar ik denk dat die cel niet in staat is seintjes uit te zenden, omdat er bepaalde handelingen gewoon niet meer kunnen worden gedaan door die cel, ik denk dat die cel wordt herkend door een andere cel, hoe weet ik niet.
- PB: Ja, ik denk dus dat ie dan gewoon wordt herkend doordat die gastheercel niet meer er uit ziet zoals die er uit zou moeten zien.
- JR: Ja dat bedoel ik.
- AK: Het virus moet toch ook in de cel kruipen. Was het dan niet zo dat die dan z'n jasje achterlaat. Daar kunnen dan weer antistoffen tegen worden gemaakt.
- MV: Ja misschien is het wel een combinatie van die twee.

MV denkt eerst aan een soort signaalstof. PB en AK zijn het daar in eerste instantie mee eens. JR vraagt zich vervolgens af of een geïnfecteerde cel nog wel signalen kan uitzenden. Dit brengt PB en MV op het idee dat wellicht de cel toch kan worden herkend door verandering van het celmembraan of omdat de eiwitmantel van het virus op de cel achterblijft. Men denkt vervolgens nog kort na over de wijze waarop een geïnfecteerde cel onschadelijk kan worden gemaakt (protocol 4.7.2b).

Protocol 4.7.2b Vervolg groepsbespreking groep 1

- AK: Misschien kan hij dan worden vernietigd door dat zelfvernietigingssysteem.
- JR: Ja, maar dan krijg je dadelijk zo'n weggeslagen lip.
- AK: Je kunt hem ook leegzuigen.
- PB: Slluuuurppp.
- JR: Misschien.

Het zelfvernietigingssysteem is in stap 2 al door JR voorgesteld (figuur 4.3.1). JR verwerpt nu zelf het zelfvernietigingssysteem omdat hij verwacht dat dit te gevaarlijk is. AK stelt vervolgens leegzuigen voor. De leerlingen krijgen niet meer de tijd deze oplossing verder te verkennen omdat de les is afgelopen.

Resultaten van de toepassingsvragen

Omdat stap 4 is uitgelopen vond de klassikale evaluatie van deze stap plaats in de laatste les van de lessenserie, waarin ook de eindtoets is afgenomen. Toepassingsvraag 9 en 10 zijn daarom niet uitgedeeld. Uit de antwoorden op toepassingsvraag 11, die in de eindtoets was opgenomen, blijkt echter dat alle leerlingen weten hoe Tkiller-cellen geïnfecteerde cellen herkennen en onschadelijk maken (tabel 4.7.1). De leerlingen realiseren zich dat B-cellen en macro-

gebeurtenissen	frequentie
vrijgekomen virus wordt door Tkiller-cel (of B-cel) vervoerd naar de lymfeklier	1
in de lymfeklier vindt selectieve klonering van Tkiller-cellen plaats	13
een kloon van Tkiller-cellen verhuist naar de plek van de infectie	13
presentatie van viraal antigeen door MHC-moleculen	13
de Tkiller-cel prikt de geïnfecteerde cel lek	13
vrijgekomen virus wordt door B-cel vervoerd naar een lymfeklier	3
selectieve klonering van de B-cel in de lymfeklier	3
een kloon B-cellen en antistoffen gaan via circulatie naar plek van infectie	3
antistof kan binden aan vrijgekomen virus	13
een macrofaag kan een antistof-antigeen complex herkennen en fagocyteren	13

Tabel 4.7.1

Resultaten van toepassingsvraag 11 (n=13). De leerlingen is gevraagd wat er achtereenvolgens moet gebeuren om een persoon van een koortslip af te helpen. In de tabel staan de gebeurtenissen vermeld die achtereenvolgens moeten plaatsvinden en het aantal leerlingen dat deze gebeurtenissen heeft vermeld.

fagen een belangrijke rol spelen bij het onschadelijk maken van vrijgekomen virussen. Slechts drie leerlingen formuleren stapsgewijs hoe B-cellen antistoffen aanmaken¹. Slechts één leerling realiseert zich dat een Tkiller-cel alleen vrijgekomen virus naar de lymfeklieren kan transporteren. De andere leerlingen gaan er vanuit dat een Tkiller-cel viraal antigeen, dat door MHC wordt gepresenteerd meeneemt naar de lymfeklieren.

Uit de antwoorden op toepassingsvraag 12 blijkt dat de leerlingen met eerder verworven kennis kunnen verklaren waarom er B- en Tkiller-cellen in actie kunnen komen tegen lichaamseigen materiaal. Leerlingen blijken tevens een beargumenteerde keuze te kunnen maken tussen twee oplossingen voor dit probleem. Alle leerlingen realiseren zich dat B- en Tkiller-cellen kunnen ontstaan die gericht zijn tegen lichaamseigen cellen, door mutaties in B- of

¹ De andere leerlingen beschrijven alleen dat B-cellen antistoffen aanmaken, maar niet hoe ze dat doen. Op grond van deze antwoorden kan niet worden geconcludeerd dat deze leerlingen niet weten dat klonale selectie van B-cellen in de lymfeklieren plaatsvinden. Het is mogelijk dat deze leerlingen het proces van antistofproductie verkort hebben opgeschreven. Hier zijn aanwijzingen voor omdat vier van deze leerlingen in toepassingsvraag 8 wel aangeven dat klonale selectie van B-cellen in de lymfeklieren plaatsvindt (tabel 4.6.1).

Tkiller-cellen, of door mutaties in de lichaamseigen cellen. Twee leerlingen geven daarbij tevens aan dat dit probleem kan ontstaan door mutaties in de stamcellen. Tien leerlingen kiezen voor een helper-cel om te voorkomen dat B-cellen en Tkiller-cellen met receptoren voor lichaamseigen materiaal in actie komen. Zij realiseren zich dat een helper-cel vertragend kan werken, maar kiezen toch voor de helper-cel omdat ze deze veiliger vinden dan een suppressor-cel. Drie leerlingen onderkennen de nadelen van beide cellen, maar kiezen toch voor een suppressor-cel. Zij schatten in dat het hoogst zelden zal voorkomen dat er B- of Tkiller-cellen ontstaan met receptoren voor lichaamseigen materiaal en dat tegelijkertijd een suppressor-cel afwezig is.

Analyse van onverwachte resultaten

De volgende onverwachte resultaten worden hieronder besproken en geanalyseerd:

- De leerlingen van groep 1 gaan er vanuit dat de aanwezigheid van het virus aan de buitenkant van de geïnfecteerde cel waarneembaar is.
- Geen enkel groepje komt tijdens de groepsbespreking tot het gewenste mechanisme.
- De meeste leerlingen weten niet dat een Tkiller-cel alleen vrijgekomen virus kan transporteren naar de lymfeklieren.

Aanwezigheid virus aan buitenkant virusgeïnfecteerde cel waarneembaar

Leerlingen van groep 1 zijn van mening dat het virus zijn aanwezigheid in de geïnfecteerde cel verradt doordat het zijn eiwitmantel achterlaat of door verandering van het celmembraan (protocol 4.7.2a). Ik had dit in deze ronde niet verwacht omdat in de klassikale introductie al zou zijn aangegeven dat een dergelijke wijze van herkenning bij de meeste virussen niet mogelijk is. In de klassikale introductie heeft de docent dit echter niet aan de orde gesteld. In de klassikale evaluatie heeft hij dit alsnog gedaan. Hij heeft aangegeven dat beide herkenningsmechanismen die groep 1 voorstelt ook werkelijk voorkomen. Vervolgens heeft hij de leerlingen verteld dat veel virussen geen eiwitmantels achterlaten of geen verandering van het celmembraan veroorzaken. Deze virussen moeten dus op een andere manier worden herkend. De docent heeft vervolgens herkenning middels signaalstoffen van de andere groepjes besproken.

Het verwachte mechanisme wordt niet gekozen

Geen enkel groepje komt tijdens de groepsbespreking tot het verwachte mechanisme. Leerlingen kiezen voor een andere wijze van zowel herkennen als van onschadelijk maken (figuur 4.7.1). Het herkenningsmechanisme van groep 1 is hierboven besproken. Groep 2,3 en 4 denken aan herkenning middels een signaalstof. Deze groepjes overwegen ook herkenning van DNA van het virus.

Ze verwerpen deze oplossing echter al na enige overweging, omdat ze van mening zijn dat dit waarschijnlijk niet mogelijk is. Van signaalstoffen gaan ze echter niet na hoe dit kan worden gerealiseerd. Hiervoor ontbrak de tijd. Leerlingen hadden maar zes minuten om hun oplossingen voor het ontwerp-probleem te bespreken en te bediscussiëren. De docent heeft daarom ook niet, zoals gepland, doorgevraagd naar hoe herkenning middels signaalstoffen werkt. Leerlingen realiseren zich dus niet waarom een signaalstof niet mogelijk en nodig is. Een signaalstof veronderstelt eerst specifieke herkenning van delen van het virus. Specifieke herkenning kan echter niet in de cel plaatsvinden.

In de klassikale evaluatie is de herkenning middels signaalstoffen wel besproken, maar niet verworpen om bovengenoemde redenen. De docent geeft aan dat er inderdaad een soort signaal wordt afgegeven door zogenaamde MHC-moleculen, zij kunnen namelijk viraal antigeen presenteren aan de buitenkant van de cel. De docent vertelt vervolgens dat dit MHC-antigeencomplex middels specifieke receptoren kan worden herkend. Hiermee wordt een signaalstof ten onrechte gelijkgesteld aan herkenning middels MHC en specifieke receptoren. De docent gaat later nog wel in op het belang van specifieke herkenning, maar brengt dit niet meer in verband met de signaalstoffen.

Ook bij het onschadelijk maken van een geïnfecteerde cel zijn leerlingen op een ander mechanisme uit gekomen dan ik had verwacht. Alle groepjes gaan er vanuit dat de geïnfecteerde cel, nadat hij is herkend, wordt leeggezogen. Groep 1 overweegt eerst nog zelfvernietiging (protocol 4.7.2b); de andere groepjes overwegen geen alternatieven. Ook hier hebben leerlingen door tijdgebrek niet nagegaan hoe deze oplossing kan worden gerealiseerd en heeft de docent hun hier niet naar gevraagd.

In de klassikale evaluatie heeft de docent leerlingen niet zelf laten bedenken waarom leegzuigen niet mogelijk is. Hij heeft ze dit verteld. Vervolgens heeft hij aangegeven dat de eerste fase van leegzuigen wel voorkomt. Immers voordat je iets leegzuigt moet een gat worden gemaakt: Tkiller-cellen zijn in staat een geïnfecteerde cel lek te prikken. Hoewel leerlingen niet zelf hebben onderkend dat leegzuigen onmogelijk is, verwacht ik dat ze nu wel begrijpen waarom lekpijken de voorkeur verdient.

Transport van viraal antigeen dat door MHC is gepresenteerd

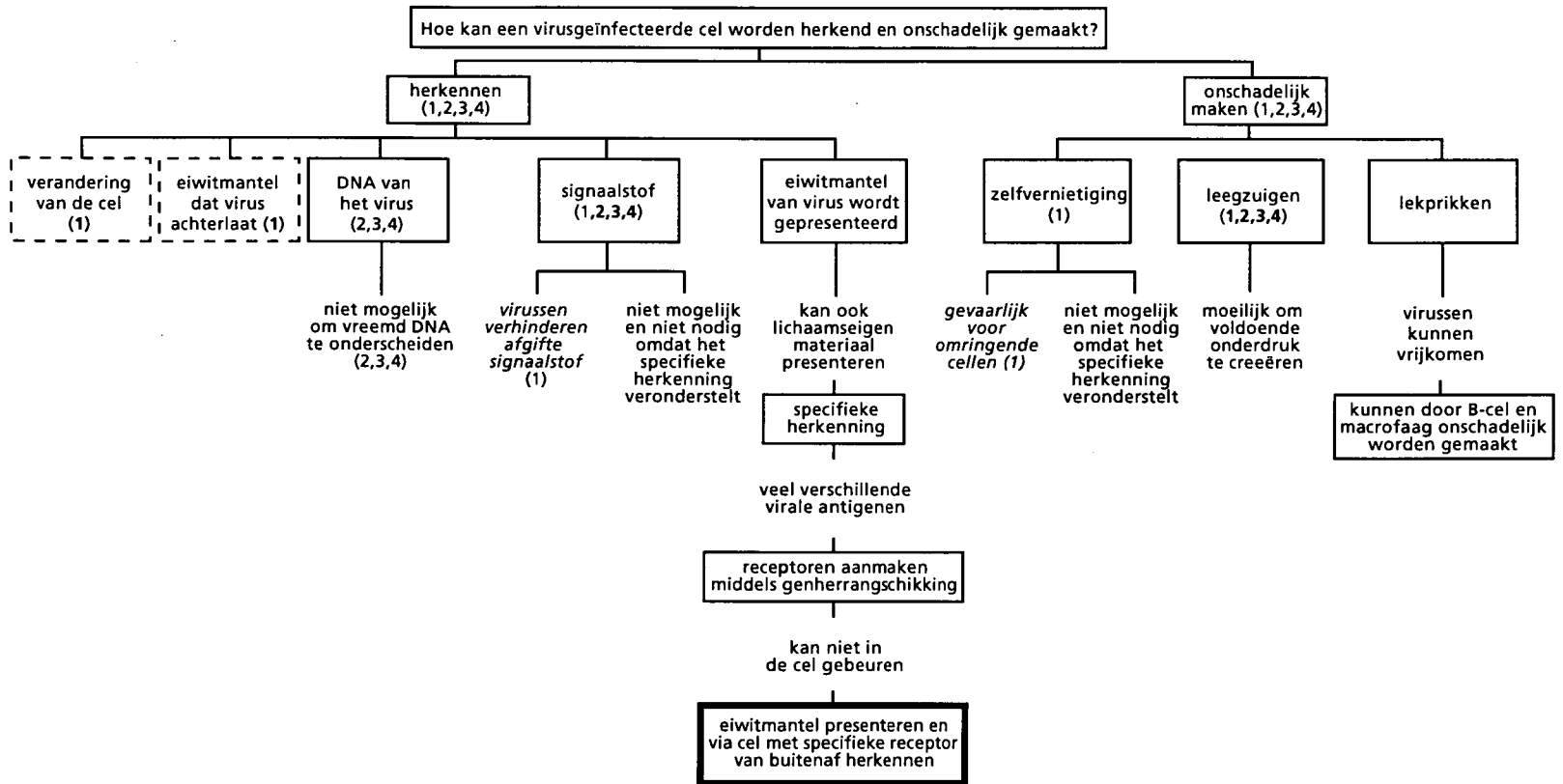
De leerlingen weten dat Tkiller-cellen in de lymfeklieren delen (tabel 4.7.1). Bijna alle leerlingen gaan er echter, evenals in de eerste ronde, vanuit dat Tkiller-cellen viraal antigeen dat door MHC wordt gepresenteerd, naar de lymfeklieren kunnen vervoeren. KE is de enige leerling die zich realiseert dat alleen vrijgekomen virussen door Tkiller-cellen kunnen worden gepresenteerd. Dit resultaat is eenvoudig te verklaren. De docent heeft in de tweede fase van de klassikale evaluatie niet meer het transport van viraal antigeen door de Tkiller-cel geïdentificeerd.

Conclusie en bijstelling van het scenario

Het onderwijsleerproces is niet geheel verlopen zoals verwacht. De doelstellingen zijn wel grotendeels gerealiseerd. De onverwachte resultaten kunnen worden toegeschreven aan een andere uitvoering van het scenario dan bedoeld. Enkele onderdelen die op grond van resultaten van de eerste ronde zijn toegevoegd aan het scenario zijn door tijdgebrek niet uitgevoerd:

- in de klassikale introductie is herkenning niet geproblematiseerd;
- in de groepsbespreking is niet nagegaan hoe de mechanismen kunnen worden gerealiseerd;
- in de klassikale evaluatie is het transport van antigenen naar de lymfeklieren niet geproblematiseerd.

De onverwachte resultaten geven dan ook geen aanleiding het scenario bij te stellen.



Figuur 4.7.1

Oplossingen en nadelen die tijdens de groepsbespreking van stap 6 zijn besproken

4.8 Leren werken met de ontwerpheuristiek

In deze paragraaf wordt nagegaan of leerlingen met de ontwerpheuristiek kunnen werken en of het daarbij behorende onderwijsleerproces is verlopen zoals verwacht.

Resultaten samengevat

Het onderwijsleerproces is vrijwel geheel verlopen zoals verwacht. De demonstratie van de ontwerpheuristiek verliep zoals gepland. Het bleek nauwelijks nodig te zijn leerlingen te stimuleren om met de ontwerpheuristiek te werken. De docent heeft doorgaans op adequate wijze de leerlingen gestimuleerd met de ontwerpheuristiek te werken, maar heeft hiervoor ook andere manieren gehanteerd dan in het scenario stonden beschreven.

De doelstellingen zijn grotendeels gerealiseerd. Zowel in de individuele denkfase als in de groepsbespreking wordt nagenoeg zoals verwacht met de ontwerpheuristiek gewerkt. In de individuele fase worden echter minder oplossingen en bijbehorende nadelen bedacht dan was verwacht. In de groepsbespreking blijken leerlingen soms het overzicht te verliezen over het ontwerpproces en elkaar ook op andere manieren te stimuleren dan was verwacht. Leerlingen blijken bij het ontwerpen ook nog een ander type voorkennis te activeren dan ik had verwacht.

Onderwijsleerproces

Demonstratie en begeleiding van de ontwerpheuristiek in stap 2

De demonstratie van de ontwerpheuristiek in stap 2 is verlopen zoals gepland, al heeft de docent vergeten de ontwerpheuristiek op het bord te noteren. Tijdens de individuele denkfase en de groepsbespreking van stap 2 blijken leerlingen, zoals verwacht, de ontwerpheuristiek correct te hanteren. Tijdens de individuele denkfase blijkt het niet nodig te zijn leerlingen te stimuleren creatieve oplossingen te bedenken. Ook was het niet nodig om door te vragen naar hoe een oplossing kan worden gerealiseerd en wat het nadeel is.

Ook in de groepsbesprekingen heeft de docent nauwelijks een stimulerende rol hoeven te vervullen. Alleen aan groep 2 moest worden gevraagd hoe ze zich een oplossing (wielklem) voorstellen. In groep 4 is nog naar een nadeel van de oplossing gevraagd maar het betrof hier al de eindoplossing van de betreffende stap (zie protocol 4.3.5). Deze vraag leidde er toe dat leerlingen zich al in deze stap bewust werden van het nadeel van specifieke herkenning van de ziekteverwekker die in stap 3 wordt behandeld.

Begeleiding van de ontwerpheuristiek in stap 3 tot 6

In de individuele denkfase van de betreffende stappen blijkt het inderdaad niet nodig te zijn leerlingen te stimuleren de ontwerpheuristiek te gebruiken. Tijdens de groepsbespreking in stap 3 verkennen leerlingen structuurherken-

ning zover als was verwacht. Analyse van de resultaten toont echter aan dat dit niet ver genoeg is. Leerlingen zullen structuurherkenning tot op moleculair niveau moeten onderzoeken. In het bijgestelde scenario zal de docent op dit punt dan ook moeten doorvragen (4.4). Alleen groep 4 heeft deze aanwijzing al in deze ronde gekregen.

In stap 4 blijkt het bij de meeste groepjes nodig te zijn, zoals verwacht, dat naar het hoe van het bedachte instructiemechanisme wordt doorgevraagd. Alleen bij groep 4 blijkt dit niet nodig te zijn. Onverwacht was echter dat in deze groep, evenals bij groep 1, naar het nadeel van blinde instructie moest worden gevraagd (zie onverwachte resultaten groepsbesprekingen). In stap 5 blijkt het niet nodig te zijn leerlingen te vragen of hun mechanisme niet eenvoudiger kan. Leerlingen bouwden hun mechanisme stap voor stap op, waardoor ze zich ook realiseren wat het nadeel is wanneer er een deelfunctie ontbreekt (protocol 4.6.1). In stap 6 blijkt het wel nodig te zijn om door te vragen naar hoe een oplossing kan worden vervuld. Dit is echter niet gebeurd, omdat de tijd hiervoor ontbrak (zie 4.7).

Onverwachte resultaten

De docent heeft ook andere, dan de in het scenario gespecificeerde, manieren gehanteerd om leerlingen te stimuleren met de ontwerpheuristiek te werken. Een drie manieren kunnen worden onderscheiden:

- luisteren en samenvatten;
- complimenteren;
- bevestigen van gemaakte keuzen.

luisteren en samenvatten

Wanneer een groepje even niet verder kon in het ontwerpproces bleek het vaak al voldoende te zijn naar de oplossingen en nadelen te luisteren die ze hadden bedacht. Leerlingen vatten dan voor zichzelf de resultaten van het ontwerpproces nog eens samen en komen dan vaak weer op nieuwe ideeën. Een aantal keren heeft de docent leerlingen hierbij geholpen door zelf hun oplossingen en nadelen samen te vatten.

complimenteren

Leerlingen zijn ook een aantal keren gecompimenteerd met hun oplossing. Deze complimenten bleken voldoende te zijn om leerlingen de oplossing nader te laten onderzoeken. In protocol 4.8.1 wordt dit geïllustreerd.

Protocol 4.8.1 Groep 2 stap 4

D=docent

D: Dus hij pikt het DNA van de bacterie, zeg maar, en dat gebruikt hij vervolgens om de goeie (F.J.: antistof) te maken.

FH: Zo iets ja. Ja.

D: Nou, dat vind ik ingenieus. Ingenieus.

KE: Hij vond het ingenieus!! Alleen dat DNA eruit krijgen hoe doe je dat?

bevestigen van gemaakte keuzen

Leerlingen zijn tijdens de groepsbespreking ook een aantal keren gestimuleerd om te werken met de ontwerpheuristiek door hen te bevestigen in hun keuze voor een bepaalde oplossing of nadeel. Zo was groep 4 in stap 3 tot de conclusie gekomen dat specifieke herkenning van structuren op zowel lichaams-eigen cellen als de ziekteverwekker als nadeel heeft dat er dan veel verschillende herkenningsstructuren nodig zijn. Ze komen niet uit dit probleem en geven het op. Vervolgens bezoekt de docent het groepje. Hij bevestigt hun keuze, waarna de leerlingen opnieuw gaan proberen het probleem op te lossen (protocol 4.8.2).

Protocol 4.8.2 Groep 4 stap 3

D=docent

D: Hoe gaat het hier? Hebben jullie al wat?

NR: Nee eigenlijk niet.

D: Eigenlijk niet.

JD: Nou ja een beetje.

D: Ik hoorde namelijk net wel goeie dingen, zo van een afstandje. Vertel eens wat jullie tot nu toe hadden, of waar je was?

JA: Ja, dat ze de cellen herkennen aan de uiterlijke structuur, of zo.

D: Ja? Nou dat lijkt me een goede oplossing.

JA: Maar dat heeft veel problemen denk ik, want er zijn heel veel verschillende soorten cellen, dus heel veel verschillende soorten structuren, dus hoe zou hij ze allemaal kunnen herkennen. Dat is het probleem.

JD: Is het niet gewoon iets specifiek voor die ene cel, gewoon net als een enzym.

PS: Ja maar je hebt toch niet zo iets al in je lichaam zitten wat iets herkent van buitenaf.

JD: Nee, maar misschien herkent ie z'n eigen cellen en als ie iets niet herkent dan is het een vreemde cel.

JA: Ja dat. Ja, dat! Dat zal het dan zijn ja.

JD: Nee want die eigen cellen hebben onderling ook weer een andere structuur.

Samenvattend kan worden vastgesteld dat het onderwijsleerproces dus grotendeels is verlopen zoals verwacht. De hierboven genoemde onverwachte manieren van stimuleren tot het werken met de ontwerpheuristiek kunnen in een bijgestelde versie van het scenario worden opgenomen.

Doelstellingen

In deze paragraaf wordt beschreven in hoeverre leerlingen in de individuele denkfase en de groepsbespreking met de ontwerpheuristiek kunnen werken. Van beide fasen worden achtereenvolgens de verwachte en onverwachte resultaten besproken.

Individuele denkfase

Werken met de ontwerpheuristiek

Alle leerlingen noteren adequaat, zoals verwacht, het ontwerpprobleem op hun ontwerpformulier. In het algemeen gaan leerlingen ver genoeg na hoe de oplossingen kunnen worden gerealiseerd. Zo noteren de meeste leerlingen bij ontwerpprobleem 2 niet aftasten of voelsprietten zoals in de eerste ronde, maar herkenning van vorm of structuren of herkenning middels herkenningstoffen. Voor de stappen 2,3 en 5, waarin niet heel ver hoeft te worden nagegaan hoe de oplossing kan worden gerealiseerd, bereiken de meeste leerlingen in de individuele denkfase al de mate van detaillering die ik in de groepsbespreking verwachtte. Voor bepaalde aspecten van de oplossing komen enkele leerlingen zelfs verder. Zo formuleert AK op haar ontwerpformulier de volgende oplossing voor het probleem 'hoe kan voor ieder antigeen een antistof worden aangemaakt?': 'Eerst wordt de bacterie geanalyseerd door een B-cel voor de vorm van de verloopstekker, dan worden deze in grote mate aangemaakt met bouwstenen b.v. A,T,C en G. De eigen cel heeft DDD en die kan hij niet maken'. De leerlingen formuleren de nadelen van hun oplossingen ook in termen van negatieve effecten op overleven en voortplanting van het organisme.

De verschillen per stap zijn niet groot. Opvallend is echter dat leerlingen in stap 2 veelal meer oplossingen en nadelen formuleren dan in de vervolgstappen (zie onverwachte resultaten). Ook de verschillen tussen de leerlingen zijn niet groot. Alleen RH en AR van groep 2 gaan voor de oplossingen van stap 3 nauwelijks na hoe deze kunnen worden gerealiseerd. RH formuleert vangen en testen en AR formuleert opsporen. JA van groep 4 valt in positieve zin op, omdat hij voor alle oplossingen van de diverse stappen ook een nadeel formuleert.

Onverwachte resultaten

In de eerste ronde hadden de leerlingen voor de meeste stappen meerdere oplossingen genoteerd en voor de meeste oplossingen ook een nadeel bedacht. Leerlingen formuleren in deze ronde meestal voor ieder ontwerpprobleem slechts één oplossing en gaan niet voor iedere oplossing na wat het nadeel is. In stap 2 formuleren bijna alle leerlingen voor elke oplossing nog een nadeel. In stap 3 gebeurt dit nog maar bij de helft van de leerlingen. In stap 4 en 5 en 6 nog respectievelijk door vier, één en twee leerlingen. Twee mogelijke verklarin-

gen kunnen hiervoor worden gegeven. In sommige gevallen hebben leerlingen waarschijnlijk wel meerdere oplossingen en nadelen bedacht en overwogen maar alleen hun eindoplossing genoteerd.

Neem bijvoorbeeld de oplossing van CL voor het probleem 'hoe kan voor ieder antigeen een antistof worden aangemaakt?' (stap 4): 'De B-cel heeft een soort scanner die de vorm in zich kan opnemen dan antistof maken en daarna in het geheugen kan opslaan en via boodschappers naar andere B-cellen gebracht en daar ook als vorm opgeslagen'. Het is onwaarschijnlijk dat CL deze oplossing in een keer heeft bedacht. Elk onderdeel is een oplossing voor een specifiek probleem dat ze waarschijnlijk eerder heeft geformuleerd.

Een andere mogelijke verklaring is de volgende. Leerlingen hadden in de eerste en tweede ronde dezelfde tijd ter beschikking. In de tweede ronde zijn leerlingen echter aanzienlijk verder nagegaan hoe een oplossing kan worden gerealiseerd. De meeste leerlingen kwamen in de tweede ronde daarom ook niet toe aan het bedenken van meerdere oplossingen. Hierdoor hebben leerlingen uiteraard ook minder de kans gehad om nadelen voor hun oplossingen te bedenken. Dit geldt zeker voor de complexere stappen als 4, 5 en 6. In stap 6 hebben leerlingen bovendien veel minder tijd gekregen dan was gepland om oplossingen en nadelen te bedenken (zie 4.7).

Groepsbespreking

Ik zal eerst bespreken hoe leerlingen in de groepsbespreking met de ontwerpheuristiek hebben gewerkt. Vervolgens wordt nagegaan hoe leerlingen elkaar hebben gestimuleerd bij het werken met de ontwerpheuristiek. Tenslotte worden de onverwachte resultaten besproken.

Werken met de ontwerpheuristiek

In de groepsbesprekingen zijn altijd meerdere oplossingen voor het centrale ontwerpprobleem van de stap geformuleerd en geëvalueerd. Dit zijn niet alleen de oplossingen uit de individuele denkfase van ieder groepslid, maar ook nieuwe oplossingen die worden ontwikkeld tijdens de groepsbespreking. In de meeste gevallen gaat men in de groepjes voldoende ver na hoe een oplossing kan worden gerealiseerd. Hierbij bereikt men uiteindelijk een detaillering die meestal verder gaat dan de oplossingen uit de individuele denkfase. Ook worden voor vrijwel elke oplossing nadelen bedacht, die bovendien in de juiste termen zijn geformuleerd. In de groepjes wordt in het algemeen de oplossing gekozen met de minste nadelen. Indien de tijd het toelaat wordt voor het nadeel van de geselecteerde oplossing veelal opnieuw nagegaan hoe dit kan worden opgelost. In protocol 4.8.3 wordt dit geïllustreerd.

Protocol 4.8.3 Groep 1 stap 2

PB: Ik kan deze combineren.

MV: Nou?

PB: Kijk dan sluit ie 'm eerst in en dan komt er in de cel als ie ingesloten is een of andere gifstof vrij, waardoor die vernietigd wordt.

MV: Heel goed. Is dat nu niet de perfecte oplossing?

AK: Eventuele bijwerkingen? Als nadeel?

PB: Ja dat was eigenlijk als je deze twee punten combineerde, want nou, kijk eventuele bijwerkingen heb je natuurlijk als in je hele lichaam de gifstof komt. En hier hou je het dus binnen de cel. Binnen dus.

MV: Ja, maar die gifstof wordt dan wel opgenomen door die cel.

PB: Nee, die wordt geproduceerd hier! Kijk, je hebt eerst een of andere cel, komt ie een bacterietje tegen, dan opent ie en dan sluit ie hem in, weet ik veel wat, en dan zit die bacterie dus in de cel, en dan op dat moment, dan vormt er nog een blaasje omheen, weet ik veel voor mijn part. En daar komen dan de gifstoffen in vrij.

Zoals verwacht worden hierbij veelal niet de nadelen als ontwerpprobleem geherformuleerd. Dit gebeurt wel wanneer er onduidelijkheid is over het probleem dat moet worden opgelost. In protocol 4.8.4 wordt dit geïllustreerd.

Protocol 4.8.4 Groep 1 stap 4

PB: Ja, dat is wel bij de volgende aanraking ja, maar dat is, die antistof die dan opnieuw gemaakt moet worden. want dat moet dus, als je die receptor op dat moment effe niet bij de hand hebt, dat het dan onthouden wordt, zodat je hem de volgende keer wel meteen bij de hand hebt. Ja. Dat is mijn oplossing.

MV: Ja maar was dat de vraag?

PB: Ja.

MV: Ja ik bedoel.

JR: Ja ik begrijp wel wat jij bedoelt, het gaat jou om hoe een B-cel dit de eerste keer doet.

MV: Ja de eerste keer, als ie nog geen geheugencel heeft.

De eerder genoemde stappen van de ontwerpheuristiek worden in de groepjes in alle stappen van de lessenserie meerdere malen doorlopen. In het feitelijke ontwerpproces worden echter niet telkens de stappen geheel afge-maakt en vinden er vele terugkoppelingen plaats. Dit heeft veelal twee redenen.

Ten eerste worden in de groepjes vaak niet alle oplossingen uit de individuele denkfase eerst geïnventariseerd en daarna verder ontwikkeld, maar volgt er na de oplossing van het eerste groepslid al een discussie waarin de oplossing nader wordt onderzocht. De oplossingen die de overige groepsleden hebben bedacht komen dan pas aan de orde wanneer ze een oplossing zijn voor de problemen die tijdens de discussie worden geformuleerd. Protocol 4.8.5. illustreert een dergelijk verloop.

Protocol 4.8.5: Groep 4 stap 4

- PB: Oke. De oplossing is: Geheugencellen! Als er ooit één in aanraking is geweest met een antigeen waar die op dat moment effe geen antistoffen voor kan maken.
- JR: Hoe doe je dat bij de eerste aanraking?
- PB: Ja nou, die eerste aanraking wordt ie dan een beetje ziek van, ofzo. En dan maakt ie snel die antistof.
- JR: Maar hoe maakt ie die antistof, daar gaat het toch om?
- AK: Ja, dan is die structuur of zoiets die wordt afgemeten, en die B-cel maakt dan zo'n anti-stof.

Alleen in de groepsbesprekingen van groep 3 worden doorgaans eerst de oplossingen van alle groepsleden geïnventariseerd en daarna de nadelen (protocol 4.8.7). Echter, ook in deze groep maken leerlingen vervolgens een keuze om een bepaalde oplossing verder te onderzoeken. De andere oplossingen worden dan ook opnieuw ingebracht wanneer ze een oplossing zijn voor het probleem dat in de discussie naar voren is gekomen. Het voordeel van deze aanpak is wel dat alle leerlingen al in het begin van de groepsbespreking op de hoogte zijn van de verschillende alternatieve oplossingen, zodat ze ook de oplossingen van elkaar in een later stadium kunnen gebruiken.

Het ontwerpproces in de groepjes verloopt ook met veel terugkoppelingen, omdat leerlingen niet altijd eerst nagaan hoe een oplossing kan worden gerealiseerd alvorens de nadelen te bespreken. Zo gaat groep 3 in stap 2 eerst na wat de nadelen zijn van inkapselen enerzijds en omringen en verwijderen anderzijds (protocol 4.3.1). Men kiest voor inkapselen en onschadelijk maken en gaat vervolgens pas na hoe deze oplossing kan worden gerealiseerd. De meeste groepjes kiezen ook deze volgorde in stap 4. Veelal worden eerst op grond van nadelen een geheugengestuurd en blind instructiemechanisme verworpen, alvorens men meer in detail ingaat op de wijze van antistofproductie.

Een dergelijke volgorde heeft als voordeel dat men alleen voor de geselecteerde oplossingen hoeft na te gaan hoe ze kunnen worden gerealiseerd. Deze volgorde kan er ook toe leiden dat men eerder gemaakte keuzen moet herzien. Immers, wanneer men nagaat hoe een oplossing kan worden gerealiseerd, kan worden ontdekt dat de gekozen oplossing niet mogelijk is of nog onvermoede nadelen heeft. Ook is het mogelijk dat de oplossing ten onrechte wordt verworpen op grond van een nadeel dat bij nader inzien geen rol speelt wanneer in detail wordt nagegaan hoe de oplossing wordt vervuld. In protocol 4.8.6. wordt dit geïllustreerd. JR van groep 1 stelt in stap 3 voor dat lichaamseigen cellen kunnen worden herkend middels een herkenningsstof.

Protocol 4.8.6: Groepsbespreking groep 1 stap 3

- AK: Als dat zo zou zijn, zou je miljoenen liters herkenningsstof afscheiden. Daar zijn wel een miljoen macrofagen en die komen in contact met miljoenen eigen cellen.

PB: Een miljoen keer miljoen 1 druppeltje is best veel.

JR: Het gaat volgens mij niet om druppeltjes, het gaat om moleculen. Een paar moleculetjes, denk ik.

Samenvattend kan worden vastgesteld dat in de groepsbespreking de ontwerpheuristiek meestal adequaat wordt gehanteerd. De stappen uit de ontwerpheuristiek worden echter niet telkens helemaal afgerond en er vinden tussentijds vele terugkoppelingen plaats. In veel gevallen is dit ook functioneel.

Stimuleren van elkaar

Leerlingen blijken elkaar tijdens de groepsbespreking op de verwachte manieren te hebben gestimuleerd. Ten eerste stimuleren leerlingen elkaar door van elkaars oplossingen na te gaan hoe ze kunnen worden gerealiseerd en wat de nadelen zijn. Ten tweede stimuleren leerlingen elkaar doordat ze elkaar ontwerp vragen stellen. Daarbij blijken leerlingen elkaar echter nauwelijks te vragen welke oplossing de minste nadelen heeft. In protocol 4.8.7 worden beide vormen van stimuleren geïllustreerd.

Protocol 4.8.7 Groepsbespreking groep 3 stap 2

CL: Ik had door cellen die de ziekteverwekkers meenemen en uit het lichaam verwijderen, volgens mij heb jij dat ook trouwens.

JT: Nee, ik heb niet dat ze uit het lichaam worden verwijderd. Gewoon inkapselen zeg maar. Een muur er omheen bouwen. En jij?

KE: Bij moeten ze er ook uit. Met iets wat het dan omsluit en dan er uit gaat, ik weet niet helemaal hoe ze dat voor elkaar kunnen krijgen.

JT: Maar het nadeel is dat ze nog door het hele lichaam heen moeten.

KE: Ja en als ze (bacteriën: F.J) ook maar half vermenigvuldigd zijn dan heb je er wel veel nodig in ieder geval.

CL: Wat had jij voor nadeel?

JT: Dat ze in je lichaam blijven zitten. Als je ze alleen maar inkapselt.

CL: Maar zou er dan niet iets in kunnen zitten dat het dan afbreekt zodra het ingekapseld is? Dat daar iets, een stofje inzit wat het dan af kan breken?

JT: Ja maar dan weet ik niet of dat kunstmatig zou moeten zijn.

KE: Geen idee! Hoe maak je zo iets?

JT: Dat weet ik niet.

CL: Misschien is er wel een ander stofje wat er dan in kan. Wat breekt een ding af? Hoe zou je dat kunnen afbreken?

JT: Dat weet ik niet.

KE: Maar ze zijn zo wel onschadelijk. We hebben dus eigenlijk allemaal insluiten door een bepaalde cel en dan moet het verwijderd worden.

CL: Ja.

- JT: Bij mij blijven ze d'r in zitten.
- KE: Maar nog altijd door 'bepaalde' cellen.
- CL: Ja dat vind ik ook zo vaag, bepaalde cellen, dat bepaalde.
- JT: Ja.
- CL: Vind ik trouwens ook wel een goeie, gewoon dat ze erin blijven en dat die cel die omsluit zelf iets kan doen waardoor ze afgebroken worden of zo.
- KE: Kan ook, je kan ook iets erbij doen.
- JT: Ja maar hoe moet je je dat voorstellen? Dan moet er dus iets in de cel zitten wat dan wel, want de bacterie blijft dan..., komt eigenlijk niet in de cel. Hij blijft, ja hij wordt omsloten, dus hij zit er niet helemaal in, maar dan moet er dus wel een stofje zijn wat er wel weer uit kan naar die bacterie toe, wat wel die cel kan verlaten maar dan ook alleen naar die bacterie gaat en niks verder aantast.

Er zijn geen grote verschillen per stap waarneembaar in de mate en wijze waarop leerlingen elkaar stimuleren tot werken met de ontwerpheuristiek. Wel zijn er duidelijke verschillen tussen de groepjes. Zo vraagt groep 3 twaalfmaal door naar het hoe van de oplossing en groep 1 slechts driemaal. Deze verschillen leiden er echter niet toe dat groep 3 veel verder nagaat hoe een oplossing wordt gerealiseerd dan groep 1. De leerlingen van groep 1 vragen minder expliciet door naar het hoe, maar gaan wel voor elkaars oplossingen na hoe ze worden gerealiseerd. In groep 1 blijken de vragen vooral te worden gesteld door PB en MV. In groep 2 en groep 3 is dit gelijk verdeeld. In groep 4 blijken met name JD en JA de vragen te stellen. In dit groepje nemen PS en NR soms minder verantwoordelijkheid voor het ontwerpproces. JD en JA zorgen er dan veelal voor dat PS en NR weer aan het ontwerpproces gaan deelnemen (protocol 4.8.8).

Protocol 4.8.8 Groep 4 stap 4

- JD: Ja dan pakt ie de antigeen van de eigen cel en maakt ie daar een verloopstekker van.
- D: Precies.
- JD: En dat is dus onzinnig.
- NR: Ja Jos jij verzint het probleem, je lost het ook maar op.
- JD: Ja zeg.
- A: Misschien met ladingsverschillen, maar dat kan ook niet.
- JD: Nou hoe los je dat op?
- JA: Je zou er gewoon herkenningsdingen voor eigen cellen op moeten zetten.
- JD: Als ie gemuteerd is, dat is wel vervelend dan.
- PS: Ja. Sowieso is het dan een enorm probleem.
- JD: Ja nou nog een keer?
- PS: Ja, ik weet het niet hoor.
- JA: Nou opnieuw. Gooi eens een balletje op.
- NR: Ik weet... ik weet er eigenlijk niks over te zeggen.

JA: Dat zal wel.

NR: Ik kan echt niks verzinnen.

JA: Nou, nee, daar hebben we niks aan.

Onverwachte resultaten

Drie typen onverwachte resultaten die zich hebben voorgedaan tijdens de groepsbespreking zullen worden besproken:

- Soms hebben leerlingen onvoldoende overzicht over het ontwerpproces.
- Leerlingen hebben ook andere manieren gehanteerd om elkaar te stimuleren.
- Leerlingen maken bij het ontwerpen ook gebruik van een type voorkennis dat ik niet eerder had gespecificeerd.

onvoldoende overzicht over het ontwerpproces

In een aantal gevallen wordt de ontwerpheuristiek in de groepjes niet adequaat gehanteerd. Bijna altijd komt dit doordat leerlingen het overzicht over het ontwerpproces verliezen. Leerlingen vergeten soms een deelprobleem waaraan ze werken. Zo realiseren leerlingen van groep 1 zich in het begin van stap 2 nog dat ze moeten nagaan hoe een bacterie en hoe een virusgeïnfecteerde cel onschadelijk kan worden gemaakt. Na een mislukte poging dit laatste deelprobleem op te lossen, gaan ze zoeken naar een oplossing voor het eerste deelprobleem. Wanneer ze hebben bedacht hoe een bacterie onschadelijk kan worden gemaakt, keren ze echter niet meer terug naar het probleem hoe een geïnfecteerde cel onschadelijk kan worden gemaakt. Ik heb hen hier ook niet meer op geattendeerd. Ook in stap 3 verliezen leerlingen van groep 1 het overzicht over het probleem. Ze richten zich in eerste instantie op het deelprobleem hoe iets kan worden herkend, maar vergeten opnieuw na te gaan wat moet worden herkend. Ze denken hier pas weer verder over na nadat de docent hun op dit deelprobleem heeft gewezen.

Ook verliezen leerlingen soms het overzicht over de reeds bedachte oplossingen en de bijbehorende nadelen. Zo gaat groep 2 in stap 2 wel na wat de nadelen zijn van een wielklem, maar de alternatieve oplossingen die ze hebben bedacht worden niet meer in de afweging betrokken. Leerlingen van groep 1 en 4 komen in stap 4 niet op het nadeel van een blind instructiemechanisme terwijl enkele groepsleden dit nadeel in de individuele denkfase wel hebben onderkend. Tenslotte blijken leerlingen van groep 3 drie nadelen te onderkennen van specifieke herkenning van structuren: veel verschillende herkenningsstructuren nodig; veel cellen aanmaken; en deze moeten worden verplaatst door het lichaam. In de groepsbespreking gaan ze vervolgens na hoe dit eerste nadeel kan worden opgelost, ze vergeten echter de twee andere nadelen.

Er zullen dus voorzieningen moeten worden getroffen om leerlingen tijdens het ontwerpproces het overzicht te laten behouden.

alternatieve manieren om elkaar te stimuleren

Leerlingen blijken ook onverwachte manieren te hebben gehanteerd om elkaar te stimuleren. Een drietal manieren heb ik kunnen onderscheiden:

- samenvatten;
- complimenteren;
- aanspreken op individuele verantwoordelijkheid.

Samenvatten

Een belangrijke stimulerende functie heeft het samenvatten van het voorafgaande ontwerpproces. In alle groepjes komt dit een aantal keren voor. Een samenvatting kan er voor zorgen dat leerlingen weer een overzicht krijgen over het voorafgaande ontwerpproces, waardoor ze weer ideeën krijgen voor nieuwe oplossingen. In onderstaand protocol 4.8.9 vatten leerlingen gezamenlijk de voorwaarden samen waaraan een oplossing moet voldoen.

Protocol 4.8.9 Groep 1 stap 4

MV: Nou dan moet je ze (antistoffen: FJ) allemaal klaar hebben liggen ofzo.

PB: Ja maar dat kan dus niet.

MV: Ja, want het zijn steeds verschillende.

AK: Maar hij kan ze niet onderweg maken, want dan zou die ze ook voor z=n eigen kunnen maken.

MV: Ja hij moet ze dus, op de een of andere manier moet hij die antistoffen uit elkaar zien te houden van zichzelf en van bacteriën.

AK: Ja.

PB: Maar hoe. Maar hij kan ze dus wel maken maar hij moet ze niet kunnen vervormen. Hij moet niet...

MV: Daar moet dus iets tussen zitten. Waardoor het wel kan.

AK: Heeft ie niet, een af andere code ofzo, met alle dingen erop, waar je allemaal verschillende dingen mee kan maken, behalve die van zichzelf.

P/AM: (tegelijk) DNA!

Complimenteren

Leerlingen blijken elkaar ook te stimuleren tot het werken met de ontwerpheuristiek doordat ze elkaar complimenten geven over hun oplossingen of nadelen. Dit wordt in protocol 4.8.3 geïllustreerd.

Aanspreken op individuele verantwoordelijkheid

Leerlingen blijken elkaar tenslotte ook te stimuleren doordat ze elkaar aanspreken een bijdrage te leveren aan de groepsbespreking. In de groepsbesprekingen gebeurde dit vooral wanneer een groepslid tijdens de discussie even niet meedeed. In protocol 4.8.10. wordt dit geïllustreerd (zie ook protocol 4.8.8).

Protocol 4.8.10: Groep 1 stap 5

JR: Ja maar je kunt wondjes krijgen.

PB: Je hebt gewoon helemaal niet geluisterd he, dat heb je ervan als je met Arianne zit te kletsen.

JR: Nou sorry dan wil ik het toch graag horen.

PB: Als je een wondje krijgt dan worden al die B-cellen naar dat wondje toegestuurd.

JR: Ooo!

activatie van een bepaald type voorkennis

Ik verwacht dat, wanneer leerlingen met de ontwerpheuristiek werken, relevante voorkennis wordt geactiveerd die leerlingen kunnen gebruiken bij het ontwikkelen en toetsen van oplossingen. Ik was er vanuit gegaan dat leerlingen bij het ontwerpen gebruik maken van voorkennis over het systeem en de systeemomgeving (2.3.1). In het scenario per stap is de verwachte voorkennis telkens gespecificeerd. Deze voorkennis blijkt ook veelal te zijn geactiveerd (4.2-4.7). Zo activeren leerlingen bijvoorbeeld tijdens stap 4 onder meer kennis over DNA, eiwitsynthese en verschillen tussen ziekteverwekkers.

Uit de analyse van de ontwerpformulieren in de individuele fase en van de protocollen van de groepsbesprekingen blijkt dat leerlingen echter ook nog een ander type voorkennis activeren bij het werken met de ontwerpheuristiek. Leerlingen maken bij het bedenken en toetsen van oplossingen ook gebruik van kennis van systemen die een vergelijkbare functie vervullen als in het betreffende ontwerpprobleem is gespecificeerd: functionele analogieën. Dit kunnen biologische en niet-biologische systemen zijn. Bij onschadelijk maken (stap 2) denkt men bijvoorbeeld aan packmannetjes, inkapselen en een wielklem, e.d.. Bij herkennen (stap 3) denkt men aan ogen, voelsprietten, maar ook aan legitimatiebewijs, puzzels, sleutel en slot en enzym-substraat complex. Bij het aanmaken van een passende antistof (stap 4) denkt men aan scannen bij een kassa, gipsafdruk, een mal, e.d.. Bij het trefkansprobleem (stap 5) denkt men aan rondrennen, concentraties verhogen, lokstoffen, seintjes geven, e.d.. Tenslotte denkt men bij herkennen van een geïnfecteerde cel aan alarminstallaties, signaalstoffen en bij het onschadelijk maken van geïnfecteerde cellen aan lekpijken, stofzuigen, e.d..

Deze kennis van functionele analogieën bepaalt veelal in eerste instantie de probleemruimte waarin men naar een oplossing gaat zoeken. Deze oplossing wordt vervolgens aangescherpt door na te gaan hoe deze kan worden gerealiseerd en wat de nadelen zijn. Op deze manier wordt respectievelijk kennis over het systeem en de systeemomgeving geactiveerd. Protocol 4.8.11 illustreert hoe leerlingen van groep 3 een computeranalogie gebruiken om het probleem van antistofproductie op te lossen.

Protocol 4.8.11: Groep 3 stap 4

CL: Hij scant 't en slaat het op in z'n geheugen.

JT: Tikt ie 't in de computer.

CL: En dan maakt ie het. Ik zie het als een computer.

KE: Maar wat doet die rechter knop ook al weer.

JT: Da's gewoon uitprinten.

KE: Ja de omtrek uitprinten of zo.

JT: Dit kan niet.

CL: Ja dat kan wel.

KE: Ja dat kan wel, het wordt opgeslagen in je DNA, met enzymen kunnen dan nieuwe antistoffen worden gemaakt.

Conclusie en bijstelling van het scenario

Het onderwijsleerproces is vrijwel geheel verlopen zoals verwacht en de doelstellingen zijn grotendeels gerealiseerd. In zowel de individuele denkfase als de groepsbesprekingen wordt veelal adequaat met de ontwerpheuristiek gewerkt. De onverwachte resultaten geven wel aanleiding het scenario op een aantal punten bij te stellen. Deze wijzigingen hebben niet alleen betrekking op dit scenario, maar gelden ook voor andere onderwerpen die volgens ontwerpend leren worden behandeld. De wijzigingen worden dan ook in detail besproken in hoofdstuk 5. Hier wordt slechts aangegeven welke punten moeten worden bijgesteld.

Bij de demonstratie en begeleiding van de ontwerpheuristiek dient er rekening mee te worden gehouden dat leerlingen functionele analogieën kunnen gebruiken bij het ontwikkelen van oplossingen. Bovendien kan de docent, indien nodig, de andere manieren van stimuleren hanteren die in deze ronde zijn gespecificeerd: luisteren en samenvatten; complimenteren; en bevestigen van gemaakte keuzen. De docent zal er verder voor moeten zorgen dat alle oplossingen en bijbehorende nadelen die leerlingen tijdens de individuele denkfase bedenken, ook gebruikt kunnen worden in de groepsbespreking. Tenslotte zal de groepsbespreking zo moeten worden ingericht dat leerlingen het overzicht over het ontwerpproces behouden.

4.9 Leerlingen over ontwerpend leren

Leerlingen hebben in de tweede ronde na afloop van de lessenserie hun mening gegeven over ontwerpend leren. Dertien leerlingen hebben hiervoor enkele vragen schriftelijk beantwoord. De resultaten van deze enquête worden hieronder besproken. In tabel 4.9.1 zijn de antwoorden van alle leerlingen opgenomen.

Ontwerpend leren vergeleken met gangbaar biologieonderwijs

De leerlingen is gevraagd waarin ontwerpend leren verschilt van de gebruikelijke manier van lesgeven. Alle leerlingen geven aan dat ze in deze lessenserie actiever betrokken zijn bij de lessen. De meeste leerlingen geven ook aan dat ze hier de oplossingen zelf moeten bedenken, in plaats van dat ze deze aangeboden krijgen.

Je bent zelf intensiever met leren bezig, doordat je zelf oplossingen moet zoeken en je dus automatisch voor- en nadelen tegen elkaar afweegt. (PB)

Je doet in de les veel meer, je moet zelf oplossingen bedenken terwijl je die anders zo voorgeschoteld krijgt. De leraar is minder aan het woord. (JT)

Eén leerling vermeldt expliciet dat bij ontwerpend leren meer een beroep wordt gedaan op voorkennis.

Je maakt veel eerder gebruik van eerder opgedane kennis (misschien is dit alleen maar het bewuster gebruik van opgedane kennis). (CL)

Enkele leerlingen geven ook expliciet aan dat ze op deze manier ook leren waarom iets het geval is.

Je denkt zelf aan de voor- en nadelen. Daardoor neem je niet zomaar iets aan. (AK)

Voordelen ontwerpend leren

De leerlingen is ook gevraagd wat de voordelen zijn van ontwerpend leren. De actieve betrokkenheid bij het onderwijsleerproces blijkt door alle leerlingen als positief te worden ervaren. De meeste leerlingen zijn verder van mening dat ze hierdoor ook beter de leerstof begrijpen en dat ze deze beter kunnen onthouden.

Je onthoudt alles. Begrijpt waar je over praat (meestal). Je bent actief met de stof bezig. (FH)

Je onthoudt het beter als je er over praat. Je denkt veel meer na. De les wordt interessanter. (JT)

Een leerling geeft nog expliciet aan dat je bij ontwerpend leren, op je eigen niveau en in je eigen tempo kunt werken.

Je werkt in je eigen tempo. Het is op eigen nivo want, je bedenkt het zelf en dus een mooie opbouw qua moeilijkheid. (JA)

Nadelen ontwerpended leren

De leerlingen is ook gevraagd wat volgens hen de nadelen zijn van ontwerpended leren. De meeste leerlingen geven hierbij aan dat ze verwachten dat het meer tijd kost.

Het is wel omslachtiger denk ik, het gaat langzamer. (PB)

Eén leerling noemt bij de nadelen van ontwerpended leren enkele aspecten van het groepswerk.

Je kan overstemd worden door de groep (waardoor je het idee krijgt er niks van te snappen). Je bent afhankelijk van de groep. Als er één niet komt opdagen, heeft die een achterstand en dat merk je bij de volgende les. (JA)

Vaker ontwerpended leren

Tenslotte is de leerlingen nog gevraagd of ze vaker zo les zouden willen krijgen en of ze hun antwoord wilden toelichten. Allen willen wel vaker ontwerpended leren. De helft van de leerlingen verwijst daarbij naar eerder genoemde voordelen.

Ja. Want ik vind de lessen hierdoor leuker, omdat je zelf alles uitvindt en je daardoor het idee krijgt dat je het beter opneemt. (JA)

Ja. Ik heb het gevoel dat er logica in het menselijk lichaam zit. Van te voren leerde ik de stof maar meer niet. (FH)

De andere helft van de leerlingen wil wel vaker ontwerpended leren, maar dan wel afgewisseld met 'gewone' lessen. Leerlingen geven hiervoor verschillende redenen ('anders wordt het langdradig'; 'je moet alles zelf bedenken als klas'; 'ligt eraan als er tijd voor is')

Conclusie

De resultaten van de schriftelijke enquête laten zien, dat leerlingen zelf hebben ervaren wat ik op grond van de protocollen en de antwoorden op de toepassingsvragen heb kunnen vaststellen: leerlingen zijn actief betrokken geweest bij het ontwikkelen van kennis en hebben veelal adequate kennis verworven die ze ook kunnen verantwoorden. Het gevolgde onderwijsleerproces en de bijbehorende leerresultaten worden door de leerlingen ook positief gewaardeerd. De leerlingen willen dan ook wel vaker ontwerpended leren. De tijdsinvestering wordt door veel leerlingen wel als een nadeel ervaren. In 6.2 wordt besproken hoe hiermee kan worden omgegaan.

	Waarin verschilt je ontwerp- leren van hoe je normaal leert/les krijgt?	Voordelen ontwerp- leren	Nadelen ontwerp- leren	Zou je zo voortaan vaker les willen krijgen? Waarom wel/niet?
JR	Nu moet je zelf meer nadenken over hoe het zou kunnen zijn	Leuk om te doen. Zo blijft de infor- matie beter han- gen	Lange tijd mee bezig	Ja, zie voordelen
PB	Je bent zelf inten- siever met leren bezig, doordat je zelf oplossingen moet zoeken en je dus automatisch voor- en nadelen tegen elkaar afweegt	Ik denk, dat ik deze stof beter onthoud en begrijp dan nor- maal, doordat zie 4a	Het is wel om- slachtiger denk ik, het gaat lang- zamer	Ja, want ik vind het een leuke manier om les te krijgen, het is weer eens wat anders. Echt leuk.
MV	Zelf onderzoeken	Vergeet minder snel. Je weet voor- en nadelen, waar- om ze welke methode hebben genomen	-	-
AK	Je denkt intensie- ver na. Je denkt zelf aan de voor- en nadelen. Daar- door neem je niet zomaar iets aan.	-	Je leert minder theorie in meer tijd	-
FH	-	Je onthoudt alles. Begrijpt waar je over praat (meest- al). Je bent actief met de stof bezig	-	Ja, ik heb het gevoel dat er logi- ca in het menselijk lichaam zit. Van te voren leer- de ik de stof maar meer niet
JA	Je bent actief met de stof bezig, je moet het zelf bedenken.	Je begrijpt het eer- der want je bedenkt het zelf. Geen leraar die alles saai verteld. Je werkt in je eigen tempo. Het is op eigen nivo want, je bedenkt het zelf en dus een mooie opbouw qua moeilijkheid.	Je kan overstemd worden door de groep (waardoor je het idee krijgt er niks van te snap- pen). Je bent afhankelijk van de groep. Als er één niet komt opda- gen heeft die een achterstand en dat merk je bij de vol- gende les.	Ja want ik vind de lessen hierdoor leuker, omdat je zelf alles uitvindt en je daardoor het idee krijgt dat je het beter op- neemt.

Tabel 4.9.1

Antwoorden van de leerlingen op vragen over ontwerp-leren (n=13)

NR	Meer zelf nadenken	Minder huiswerk. Individueel werken.	Moeilijk om juiste oplossing te vinden. Ingewikkeld	Af en toe
JT	Je doet in de les veel meer, moet zelf oplossingen bedenken terwijl je die anders zo voorgeschoteld krijgt. De leraar is minder aan het woord	Je onthoudt het beter als je er over praat. Je denkt veel meer na. De les wordt interessanter	Om een onderwerp te behandelen duurt langer en daarom kan het op den duur ook wel saai worden	Ja, maar wel in afwisseling met gewone lessen, omdat het anders langdradig wordt.
JD	Je bent actiever bij de les betrokken (als je zelf merkt tenminste)	Makkelijker te onthouden, als je tot een oplossing komt.	Kost (misschien) wel meer tijd.	Ja, maar niet bij elk onderwerp. Je moet alles zelf bedenken als klas
AR	Leuker, minder saai	-	Als je het niet weet is het saai, als je het wel weet kan het te langzaam gaan	ligt eraan, als er tijd voor is.
RH	In een gewone les, ben je zelf niet actief bezig. Je luistert alleen maar. In een gewone les werk je niet in groepjes als je in een groepje werkt wil je toch de beste oplossing vinden, waardoor je ook harder gaat werken.	Je bent zelf meer bij de les betrokken en het is veel leuker.	Het duurt denk ik te lang.	Wel.
CL	Veel meer zelf bezig zijn. Je maakt veel meer gebruik van eerder opgedane kennis (misschien is dit alleen maar het bewuster gebruik van opgedane kennis). Je wordt gedwongen na te denken door te redeneren.	Je moet er bewuster mee bezig zijn. Je past veel meer dingen, die je al kent toe. Je wacht niet op het antwoord van een leraar, maar je wordt gedwongen om er zelf een te bedenken.	Het is moeilijk om steeds weer antwoorden te bedenken op de vragen.	Het zou goed zijn om bepaalde onderwerpen zo aan te pakken, maar ik zou niet altijd op deze manier les willen krijgen. Je kwam soms niet tot een oplossing in een les en dan is het verwarrend om de les weer op te pakken 2 of 3 dagen later.
KE	Je moet zelf naar oplossingen zoeken i.p.v. dat het antwoord je voorgedragen wordt. Het is dus ook wel omslachtig.	Denkt veel meer zelfstandig na.	Het is wat omslachtiger	-

Tabel 4.9.1 (vervolg)

Antwoorden van de leerlingen op vragen over ontwerpnd leren (n=13)

4.10 Samenvatting

In dit onderzoek is in twee rondes een scenario voor het immunologieonderwijs voor leerlingen van 5 en 6 VWO ontwikkeld. De resultaten van de beproeving van het scenario in de tweede ronde zijn in de voorafgaande paragrafen gepresenteerd. In deze paragraaf worden de resultaten met betrekking tot het leren begrijpen van het immuunsysteem en het leren werken met de ontwerpheuristiek samengevat. Deze paragraaf wordt afgesloten met een conclusie en een discussie.

Leren begrijpen van het immuunsysteem

Achtereenvolgens wordt beschreven of het onderwijsleerproces is verlopen zoals verwacht, of de doelstellingen zijn gerealiseerd en welke bijstellingen van het scenario nodig zijn.

Onderwijsleerproces

Uitgangspunt bij de inrichting van het immunologieonderwijs was dat leerlingen, uitgaande van de functie van het immuunsysteem in zes stappen de gewenste kennis over het immuunsysteem zouden ontwikkelen. Daarbij wilde ik het onderwijs zo inrichten dat leerlingen in elke stap het nadeel zouden formuleren dat in de volgende stap als nieuw ontwerpprobleem zou worden herformuleerd. Het onderzoek toont aan dat het onderwijsleerproces grotendeels is verlopen zoals verwacht. Leerlingen zijn veelal middels afweging van alternatieven op de gewenste oplossing en het bijbehorende nadeel gekomen en het onderwijs is meestal zo uitgevoerd als gepland. De leerlingen rapporteren ook zelf actief betrokken te zijn geweest bij het onderwijsleerproces (4.9).

Er hebben zich echter ook enige onverwachte resultaten voorgedaan. De belangrijkste zullen hieronder worden weergegeven. Tevens zal beknopt wordt beschreven hoe de onverwachte resultaten kunnen worden verklaard, hoe hiermee is omgegaan en waar dit toe leidde.

- In stap 2 blijken twee groepjes niet te onderkennen dat lichaamseigen materiaal kan worden aangevallen door een eetcel. Waarschijnlijk denken ze bij lichaamseigen materiaal aan cellen in weefselverband die niet door een eetcel kunnen worden omsloten. De docent heeft in de klassikale evaluatie onvoldoende aandacht besteed aan de (verschillen in) opvattingen van leerlingen over lichaamseigen materiaal. Alle leerlingen blijken zich na afloop van de stap wel te realiseren dat macrofagen potentieel gevaarlijk kunnen zijn voor lichaamseigen materiaal. Het is echter niet duidelijk wat ze precies onder lichaamseigen materiaal verstaan.
- In stap 3 formuleren twee groepjes als nadeel voor herkenning van lichaamseigen materiaal dat er veel verschillende herkenningsstructuren nodig zijn. Zij gaan er vanuit dat structuurherkenning op het niveau van de cel of delen van de cel zal plaatsvinden. In de klassikale evaluatie heeft de docent aangegeven dat herkenning op moleculair niveau plaatsvindt en gewezen op de consequen-

ties die dit heeft voor de herkenning. Aan de wijze waarop de docent met de onverwachte oplossing is omgegaan zijn ideeën ontleend voor bijstelling van het scenario. Alle leerlingen blijken zich na afloop van de stap te realiseren dat herkenning plaatsvindt op moleculair niveau.

- In stap 4 blijken enkele leerlingen aan het eind van de klassikale evaluatie toch de voorkeur te geven aan een instructie-mechanisme. Zij, en wellicht ook andere leerlingen, lijken er niet vanuit te gaan dat een instructiemechanisme onmogelijk is. Dit komt onder meer omdat de docent de informatieoverdracht van antigeen naar DNA niet heeft behandeld zoals gepland. Bovendien gaan enkele leerlingen er vanuit dat een selectiemechanisme een nadeel heeft dat ik niet had verwacht.
- In stap 6 is geen enkel groepje in de groepsbespreking tot de gewenste oplossing gekomen. Dit kwam voornamelijk door tijdgebrek. Omdat stap 4 was uitgelopen was voor stap 6 niet meer voldoende tijd beschikbaar. Leerlingen hadden daardoor niet de kans zelf na te gaan hoe hun oplossingen konden worden gerealiseerd. In de klassikale evaluatie is vervolgens herkenning met behulp van MHC gelijkgesteld aan herkenning middels signaalstoffen die leerlingen eerder hadden bedacht. Hierdoor is voor de leerlingen niet duidelijk geworden welke nadelen verbonden zijn aan signaalstoffen. De docent heeft bovendien niet, zoals gepland, het transport van viraal antigeen naar lymfeklieren geïllustreerd. De meeste leerlingen blijken er dan ook ten onrechte vanuit te gaan dat Tkiller-cellen viraal antigeen dat door MHC is gepresenteerd, kunnen transporteren naar de lymfeklieren.

Doelstellingen

De leerlingen hebben veelal de gewenste kennis over het immuunsysteem verworven. Zij blijken de functies en werking van de meeste onderdelen van het immuunsysteem te kennen. Bovendien beschikken ze over een adequaat beeld van de interacties tussen deze onderdelen. Daarbij blijken ze ook de kennis van onderdelen op verschillende organisatieniveaus te hebben geïntegreerd (zie bijvoorbeeld tabel 4.7.1). De leerlingen kunnen de verworven kennis over de functie en werking van onderdelen van het immuunsysteem ook veelal functioneel verantwoorden. Ze weten waarom een functie moet worden vervuld en waarom de functie zo beter wordt vervuld dan door enkele alternatieven. De volgende aspecten van de gewenste kennis hebben leerlingen niet goed begrepen:

- De meeste leerlingen gaan er ten onrechte vanuit dat de Tkiller-cel viraal antigeen dat door MHC wordt gepresenteerd, kan opnemen en vervoeren naar de lymfeklieren.
- Leerlingen weten niet waarom herkenning met behulp van MHC beter is dan herkenning middels signaalstoffen.

Voor een aantal andere aspecten van de gewenste kennis zijn er aanwijzingen dat enkele leerlingen dit niet goed hebben begrepen, maar ontbreekt informatie om dit met zekerheid te kunnen vaststellen:

- Leerlingen zouden er ten onrechte vanuit kunnen gaan dat bij fagocytose de ziekteverwekker in de celinhoud van de macrofaag wordt opgenomen i.p.v. in een ingesloten stukje buitenmilieu.
- Leerlingen zouden er ten onrechte vanuit kunnen gaan dat genherrangschikking plaatsvindt op het niveau van afzonderlijke nucleotiden.
- Leerlingen gaan er waarschijnlijk nog vanuit dat een instructiemechanisme beter is dan een selectiemechanisme. Leerlingen realiseren zich waarschijnlijk onvoldoende dat de informatieoverdracht van antigeen naar DNA moeilijk mogelijk is.

Bijstellingen van het scenario

Het onderwijsleerproces is dus grotendeels verlopen zoals verwacht en de doelstellingen zijn grotendeels gerealiseerd. De onverwachte resultaten geven echter wel aanleiding tot bijstelling van het scenario. Ik zal hier beknopt aangeven welke onderdelen moeten worden bijgesteld. Voor een gedetailleerde beschrijving van de wijzigingen verwijs ik naar de resultaatparagrafen van de betreffende stappen in dit hoofdstuk.

- In stap 2 zal tijdens de klassikale evaluatie nog aandacht moeten worden besteed aan het proces van fagocytose en de betekenis van de term lichaamseigen materiaal.
- In stap 3 zal tijdens de groepsbespreking en de klassikale evaluatie nog expliciet aandacht moeten worden besteed aan het niveau waarop herkenning plaatsvindt.
- Voor stap 4 zal ongeveer 20 minuten meer moeten worden uitgetrokken zodat het onderwijsleerproces kan worden uitgevoerd zoals gepland. Bij de behandeling van het genherrangschikkingsmechanisme zal ook het niveau waarop genherrangschikking plaatsvindt moeten worden geëxpliciteerd. De keuze voor een selectiemechanisme zal, indien nodig, met empirische argumenten moeten worden ondersteund.

Leren werken met de ontwerpheuristiek

Ook voor het leren werken met de ontwerpheuristiek wordt hier achter-eenvolgens beschreven of het onderwijsleerproces is verlopen is zoals verwacht, of de doelstellingen zijn bereikt en welke bijstellingen van het scenario nodig zijn.

Onderwijsleerproces

Ik was er vanuit gegaan dat leerlingen met de ontwerpheuristiek leren werken, wanneer deze eerst door de docent wordt gedemonstreerd en leerlingen vervolgens onder begeleiding van de docent het immuunsysteem gaan ontwerpen. Het onderwijsleerproces is vrijwel geheel verlopen zoals verwacht. De demonstratie van de ontwerpheuristiek verliep zoals gepland; leerlingen konden al in stap 2 met de ontwerpheuristiek werken. Het bleek nauwelijks nodig te zijn de leerlingen te stimuleren bij het werken met de ontwerpheuristiek. De docent heeft hiervoor de geplande ontwerp vragen gesteld. Hij heeft echter ook andere manieren gebruikt om leerlingen te stimuleren: luisteren en samenvatten; complimenteren; bevestigen van gemaakte keuzen.

Doelstellingen

De doelstellingen zijn grotendeels gerealiseerd. De leerlingen blijken al snel met de ontwerpheuristiek te kunnen werken, zowel in de individuele denkfase als in de groepsbespreking. Daarbij wordt de ontwerpheuristiek correct gehanteerd. In de groepsbespreking blijken leerlingen elkaar inderdaad te stimuleren tot het werken met de ontwerpheuristiek door elkaar ontwerp vragen te stellen en elkaars oplossingen te bekritisieren. De volgende onverwachte resultaten hebben zich voorgedaan:

- Leerlingen blijken ook andere manieren te hanteren om elkaar te stimuleren met de ontwerpheuristiek te werken: samenvatten; complimenteren; aanspreken op eigen verantwoordelijkheid.
- Leerlingen blijken soms het overzicht te verliezen over het ontwerpproces waardoor niet alle alternatieven en nadelen bij de afweging worden betrokken.
- Leerlingen maken bij het ontwerpen niet alleen gebruik van voorkennis over het systeem en de systeemomgeving, maar ook van voorkennis over functionele analogieën.

Bijstellingen van het scenario

Het onderwijsleerproces is dus vrijwel verlopen zoals verwacht en de beoogde doelstellingen zijn grotendeels gerealiseerd. Ik zal hier beknopt aangeven welke onderdelen nog moeten worden bijgesteld. In hoofdstuk 5 wordt meer in detail besproken hoe dit kan worden gerealiseerd.

- Bij de demonstratie en begeleiding van de ontwerpheuristiek dient er rekening mee te worden gehouden dat leerlingen kennis van functionele analogieën kunnen gebruiken bij het ontwerpen.
- De docent kan de manieren van stimuleren die in deze ronde zijn geïdentificeerd, in het vervolg meer systematisch gebruiken.
- De groepsbespreking zal zo moeten worden ingericht dat leerlingen het overzicht over het ontwerpproces behouden.

Conclusie en discussie

Het onderwijsleerproces is dus vrijwel verlopen zoals verwacht en de beoogde doelstellingen zijn grotendeels gerealiseerd. Er kan dan ook worden geconcludeerd dat de meeste onderdelen van het scenario adequaat zijn. Enkele onderdelen moeten worden bijgesteld. In 6.1. wordt nagegaan of met het scenario overeenkomstige resultaten mogen worden verwacht wanneer het in andere 5 en 6 VWO klassen wordt uitgevoerd door andere docenten.

Ik wil hier nog enige kanttekeningen plaatsen bij de opzet en uitvoering van het onderzoek. Voor een adequate uitvoering van het scenario bleek meer tijd nodig te zijn dan verwacht. Deze tijd had ik echter niet gereserveerd, waardoor stap 6 niet is uitgevoerd zoals bedoeld. Enkele onderdelen van het scenario, die op grond van de resultaten uit de eerste ronde waren opgenomen,

zijn daarom niet beproefd. Het was beter geweest vooraf meer tijd te reserveren voor het geven van het onderwijs, zodat uitloop mogelijk was geweest¹.

Ik heb er in dit onderzoek voor gekozen het onderwijs zelf te geven. Ik verwachtte dat daardoor het scenario kon worden uitgevoerd zoals bedoeld en adequaat kon worden omgegaan met onverwachte oplossingen en nadelen, zodat inzichten worden verkregen voor de bijstelling van het scenario. Uit de resultaten van dit onderzoek blijkt dat ik hier grotendeels in geslaagd ben. De behandeling van onverwachte oplossingen en nadelen kan echter nog wel worden verbeterd. Het blijkt vaak niet mogelijk te zijn tijdens de groepsbespreking al een overzicht te krijgen van de oplossingen en nadelen die leerlingen in de groepjes bespreken. In veel gevallen hoorde ik pas tijdens de klassikale evaluatie welke onverwachte oplossingen en nadelen leerlingen hadden bedacht. Ik had dan weinig tijd om te bepalen hoe ik hiermee zou omgaan. De behandeling van onverwachte oplossingen en nadelen zou kunnen worden verbeterd, indien de leerlingen de oplossingen en nadelen die ze tijdens de groepsbespreking bespreken op een ontwerpformulier zouden noteren. De docent kan dan onverwachte oplossingen eerder signaleren en heeft dus meer tijd om te bepalen hoe hij daar mee om wil gaan.

In dit onderzoek zijn hoofdzakelijk protocollen van de groepsbesprekingen gebruikt om na te gaan of de leerlingen hun kennis ook functioneel kunnen verantwoorden². De protocollen verschaffen hiervoor ook meestal voldoende informatie. In de meeste gevallen verwoorden de leerlingen in de groepsbespreking ook de argumenten voor hun keuze, zodat voor alle leerlingen van het groepje direct kan worden nagegaan of ze hun kennis functioneel kunnen verantwoorden. In sommige gevallen kan echter voor een bepaalde leerling wel worden vastgesteld dat hij of zij na een discussie van standpunt is veranderd, maar heeft de betreffende leerling de argumenten voor zijn keuze niet uitgesproken. Ik ben er in die gevallen vanuit gegaan, dat de leerling de argumenten die de andere leerlingen voor de betreffende keuze aanvoeren, begrijpt en onderschrijft. Deze aanname hoeft echter niet altijd correct te zijn. Het is dan ook beter om in het vervolg voor elke stap toepassingsvragen op te nemen, waarmee voor individuele leerlingen kan worden nagegaan of ze hun kennis functioneel kunnen verantwoorden.

¹ De tijdsoverschrijding heeft ook consequenties voor de praktische haalbaarheid van het scenario. Deze consequenties worden in 6.1 nader besproken.

² Functionele verantwoording van kennis is alleen middels toepassingsvragen getoetst, wanneer ik verwacht dat leerlingen pas in de klassikale evaluatie tot een globale typering van het gewenste mechanisme en bijbehorend nadeel komen.

5

Ontwerpend leren

In 2.3 is de domeinspecifieke onderwijsbenadering ontwerpend leren gepresenteerd. Deze onderwijsbenadering heeft richting gegeven aan de ontwikkeling van een scenario over immunologie. In een cyclisch proces van bedenken en beproeven is het scenario in twee ronden bijgesteld. Ontwikkeling, uitvoering en evaluatie van het scenario heeft tevens geleid tot beproeving en nadere uitwerking van de onderwijsbenadering ontwerpend leren. In dit hoofdstuk zal dan ook voor de richtlijnen die in 2.3 zijn geformuleerd, worden nagegaan of ze adequaat waren en hoe ze verder kunnen worden uitgewerkt. Bij het bespreken van de richtlijnen zal ik de volgorde aanhouden die ook in 2.3 is gehanteerd. Achtereenvolgens worden besproken: de ontwerpheuristiek (5.1); de doelstellingen van ontwerpend leren (5.2); de inrichting en uitvoering van ontwerpend leren (5.3); de ontwikkeling van scenario's (5.4).

5.1 Een ontwerpheuristiek voor leerlingen

Een centraal element in de onderwijsbenadering ontwerpend leren is de ontwerpheuristiek. Het is gebleken dat deze heuristiek leerlingen kan sturen bij het ontwikkelen van kennis over het immuunsysteem. Voor het uitvoeren van stap 1, 3 en 5 van de ontwerpheuristiek zijn aanvullende aanwijzingen geformuleerd (figuur 5.1.1). Deze aanwijzingen worden hieronder besproken.

Stap 1

Ontwerpen begint met het bepalen van de functie van het systeem als geheel. In beide ronden stelde ik leerlingen vragen aan de hand waarvan zij de functie nader konden bepalen. Deze stap zou meer aan leerlingen kunnen worden overgelaten als ze aanwijzingen krijgen hoe ze de functie van een systeem kunnen bepalen. Deze aanwijzingen had ik echter in de eerste en tweede ronde nog niet geëxpliciteerd. Analyse van de bovengenoemde vragen en van de wijze waarop ik als ontwikkelaar de functies van sommige onderdelen van het systeem heb vastgesteld, leidde tot de volgende aanwijzingen.

1	Bepaal de functie van het systeem als geheel	a	Ga naar wat de functie is van het suprasysteem
		b1	Ga na welk nadeel zich voordoet wanneer het systeem ontbreekt
		of:	
		b2	Ga naar 2
2	Formuleer het ontwerpprobleem		
3	Bedenk meerdere oplossingen voor het ontwerpprobleem	a	Ga na waar het ontwerpprobleem op lijkt
		b	Ga na hoe de oplossing kan worden gerealiseerd
4	Bedenk voor iedere oplossing één of meerder nadelen		
5	Kies de oplossing met de minste nadelen en ga naar 2	a	Ga na of de oplossing niet eenvoudiger kan

Figuur 5.1.1

De ontwerpheuristiek met aanvullende aanwijzingen

De functie van een systeem kan worden bepaald door de ontwerpheuristiek toe te passen op een hoger systeemniveau. Men zal dan ook eerst de functie moeten bepalen van het suprasysteem waar het betreffende systeem onderdeel van is (figuur 5.1.1: 1a). De functie van het systeem kan nu worden bepaald door na te gaan welk nadeel zich voordoet wanneer het betreffende systeem ontbreekt (figuur 5.1.1: 1b1). Op deze manier leert men tevens waarom de functie moet worden vervuld. Ik zal deze procedure met een voorbeeld illustreren.

Stel je wilt de functie van de boezem van het hart bepalen. Je gaat dan eerst na wat de functie is van het hart (supra-systeem). Het hart zorgt er voor dat het bloed door het bloedvatstelsel wordt gepompt. Je kunt nu de functie van de boezem bepalen door na te gaan welk nadeel zich zou voordoen wanneer de boezems zouden ontbreken en het hart dus alleen uit twee kamers zou bestaan. Wanneer een kamer het bloed in de slagaders heeft gepompt, zal hij zich opnieuw moeten vullen. Doordat de bloeddruk in de aders zeer laag is, kan de kamer zich alleen maar langzaam en onvolledig vullen. Hierdoor kan er (steeds) minder bloed per tijdseenheid worden weggepompt. Dit nadeel zou kunnen worden opgelost wanneer de boezem het bloed uit de aders zou aanzuigen en in de kamer zou persen, waardoor de kamer sneller en vollediger wordt gevuld. Dit effect zou nog kunnen worden versterkt wanneer de boezem zoveel bloed in de kamer perst dat de gespierde wand van de kamer iets wordt opgerekt waardoor de kamer weer krachtiger kan samentrekken. De boezem vervult dus de functie van zuigperspomp.

Het nadeel van het ontbreken van een systeem kan alleen worden vastgesteld als er voldoende kennis beschikbaar is over het suprasysteem waarvan het systeem deel uitmaakt. Indien deze kennis ontbreekt zal men dit suprasysteem opnieuw moeten ontwerpen (figuur 5.1.1: 1b2). In vervolgonderzoek zal nog moeten worden nagegaan of leerlingen met behulp van deze aanwijzingen zelf de functie van een systeem kunnen bepalen.

Stap 3

In deze stap bedenken leerlingen oplossingen voor het ontwerpprobleem. Uit de eerste ronde bleek dat sommige leerlingen nog geremd waren oplossingen te bedenken. Ik heb hen hiertoe gestimuleerd door aan te geven dat ze 'creatieve' oplossingen mogen bedenken. In de tweede ronde bleek dat het voldoende was deze aanwijzing bij de introductie van de ontwerpheuristiek aan te bieden (4.8). Ik had echter de aard van 'creatieve' oplossingen nog niet gespecificeerd. Uit de analyse van ontwerpformulieren en de protocollen blijkt dat leerlingen bij het formuleren van 'creatieve' oplossingen veelal functionele analogieën gebruiken (4.8). Dit zijn systemen die een vergelijkbare functie vervullen in een andere context. Dit kunnen biologische analogieën zijn (herkenning zoals bij een enzym-substraat complex) en niet-biologische analogieën (herkenning zoals bij sleutel en slot). Leerlingen blijken dus bij het ontwerpen niet alleen, zoals verwacht, gebruik te maken van voorkennis over het systeem en de systeemomgeving, maar tevens van functionele analogieën. De aanwijzing 'bedenk een creatieve oplossing' kan dan ook worden gespecificeerd in de aanwijzing 'ga na waar het ontwerpprobleem op lijkt'.

In de eerste ronde blijken leerlingen bij het bedenken van oplossingen soms nog onvoldoende relevante voorkennis van het systeem te activeren. Uit de tweede ronde blijkt dat dit probleem kan worden voorkomen door leerlingen er tijdens de introductie van de ontwerpheuristiek op te wijzen dat ze voor een oplossing ook moeten nagaan hoe deze kan worden gerealiseerd (4.8).

Stap 5

In deze stap gaan leerlingen na welke oplossing de minste nadelen heeft. Leerlingen blijken vaak uit de set van reeds bedachte oplossingen de oplossing met de minste nadelen te kiezen. Deze oplossing kan echter onderdelen bevatten waarvan ze nog niet expliciet hebben nagegaan waarom deze nodig zijn en die in sommige gevallen ook niet nodig zijn. Ik heb in de eerste ronde leerlingen af en toe moeten vragen of de oplossing niet eenvoudiger kan (3.8). Deze aanwijzing kan voortaan ook bij de introductie van de ontwerpheuristiek worden aangeboden. Het kan leerlingen helpen bij het kritisch beoordelen van hun oplossing(-en) en het genereren van nieuwe, eenvoudigere, oplossingen.

Samenvattend kan worden vastgesteld dat de ontwerpheuristiek leerlingen stuurt bij het ontwikkelen van kennis over een biologisch systeem. Daarbij wordt gebruik gemaakt van voorkennis over het systeem, de systeemomgeving en van functionele analogieën. Er zijn enige aanvullende aanwijzingen geformuleerd die leerlingen kunnen helpen bij het uitvoeren van de stappen uit de ontwerpheuristiek.

5.2 Doelstellingen van ontwerpnd leren

Ik wil het onderwijs zo inrichten dat leerlingen een biologisch systeem leren begrijpen en met de ontwerpheuristiek leren werken. Het ontwikkelingsonderzoek heeft meer inzicht verschaft in de haalbaarheid van beide doelstellingen.

Begrijpen van een biologisch systeem

Leerlingen blijken middels ontwerpnd leren adequate kennis te ontwikkelen over de functie en werking van een biologisch systeem, i.c. het immuunsysteem (4.10). Deze kennis is ook geïntegreerd. Leerlingen hebben niet alleen relaties gelegd tussen de verschillende onderdelen van het systeem, maar ook tussen het systeem en de systeemomgeving. Leerlingen kunnen deze kennis ook veelal functioneel verantwoorden. Ze kunnen aangeven waarom functies van onderdelen van het immuunsysteem moeten worden vervuld en weten veelal ook waarom een functie zo beter wordt vervuld dan door alternatieven.

Functionele verantwoording van de verworven kennis blijkt echter om twee redenen niet altijd haalbaar te zijn. De eerste reden heeft te maken met de aard van biologische systemen. Leerlingen bedenken soms alternatieven die minder nadelen hebben dan de werkelijke oplossing maar die niet kunnen zijn ontstaan door systeem-, ontogenetische en/of evolutionaire beperkingen (SEO-beperkingen). Het ontbreekt leerlingen veelal aan kennis van deze beperkingen en het voert in het kader van een lessenserie vaak te ver om uit te leggen waarom een dergelijk alternatief niet kan zijn ontstaan. Zo wordt in stap 4 van de lessenserie de evolutionaire achtergrond van de taakverdeling tussen macrofagen en B-cellen niet behandeld. Leerlingen leren dan wel dat hun alternatief niet mogelijk is, maar weten niet precies waarom dit het geval is.

Een tweede reden waarom een functionele verantwoording van kennis niet altijd haalbaar is, heeft te maken met de gangbare opbouw van het biologiecurriculum. Ontwerpnd leren stelt bepaalde eisen aan de selectie en ordening van de leerstof. Een onderdeel wordt, idealiter, pas behandeld wanneer de leerling inziet waarom de functie van het betreffende onderdeel moet worden vervuld. Deze eis kan er toe leiden dat bepaalde onderwerpen niet zouden moeten worden behandeld die nu wel in het curriculum zijn opgenomen of dat onderwerpen op een ander moment zouden moeten worden behandeld dan in het reguliere curriculum gebruikelijk is. Zo zou het gegeven dat klonering in de lymfeklier plaatsvindt eigenlijk niet kunnen worden behandeld in de lessenserie over immunologie omdat leerlingen dit (nog) niet kunnen verantwoorden. Ik heb dit echter wel aan de orde moeten stellen omdat dit in de eindtermen is opgenomen. Functionele verantwoording is dus binnen de gangbare opbouw van het biologiecurriculum niet altijd haalbaar. In 6.2 wordt nagegaan hoe het cur-

riculum zou moeten worden ingericht opdat functionele verantwoording van kennis wel mogelijk is en leerlingen productief kunnen voortbouwen op eerder verworven kennis.

Als leerlingen de kennis, om de twee eerder genoemde redenen, niet functioneel kunnen verantwoorden, betekent dit niet dat verantwoording helemaal niet mogelijk is. In dergelijke gevallen is het immers ook mogelijk om de aangeboden kennis met empirische argumenten te onderbouwen (zie 4.5 voor een voorbeeld).

Werken met de ontwerpheuristiek

Ik verwachtte ook dat leerlingen middels ontwerpend leren met de ontwerpheuristiek leren werken. Leerlingen blijken al direct na de introductie van de heuristiek, zowel individueel als in groepjes, met de heuristiek te kunnen werken (4.8). Het lijkt alsof leerlingen het heel natuurlijk vinden biologische systemen te benaderen alsof het optimale ontwerpen zijn. Dit betekent niet dat de impliciete aannames die leerlingen hanteren over de aard van optimale ontwerpen in de natuur helemaal adequaat zijn. In het empirisch deel van het ontwikkelingsonderzoek zijn de aannames die leerlingen hanteren niet geëxpliciteerd, maar dit onderzoek heeft hierover indirect wel aanwijzingen verschaft. Zo blijken leerlingen het moeilijk te kunnen accepteren dat de diversiteit van antistoffen wordt gegenereerd door een selectiemechanisme (4.5). Een instructiemechanisme heeft namelijk minder nadelen dan een selectiemechanisme. Het bleek moeilijk te zijn leerlingen ervan te overtuigen dat de overdracht van informatie van antigeen naar DNA zo complex is dat het onwaarschijnlijk is dat een instructiemechanisme ooit is ontstaan.

Leerlingen lijken er vanuit te gaan dat biologische systemen in hun aanpassing alleen door de functie en de omgeving en niet of nauwelijks door SEO-beperkingen worden begrensd. Deze aanname is in veel gevallen ook vruchtbaar (zie 2.2.4). Veel (onderdelen van) biologische systemen worden namelijk in hun aanpassing ook niet of nauwelijks door SEO-beperkingen begrensd. Wanneer dit echter wel het geval is, kan het voorkomen dat leerlingen een alternatieve oplossing bedenken die minder nadelen heeft dan de oplossing die in de natuur is geselecteerd, maar die door de SEO-beperkingen niet kan zijn ontstaan. Leerlingen zullen in zo'n geval niet de werkelijke oplossing moeten kritiseren maar, indien mogelijk, samen met de docent moeten nagaan welke SEO-beperkingen er voor verantwoordelijk zijn dat de verwachte oplossing niet is ontstaan.

Ik acht het dan ook van belang dat leerlingen reflecteren op het idee van optimaal ontwerp in de natuur. Op deze manier kunnen eventuele misconcepten die door het werken met de ontwerpheuristiek zijn ontstaan of blijven voortbestaan, beargumenteerd worden bijgesteld. Dit leidt op zijn beurt dan

weer tot meer inzicht in waarom, wanneer en hoe met de ontwerpheuristiek kan worden gewerkt. In 6.2 wordt nader verkend hoe de reflectie op het idee van optimaal ontwerp kan worden vormgegeven.

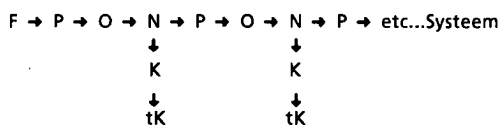
Samenvattend kan worden vastgesteld dat middels ontwerpend leren de beoogde doelstellingen grotendeels kunnen worden gerealiseerd: leerlingen begrijpen een biologisch systeem en kunnen met de ontwerpheuristiek werken. Functionele verantwoording van kennis blijkt echter soms niet haalbaar te zijn. Bovendien kunnen misconcepten ontstaan of blijven voortbestaan over het idee van optimaal ontwerp in de natuur.

5.3 Inrichting en uitvoering van ontwerpend leren

Ik ben er vanuit gegaan dat leerlingen een biologisch systeem leren begrijpen en leren werken met de ontwerpheuristiek, wanneer ze onder begeleiding van de docent een biologisch systeem ontwerpen. Een aantal fasen heb ik daarbij onderscheiden (figuur 5.3.1). Ik heb richtlijnen geformuleerd die specifiek zijn voor een fase en richtlijnen die betrekking hebben op meerdere fasen. In deze paragraaf zal voor de faseoverstijgende en fasespecifieke richtlijnen worden nagegaan of ze adequaat zijn gebleken en hoe ze nader kunnen worden uitgewerkt.

Faseoverstijgende richtlijnen

In 2.3.3 zijn faseoverstijgende richtlijnen geformuleerd voor het leren begrijpen van een biologisch systeem en voor het leren werken met de ontwerpheuristiek. Tijdens het onderzoek zijn tevens de kerncompetenties nader omschreven waarover een docent moet beschikken om ontwerpend leren adequaat te begeleiden. Deze drie sets faseoverstijgende richtlijnen zullen achtereenvolgens worden besproken.



Figuur 5.3.1

Inrichting en uitvoering van ontwerpend leren

- 1 Introductie van de functie van het systeem (F)
- 2 Introductie van het ontwerpprobleem (P)
- 3 De leerlingen bedenken oplossingen en nadelen (→ O → N)
- 4 Docent biedt aanvullende kennis over het systeem aan (K)
- 5 De leerlingen passen verworven kennis over het systeem toe (tK)
- 6 Ga naar 2 tot de gewenste kennis over het systeem is ontwikkeld (Systeem)

Leren begrijpen van een biologisch systeem

Voor het verwerven van de gewenste kennis is gekozen voor de volgende opzet. Ik wilde het onderwijs zo inrichten dat leerlingen, na de introductie van de functie van het systeem, stapsgewijs ontdekken hoe deze functie wordt vervuld. In elke stap lossen leerlingen een ontwerpprobleem op en formuleren ze een nadeel van hun oplossing. Dit nadeel wordt in de volgende stap dan weer geherformuleerd tot het volgende ontwerpprobleem etc. (figuur 5.3.1). Ik verwachtte dat leerlingen op deze manier niet alleen de gewenste kennis over het systeem zouden verwerven, maar ook actief betrokken zouden zijn bij hun eigen leerproces, omdat ze zelf formuleren waarom hun kennis moet worden uitgebreid of bijgesteld. Het onderzoek heeft aangetoond dat een dergelijke opzet uitvoerbaar en effectief is (4.10). Leerlingen hebben veelal de gewenste kennis over het immuunsysteem verworven. In de meeste gevallen hebben leerlingen ook zelf het nadeel van een oplossing geformuleerd of erkend. De leerlingen rapporteren ook dat ze actief betrokken zijn geweest bij de lessen (4.9).

Uit het onderzoek blijkt echter ook dat het niet altijd mogelijk is een probleemstructuur te ontwikkelen waarbij elke eindoplossing voor een ontwerpprobleem maar één nadeel heeft en dus leidt tot één nieuw ontwerpprobleem. Een eindoplossing kan ook meerdere nadelen hebben. Omdat veelal slechts één ontwerpprobleem per stap kan worden behandeld, zal de behandeling van de overige nadelen moeten worden uitgesteld. Ik zal dit illustreren met een voorbeeld.

De macrofaag die in stap twee van de lessenserie wordt behandeld, heeft twee nadelen: (1) hij kan lichaamseigen materiaal fagocyteren; (2) hij kan virusgeïnfecteerde cellen niet onschadelijk maken. Ik heb er voor gekozen eerst het eerste nadeel te behandelen omdat de kennis die leerlingen hierbij verwerven, kan worden gebruikt bij het oplossen van het tweede nadeel.

Leren werken met de ontwerpheuristiek

Ik ben er vanuit gegaan dat leerlingen met de ontwerpheuristiek leren werken als de docent eerst het werken ermee demonstreert en vervolgens leerlingen onder zijn begeleiding een biologisch systeem laat ontwerpen. Deze globale aanpak blijkt adequaat te zijn. Beproeving in de praktijk heeft echter wel geleid tot enkele wijzigingen en nadere uitwerking van onderdelen van deze aanpak. Ik ging er vanuit dat de docent leerlingen de ontwerpheuristiek moet demonstreren vóór de introductie van de functie van het systeem. Uit de tweede ronde blijkt echter dat de demonstratie beter kan plaatsvinden tijdens de introductie van het eerste ontwerpprobleem (4.8). De docent kan dan het werken met de ontwerpheuristiek expliciteren en demonstreren aan de hand van het onderwijsleerproces dat tijdens de introductie van de functie van het systeem heeft plaatsgevonden. In deze fase zijn immers alle stappen van de ontwerpheuristiek al impliciet doorlopen. In 5.1 is reeds besproken welke aanvul-

lende aanwijzingen de docent kan aanbieden bij de introductie van de ontwerpheuristiek.

Leerlingen blijken bovendien sneller dan verwacht zelfstandig, zowel individueel als in groepjes, met de ontwerpheuristiek te kunnen werken (4.8). Het blijkt nauwelijks nodig te zijn om leerlingen feedback te geven op het gebruik van de ontwerpheuristiek. Ook was het nauwelijks nodig leerlingen te stimuleren de ontwerpheuristiek te gebruiken door hen ontwerp vragen te stellen. Leerlingen kunnen vaak al worden gestimuleerd door naar ze te luisteren en hun oplossingen samen te vatten, ze te complimenteren met de oplossing of de gemaakte keuze te bevestigen. Leerlingen stimuleren elkaar in de groepjes, zoals verwacht, tot gebruik van de ontwerpheuristiek. Ze gaan niet alleen van elkaars oplossingen na hoe ze kunnen worden gerealiseerd en wat de nadelen zijn, maar stellen elkaar ook ontwerp vragen.

Kerncompetenties van de docent voor het begeleiden van ontwerpend leren

In 2.3.3 heb ik zowel per fase als faseoverstijgend een aantal richtlijnen geformuleerd voor de docent. Het onderzoek heeft veelal geleid tot nadere uitwerking van deze richtlijnen. Het zelf begeleiden van ontwerpend leren en protocolanalyse hebben tevens meer inzicht gegeven in de voorwaarden waaraan een docent moet voldoen om deze richtlijnen ook adequaat te kunnen uitvoeren. Ik heb deze voorwaarden in een viertal kerncompetenties samengevat: terughoudendheid, creativiteit en kritische zin, welwillendheid, doelgerichtheid.¹

terughoudendheid

Bij ontwerpend leren wordt van leerlingen verwacht dat ze zelf oplossingen en bijbehorende nadelen bedenken. Leerlingen kunnen alleen zelf nadenken wanneer de docent zich terughoudend opstelt (vgl. Boekaerts & Simons, 1995). Dit betekent onder meer dat leerlingen voldoende tijd moeten krijgen om zelf oplossingen en nadelen te bedenken. Wanneer leerlingen de gewenste kennis echter niet zelf ontwikkelen, zal de docent zich ook in zijn feedback terughoudend moeten opstellen. Dit betekent dat een docent zo lang mogelijk moet uitstellen zelf (elementen van) de oplossing of het nadeel aan te bieden. Uit het onderzoek blijkt dat luisteren en samenvatten, complimenteren en bevestigen dat leerlingen op de goede weg zitten, vaak al voldoende is om leerlingen verder te laten denken (4.8). Wanneer dit niet voldoende is, kan de docent nog één of meerdere bijbehorende ontwerp vragen stellen (waar lijkt het op?; hoe kan de

¹ Naast deze vier kerncompetenties dient de docent ook over vaardigheden te beschikken die in het algemeen gelden voor het geven van goed onderwijs, zoals interpersoonlijke vaardigheden (Wubbels et al., 1993) en basisvaardigheden voor het begeleiden van individueel werken, groepswork en een onderwijsleergesprek (Ebbens et al., 1996). Deze vaardigheden zullen hier niet worden gespecificeerd.

oplossing worden gerealiseerd? etc.). Is dit niet voldoende, dan kan de docent altijd nog de benodigde voorkennis of een functionele analogie aanbieden.

Voor een dergelijke terughoudende aanpak is tijd nodig. Deze zal niet altijd beschikbaar zijn. Vertrouwen in de leerling en zelfvertrouwen blijken echter even belangrijk te zijn. In de tweede ronde heb ik mij meer terughoudend kunnen opstellen doordat ik meer vertrouwen had in de mogelijkheden van de leerlingen en in mijn eigen mogelijkheden om adequaat met oplossingen en nadelen van leerlingen om te gaan.

creativiteit en kritische zin

Ontwerpend leren veronderstelt bij leerlingen een creatieve en een kritische houding. Een creatieve houding veronderstelt de bereidheid om fouten te maken en een kritische houding de bereidheid fouten op te sporen en te corrigeren (Popper, 1962). De docent kan deze houding bevorderen wanneer hij deze ook zelf bezit. Uit het onderzoek blijkt dat sommige leerlingen met name in het begin geremd zijn om creatieve oplossingen te bedenken (3.8). De docent kan een creatieve houding bevorderen door leerlingen te complimenteren wanneer ze speculatieve oplossingen bedenken (zoals een wielklem) en door hen te vragen waar het ontwerpprobleem op lijkt. Een kritische houding kan worden bevorderd door leerlingen te complimenteren wanneer ze oplossingen (van elkaar) kritisch beoordelen en hen te vragen hoe een oplossing moet worden gerealiseerd, wat de nadelen zijn en hoe het eenvoudiger kan. Het is belangrijk dat deze houding ook wordt beloond wanneer leerlingen kritisch staan tegenover de gewenste eindoplossing. Dit betekent dat de docent ook kritisch moet staan tegenover zijn eigen kennis.

welwillendheid

De docent zal ook leerlinguitspraken moeten interpreteren. Het is niet altijd onmiddellijk duidelijk wat een leerling met een oplossing en een nadeel bedoelt. Het adequaat interpreteren van leerlinguitspraken vraagt om een welwillende houding van de docent (Klaassen, 1995). De docent dient er in eerste instantie vanuit te gaan dat de oplossing van de leerling adequaat is, gegeven het probleem zoals hij dit opvat. Wanneer hij vermoedt dat een oplossing niet adequaat is, dient hij er in eerste instantie vanuit te gaan dat hij deze nog niet goed heeft begrepen (zie 4.1).

Uit het onderzoek blijkt echter ook dat misinterpretaties kunnen ontstaan wanneer de docent juist te snel concludeert dat de oplossing wel adequaat is, omdat deze past in de verwachtingen die in het scenario zijn geformuleerd. Ik zal dit illustreren met een voorbeeld.

Zo formuleerde een leerling in de eerste ronde als nadeel van een eetcel dat deze eigen cellen kan aanvallen. Ik had een dergelijk nadeel ook verwacht en ging er als vanzelfsprekend vanuit dat de leerling hiermee ook lichaamseigen materiaal bedoelde. Het bleek echter dat de leerling met eigen cellen alleen aan andere eetcellen had gedacht.

Voor een adequate interpretatie is het dan ook van belang dat deze enigszins wordt uitgesteld en dat leerlingen wordt gevraagd wat ze met een oplossing bedoelen. Ook zal de docent regelmatig moeten toetsen of zijn interpretatie wel correct is door deze weer aan de betreffende leerling voor te leggen.

doelgerichtheid

De eerder genoemde kerncompetenties zijn voornamelijk gericht op het optimaliseren van de inbreng van de leerlingen tijdens het onderwijsleerproces. De docent zal er echter tegelijkertijd voor moeten zorgen dat leerlingen de beoogde doelen bereiken. Uit dit onderzoek blijkt dat het daarvoor vooral van belang is dat de docent het scenario goed kent (vgl. Vollebregt, 1998). Dit betekent onder meer dat hij een goed overzicht moet hebben van de mogelijke typen oplossingen en nadelen waarmee leerlingen in de betreffende stap kunnen komen. Dit maakt het mogelijk om overeenkomsten en belangrijke verschillen te constateren in de diversiteit aan oplossingen die leerlingen genereren. Dan wordt ook duidelijk wanneer leerlingen een onverwachte oplossing presenteren, waar vervolgens aandacht aan kan worden besteed.

Bovendien is het van belang inzicht te hebben in de hoofdlijn van het scenario voor de hele lessenserie, omdat dan vastgesteld kan worden of leerlingen al vooruit lopen op oplossingen en nadelen die in de volgende stappen aan de orde komen. Leerlingen kan dan worden gezegd dat op een later tijdstip op deze alternatieven zal worden ingegaan. Deze kennis is ook van belang om de hoofdlijn van redenering uit de voorafgaande stappen voor leerlingen te kunnen samenvatten.

Samenvattend kan worden vastgesteld dat de faseoverstijgende richtlijnen grotendeels adequaat blijken te zijn en, waar nodig, nader zijn uitgewerkt. Het blijkt dus mogelijk te zijn het onderwijs zo in te richten dat leerlingen uitgaande van de functie van het systeem stapsgewijs de gewenste kennis ontwikkelen, waarbij ze zelf formuleren waarom ze deze kennis moeten uitbreiden of bijstellen. Soms zal echter een oplossing meerdere nadelen hebben en zal de behandeling van een nadeel moeten worden uitgesteld. Leerlingen leren met de ontwerpheuristiek te werken wanneer deze eerst door de docent wordt gedemonstreerd en leerlingen daarna met elkaar en onder begeleiding van de docent een biologisch systeem ontwerpen. De demonstratie blijkt echter beter tijdens de introductie van het eerste ontwerpprobleem te kunnen plaatsvinden en stimuleren en feedback door de docent blijken nauwelijks nodig te zijn. Bovendien

zijn aanvullende richtlijnen geformuleerd voor de demonstratie en stimulering door de docent. Tenslotte zijn er vier kerncompetenties van de docent geformuleerd voor het adequaat begeleiden van ontwerpend leren: terughoudendheid, creativiteit en kritische zin, welwillendheid en doelgerichtheid.

Fasespecifieke richtlijnen

Bij ontwerpend leren kunnen enige fasen worden onderscheiden (figuur 5.3.1). In deze paragraaf zal voor elk van deze fasen worden nagegaan of de richtlijnen die hiervoor in 2.3.3 zijn geformuleerd adequaat zijn en hoe ze verder kunnen worden uitgewerkt.

1. Introductie van de functie van het systeem

Ik ben er vanuit gegaan dat in deze fase de functie van het systeem nader wordt gespecificeerd en dat leerlingen leren waarom het nodig is dat deze functie moet worden vervuld. Leerlingen weten dan voor welke functie ze een systeem gaan ontwerpen en weten ook waarom dit nodig is. Uit de resultaten van de eerste en tweede ronde blijkt dat deze aanpak ook adequaat is (4.2). Een nadere uitwerking van de ontwerpheuristiek heeft echter ook geleid tot een nadere uitwerking van deze fase.

Ten eerste zijn er aanwijzingen voor leerlingen geformuleerd voor het bepalen van de functie van het systeem (5.1). Middels deze aanwijzingen kan ook worden vastgesteld waarom de functie nodig is. Dit maakt het mogelijk dat leerlingen deze fase zelfstandiger kunnen uitvoeren². In vervolgonderzoek zal nog moeten worden nagegaan of leerlingen hiertoe in staat zijn. Ten tweede heb ik meer inzicht gekregen in het systeemniveau waarop met ontwerpen wordt begonnen. Ik ging er vanuit dat leerlingen in deze fase moeten leren waarom de functie van het betreffende systeem moet worden vervuld. Begrijpen waarom een functie nodig is, kent echter verschillende niveaus. Leerlingen zullen tenminste moeten weten wat het nadeel is voor het suprasysteem wanneer de functie van het betreffende systeem niet wordt vervuld. Leerlingen weten echter nog beter waarom de functie van het systeem nodig is als ze ook weten waarom de functie van het suprasysteem moet worden vervuld. Ik zal dit met een voorbeeld illustreren.

De leerling weet waarom de functie van de boezem moet worden vervuld als hij zich realiseert dat bij het ontbreken van de boezems, de kamers van het hart zich onvoldoende en te traag zullen vullen en het hart dus zijn functie niet goed kan vervullen. Een leerling weet echter nog beter waarom deze functie nodig is wanneer hij ook weet waarom de functie van het hart zelf moet worden vervuld. Wanneer hij dus weet welk nadeel zich voordoet als het hart zijn functie niet meer vervult.

² Dit veronderstelt echter wel dat leerlingen al in een eerdere lessenserie met de ontwerpheuristiek hebben leren werken.

Idealiter zou men op dat systeemniveau moeten beginnen waarvan leerlingen weten waarom de functie moet worden vervuld. Omdat het gangbare biologiecurriculum niet volgens dit criterium is opgebouwd zal dit in de praktijk niet altijd haalbaar zijn (5.2)³ Het onderzoek heeft inzicht verschaft in het systeemniveau waarop men minimaal moet beginnen. In deze fase zullen leerlingen namelijk ook relevante kennis van de systeemomgeving moeten activeren of, indien nodig, verwerven. Wanneer men leerlingen bijvoorbeeld de boezem wil laten ontwerpen en men verwacht dat leerlingen nog onvoldoende kennis hebben van het hart, dan zal tenminste op dat systeemniveau met ontwerpen moeten worden begonnen.

2. Introductie van het ontwerpprobleem

In deze fase wordt het ontwerpprobleem geïntroduceerd en biedt de docent, indien nodig, informatie aan over SEO-beperkingen. Het onderzoek heeft geleid tot nadere uitwerking van richtlijnen voor beide onderdelen. Het ontwerpprobleem is een herformulering van het nadeel dat eerder door leerlingen is geformuleerd. Een nadeel kan echter op verschillende manieren in een probleem worden geherformuleerd. Daarbij blijkt het van belang te zijn de probleemformulering zo dicht mogelijk te laten aansluiten bij de formulering van het nadeel. Leerlingen herkennen zich dan beter in het probleem. Bovendien wordt zo voorkomen dat er impliciet nieuwe voorwaarden worden geformuleerd waaraan de oplossing moet voldoen. Ik zal dit met een voorbeeld uit stap 3 illustreren (3.4).

Het nadeel dat macrofagen lichaamseigen materiaal kunnen fagocyteren heb ik in de eerste ronde geherformuleerd in het probleem 'hoe kan een macrofaag onderscheid maken tussen zelf en niet-zelf?' In deze formulering worden nieuwe termen geïntroduceerd (zelf en niet-zelf) en een voorwaarde waaraan de oplossing moet voldoen (macrofagen moeten in ieder geval een onderscheid kunnen maken tussen zelf en niet-zelf). Zowel de nieuwe termen als de voorwaarde waren voor leerlingen niet onmiddellijk duidelijk. In de tweede ronde heb ik het probleem dan ook zo geformuleerd dat het nauw aansluit bij het nadeel dat leerlingen hebben onderkend 'hoe kan worden voorkomen dat een macrofaag lichaamseigen materiaal fagocyteert?'

Uit het onderzoek blijkt dat een nadeel van een eindoplossing vaak pas in een volgende les tot een ontwerpprobleem wordt geherformuleerd. In dit geval is het van belang dat leerlingen hun reeds verworven kennis en de redenen waarom deze moet worden uitgebreid opnieuw activeren. Uit de eerste en tweede ronde blijkt dat dit kan worden gerealiseerd door leerlingen opnieuw te vragen waarom het probleem eigenlijk moet worden opgelost. Het belang van

³ In 6.2 worden enige aanbevelingen geformuleerd voor de inrichting van het curriculum.

het oplossen van een probleem kan soms worden ondersteund door leerlingen aan de hand van ziektebeelden te laten zien wat er gebeurt wanneer de betreffende functie niet wordt vervuld. Zo heb ik aan de hand van auto-immuunziekten geïllustreerd waarom het belangrijk is dat het immuunsysteem niet in actie komt tegen lichaamseigen materiaal.

In deze fase zal soms ook informatie moeten worden aangeboden over systeem-, evolutionaire of ontogenetische beperkingen (SEO-beperkingen) die het aantal mogelijke oplossingen begrenzen. Het onderzoek heeft enige aanwijzingen opgeleverd wanneer deze informatie moet worden aangeboden. SEO-beperkingen dienen op het moment te worden aangeboden dat leerlingen ze ook productief kunnen gebruiken bij het ontwikkelen van kennis in de gewenste richting. Enerzijds betekent dit dat moet worden voorkomen dat leerlingen een pad in de probleemruimte gaan volgen van waaruit ze niet meer tot de gewenste oplossing kunnen komen.

Zo heb ik leerlingen in de eerste ronde van de lessenserie laten nagaan hoe een macrofaag verschillende receptoren kan produceren en hun pas in de klassikale evaluatie verteld dat door evolutionaire beperkingen niet de macrofaag, maar een B-cel de verschillende receptoren produceert. Veel leerlingen bleken toen in het verloop van de lessenserie eigenschappen van B-cellen en macrofagen te verwisselen. In de tweede ronde heb ik deze informatie dan ook aangeboden tijdens de introductie van het ontwerpprobleem.

Anderzijds betekent dit dat moet worden voorkomen dat leerlingen informatie krijgen aangeboden wanneer het nog niet zinvol voor hen is.

Zo krijgen leerlingen in stap drie van de lessenserie te horen dat herkenningsstructuren eiwitten zijn (systeembeperking). Deze informatie wordt pas in de klassikale evaluatie aangeboden omdat leerlingen in de groep eerst moeten ontdekken dat herkenning nodig is en dat dit middels herkenningsstructuren kan plaatsvinden.

Het zal echter niet altijd mogelijk zijn de informatie aan te bieden op het moment dat het voor leerlingen zinvol is. Met name wanneer leerlingen deze informatie pas nodig hebben in een later stadium, kan niet aan deze eis worden voldaan. Het blijkt namelijk vrijwel onmogelijk te zijn om tijdens de groepsbespreking bij ieder groepje de juiste informatie op het juiste moment aan te bieden. In dit geval kan de informatie dan ook beter tijdens de klassikale introductie worden aangeboden. Zo krijgen leerlingen in stap vier al tijdens de klassikale introductie aangeboden dat antistoffen eiwitten zijn, terwijl ze deze informatie pas in een later stadium in de groepsbespreking kunnen gebruiken.

3. De leerlingen bedenken oplossingen en nadelen.

In deze fase gaan leerlingen oplossingen en bijbehorende nadelen bedenken voor het ontwerpprobleem. Ze doen dit eerst individueel (individuele denkfase), bespreken hun oplossingen en nadelen vervolgens in groepjes (groepsbespreking), waarna de groepsoplossingen klassikaal worden geëvalueerd (klassikale evaluatie). Uit het onderzoek blijkt dat deze drieslag werkt (4.8). Daarnaast heeft het aanwijzingen opgeleverd voor een nadere invulling van de drieslag.

individuele denkfase

Leerlingen noteren tijdens de individuele denkfase hun oplossingen en de bijbehorende nadelen op een ontwerpformulier. Uit de tweede ronde blijkt dat leerlingen veelal alleen de eindoplossing en bijbehorend nadeel op hun werkblad noteren. Het is dan ook van belang dat de docent leerlingen vraagt ook hun tussenoplossingen met de bijbehorende nadelen te noteren. Elementen uit deze oplossingen kunnen dan worden 'meegenomen' in de groepsbespreking. In vervolgonderzoek zal moeten worden nagegaan of dit werkt.

groepsbespreking

In de groepsbesprekingen worden, zoals verwacht, de ideeën uit de individuele denkfase bediscussieerd en verder ontwikkeld (4.8). Leerlingen blijken elkaar ook, zoals verwacht, te stimuleren tot het werken met de ontwerpheuristiek. Soms blijken ze echter het overzicht over het ontwerpproces te verliezen, waardoor ze niet de oplossing met de minste nadelen kiezen. Leerlingen zouden beter het overzicht kunnen behouden als zij ook in de groepsbesprekingen de oplossingen en nadelen noteren op een ontwerpformulier. Daarbij zou in elke stap van de lessenserie een andere leerling het ontwerpformulier van de groep kunnen bijhouden. Deze leerling zou dan tevens de taak kunnen krijgen de oplossingen in het groepje te inventariseren en tijdens de discussie, waar nodig, de overige groepsleden ontwerp vragen te stellen: waar lijkt het probleem op?; hoe wordt de oplossing vervuld; wat zijn de nadelen?; wat is de oplossing met de minste nadelen? kan het niet eenvoudiger? Op deze manier kan ook het stimuleren van elkaar explicieter worden vormgegeven.

Een dergelijk formulier heeft ook voordelen voor de docent. Hij krijgt zo snel een overzicht van de oplossingen en nadelen die leerlingen hebben overwogen, waardoor hij leerlingen adequater kan begeleiden. Bovendien kan de docent zo snel een overzicht krijgen van de eindoplossingen en bijbehorende nadelen die leerlingen hebben bedacht, zodat hij beter is voorbereid op de klassikale evaluatie (4.10). In vervolgonderzoek zal nog moeten worden nagegaan of deze aanwijzing ook leidt tot het gewenste resultaat.

In de klassikale evaluatie worden de groepsoplossingen en bijbehorende nadelen geïnventariseerd en wordt de eindoplossing met bijhorend nadeel gekozen of verder ontwikkeld. In de klassikale evaluatie moet, in tegenstelling tot wat ik verwachtte, ook nog regelmatig nieuwe informatie over SEO-beperkingen worden aangeboden. Leerlingen krijgen dan vervolgens opnieuw de kans na te denken over een oplossing en een nadeel. Hebben zij de elementen uit deze oplossingen al eerder bedacht, dan kan hun de gelegenheid worden geboden individueel even over het probleem na te denken (zoals bijvoorbeeld in stap 3 en 4 van de lessenserie is gebeurd). Wanneer ze echter een geheel nieuwe oplossing moeten bedenken, is het beter om leerlingen daar eerst weer individueel en daarna in groepjes over te laten nadenken. In dit geval is het dus beter een nieuwe stap te beginnen.

Wanneer leerlingen een eindoplossing niet functioneel kunnen verantwoorden, omdat hier SEO-beperkingen aan ten grondslag liggen (zoals het selectiemechanisme uit stap 4), is het van belang de klassikale evaluatie nog uit te breiden met een empirische argumentatie. Nu zal men veelal niet de middelen en tijd ter beschikking hebben om de empirische toetsing door de leerlingen zelf te laten uitvoeren. Het is echter wel mogelijk leerlingen voor hun alternatief en voor de eindoplossingen voorspellingen te laten doen (zie 4.5 voor een voorbeeld). De docent kan dan vervolgens de resultaten van empirisch onderzoek mededelen.

Ervaring met de begeleiding van ontwerpend leren en analyse van de protocollen met betrekking tot de begeleiding tijdens de klassikale evaluatie hebben tevens aanvullende aanwijzingen voor de docent opgeleverd. Het blijkt van belang te zijn dat de docent tijdens de inventarisatie van de groepsoplossingen er op toeziet dat de leerlingen hun (complete) groepsoplossing rapporteren. Wanneer dit niet het geval is, kan de docent hier naar vragen. Meningsverschillen binnen een groep over de eindoplossing dienen ook te worden gerapporteerd. De docent moet voorkomen dat tijdens de inventarisatie al over oplossingen wordt gediscussieerd. De docent kan de groepsoplossingen van leerlingen, indien mogelijk, onderbrengen in de categorieën die ook in het scenario zijn gebruikt om de oplossingen en nadelen te classificeren. Dit maakt de discussie zowel voor de docent als de leerlingen overzichtelijker. Voor de herkenbaarheid naar leerlingen toe is het daarbij van belang (af en toe) de termen te gebruiken die leerlingen gebruiken om hun oplossing mee aan te duiden. Vervolgens kunnen de verschillende oplossingen worden afgewogen. Daarbij is het van belang dat de docent vooral ruimte geeft aan leerlingen die een afwijkende mening hebben en dat hij daar ook af en toe expliciet naar vraagt. Uiteindelijk dient een oplossing pas definitief te worden gekozen, wanneer alle leerlingen inzien waarom deze oplossing beter is dan alternatieven.

4. De docent biedt aanvullende kennis over het systeem aan

In deze fase wordt leerlingen aanvullende kennis aangeboden over de in de klassikale evaluatie geselecteerde oplossing en het bijbehorende nadeel. Uit het onderzoek blijkt dat een deel van de aanvullende kennis en bijbehorende terminologie al vaak in de klassikale introductie of evaluatie kan worden vermeld. Tijdens het ontwerpproces worden immers al vaak elementen uit de eindoplossing ontwikkeld. Zo wordt leerlingen tijdens de klassikale evaluatie van stap 3 al verteld dat de herkenningsstructuren die ze hebben ontwikkeld, receptoren worden genoemd. De introductie van aanvullende kennis en termen op deze momenten heeft als voordeel dat daarmee meteen een term ter beschikking komt om elementen uit de oplossing van leerlingen mee te duiden. Bovendien leren de leerlingen de aangeboden kennis en termen meteen toepassen in het vervolg van het ontwerpproces van de betreffende stap.

In de meeste gevallen zullen echter ook tijdens deze fase nog aanvullende kennis en termen moeten worden aangeboden. Daarbij blijkt speciale aandacht te moeten worden besteed aan de introductie van termen die voor de leerlingen bij aanvang van het onderwijs een andere betekenis hebben of die tijdens de lessenserie van betekenis veranderen. Dit laatste komt bij ontwerpend leren vaak voor omdat (onderdelen van) een systeem stap voor stap wordt opgebouwd. Ik zal van beide een voorbeeld geven.

Bij aanvang van de lessenserie gaan leerlingen er vanuit dat een antistof een soort gifstof is. In stap 4 leren ze dat er een soort verloopstekkers nodig zijn om de macrofaag te assisteren bij de herkenning en dat immunologen deze verloopstekkers antistoffen noemen. Op dat moment kan de docent leerlingen er ook op wijzen dat de term antistof dus een andere betekenis heeft dan ze oorspronkelijk dachten. Tijdens de lessenserie verandert bijvoorbeeld de term B-cel van betekenis. In stap 4 worden cellen die antistoffen produceren na contact met het antigeen B-cellen genoemd. In stap 5 leren leerlingen dat B-cellen pas antistoffen kunnen produceren na selectieve klonering in de lymfeklieren. De docent zal er dan ook expliciet op moeten wijzen, of leerlingen er naar moeten vragen, in welke opzichten de betekenis van de term is veranderd.

In de lessenserie heb ik de uitleg over (de veranderende betekenis van) termen ondersteund met een afbeelding van het systeem die in elke stap van de lessenserie werd uitgebreid. Bijkomend voordeel van een dergelijke presentatie is dat leerlingen zo geholpen worden het overzicht over het systeem te behouden.

5. De leerlingen passen de verworven kennis toe

Na afloop van iedere stap krijgen leerlingen toepassingsvragen aangeboden waarmee kan worden nagegaan of ze adequate kennis hebben verworven over de functie en werking van (onderdelen van) een biologisch systeem. Het blijkt echter zinvol te zijn om tevens toepassingsvragen op te nemen waarmee kan worden nage-

gaan of leerlingen de verworven kennis functioneel kunnen verantwoorden (4.10).

Samenvattend kan worden vastgesteld dat de fasespecifieke richtlijnen veelal adequaat blijken te zijn. Alleen aanvullende informatie blijkt soms beter eerder te kunnen worden verstrekt. Tevens heeft het onderzoek bijgedragen aan een nadere uitwerking en aanvulling van de richtlijnen, er is gespecificeerd: hoe de functie kan worden bepaald; op welk systeemniveau met ontwerpen moet worden begonnen; waar men op moet letten bij de introductie van het ontwerpprobleem; wanneer informatie over SEO-beperkingen moet worden aangeboden; hoe de inrichting van de individuele denkfase en groepsbespreking kan worden verbeterd; hoe aanvullende informatie over geselecteerde oplossingen en bijbehorende nadelen moet worden aangeboden; en voor welke aspecten van de gewenste kennis toepassingsvragen moeten worden opgenomen.

5.4 Ontwikkeling van scenario's

In de onderwijsbenadering ontwerpend leren is ook beschreven hoe een scenario met de gewenste kenmerken kan worden ontwikkeld. Drie fasen kunnen worden onderscheiden. In de eerste fase ontwerpt de ontwikkelaar zelf met behulp van de ontwerpheuristiek het systeem. Op deze manier wordt een voorlopige probleemstructuur verkregen. In de tweede fase wordt deze probleemstructuur aangepast aan de leerlingen en beschreven in een scenario. In de derde fase wordt het onderwijs uitgevoerd en geëvalueerd. Indien nodig wordt de probleemstructuur opnieuw aangepast. Middels deze cyclische procedure is in twee ronden een scenario voor immunologie ontwikkeld dat grotendeels aan de gewenste kenmerken voldoet. Ervaring met en reflectie op deze

ontwerpprobleem	oplossing	nadeel
hoe kan een binnen-gedrongen ziekteverwekker onschadelijk worden gemaakt?	macrofaag	een virusgeïnfecteerde cel kan niet onschadelijk worden gemaakt
hoe kan een virus-geïnfecteerde cel onschadelijk worden gemaakt?	Tkiller-cel	kan ook gezonde lichaamseigen cellen aanvallen (dit nadeel geldt ook voor de macrofaag)
hoe kan een onderscheid worden gemaakt tussen lichaamseigen materiaal en de ziekteverwekker?	herkenning (antigeen/receptor)	
	• van de ziekteverwekker	veel verschillende receptoren nodig
	• van lichaamseigen materiaal	?

Figuur 5.4.1

Een gedeelte van het ontwerpproces van de ontwikkelaar

procedure heeft geleid tot nadere uitwerking van de richtlijnen.

Hier worden alleen de uitgewerkte richtlijnen voor de eerste twee fasen gepresenteerd. Uitgewerkte richtlijnen voor de evaluatie van het onderwijs zijn beschreven in 4.1.

Zelf ontwerpen van het systeem

Ik heb de ontwerpheuristiek gebruikt bij het ontwerpen van het immuunsysteem. Ik raadpleegde hierbij af en toe tekstboeken over immunologie om na te gaan of alternatieve oplossingen adequaat waren. Op deze manier verkreeg ik een eerste probleemstructuur. Ter illustratie wordt in figuur 5.4.1 een gedeelte van dit ontwerpproces weergegeven. Bij het ontwerpen deden zich echter twee problemen voor die de aanleiding waren voor het formuleren van aanvullende richtlijnen.

Ten eerste bleek het niet mogelijk te zijn om alle gewenste onderdelen van het immuunsysteem op bovengenoemde wijze te ontwerpen. Van deze onderdelen was dan ook nog niet bekend wat hun functie is en waarom de functie moet worden vervuld. Deze informatie is van belang om de onderdelen op te kunnen nemen in de probleemstructuur. In tekstboeken wordt deze informatie veelal niet vermeld. Met de ontwerpheuristiek kan echter ook worden vastgesteld wat de functie is van een onderdeel en waarom de functie moet worden vervuld. In 5.1. zijn de richtlijnen hiervoor beschreven. Op deze wijze heb ik alle onderdelen een plek kunnen geven in de probleemstructuur. Ik zal dit met een voorbeeld illustreren.

Aanvankelijk wist ik niet welke functie MHC vervult en waarom deze functie moet worden vervuld. Wel wist ik dat Tkiller-cellen alleen viraal antigeen in combinatie met MHC kunnen herkennen. Ik heb vervolgens nagegaan wat het nadeel zou zijn wanneer MHC niet aanwezig zou zijn. Toen realiseerde ik me dat viraal antigeen zich veelal in de cel bevindt en dat een Tkiller-cel dus niet kan nagaan of de cel geïnfecteerd is. MHC vervult een rol bij de herkenning doordat het viraal antigeen naar het celmembraan kan transporteren. Zo werd ook duidelijk dat een macrofaag (nog zonder receptoren) niet alleen ongeschikt is voor het onschadelijk maken van geïnfecteerde cellen (figuur 5.4.1) maar ook voor het herkennen van deze cellen. Het resulterende ontwerpprobleem bestaat dus uit twee deelproblemen: 'hoe kan een geïnfecteerde cel onschadelijk worden gemaakt?' en 'hoe kan een geïnfecteerde cel worden herkend?'. De Tkiller-cel is een oplossing voor het eerste deelprobleem. MHC is een oplossing voor het tweede deelprobleem. Op deze manier kreeg ook MHC een plek in de probleemstructuur.

Bij het ontwerpen van een systeem kan de ontwerpheuristiek dus op twee manieren worden gebruikt. Enerzijds kan men uitgaan van de functie van een systeem en nagaan hoe de functie wordt vervuld. Anderzijds kan men uitgaan van een onderdeel en nagaan wat de functie is en waarom deze functie moet worden vervuld.

Bij het ontwerpen deed zich nog een tweede probleem voor. Het blijkt niet altijd onmiddellijk duidelijk te zijn waarom een alternatieve oplossing niet beter is dan de tekstboekoplossing. Het is dan mogelijk dat deze oplossing door SEO-beperkingen niet kan zijn ontstaan⁴. Alvorens dit echter te onderzoeken, lijkt het zinvol eerst na te gaan of de oplossing nog andere nadelen heeft. In de meeste gevallen bleek ik de omgeving onvoldoende te hebben verkend, waardoor ik het nadeel niet kon identificeren. Een adequater beeld van de omgeving kan dan worden verkregen door op een hoger systeemniveau opnieuw te gaan ontwerpen. Ook kwam het voor dat ik een nadeel niet kon vaststellen, omdat ik onvoldoende had nagegaan hoe een oplossing kan worden gerealiseerd. Zo werd mij het nadeel van lichaamseigen herkenning pas duidelijk toen ik me realiseerde dat herkenning plaatsvindt door receptoreiwitten en dat dus het gevaar van mutaties aanwezig is.

Aanpassen van de probleemstructuur aan de leerlingen

De zo verkregen voorlopige probleemstructuur moet nog worden aangepast aan de leerlingen. Daarvoor moet worden nagegaan welke oplossingen en nadelen leerlingen zullen bedenken voor het betreffende ontwerpprobleem en of ze middels afweging van alternatieven ook uitkomen bij de gewenste oplossing en het bijbehorend nadeel. Ook moet worden nagegaan wanneer welke informatie moet worden aangeboden. Deze aangepaste probleemstructuur wordt vervolgens in een scenario beschreven. De richtlijnen voor deze fase zijn ook nader uitwerkt.

Ten eerste sturen de uitgewerkte richtlijnen voor de inrichting en uitvoering van ontwerpend leren bij het aanpassen van de probleemstructuur. Zo is nader omschreven op welk systeemniveau met ontwerpen moet worden begonnen, wanneer informatie over SEO-beperkingen moet worden aangeboden etc. Voor een beschrijving van deze richtlijnen verwijs ik naar 5.3. Ten tweede is nader gespecificeerd hoe een probleemstructuur in de vorm van een scenario kan worden gepresenteerd. Voor een verantwoording en beschrijving hiervan verwijs ik naar 3.1.

Tenslotte heeft ervaring met het aanpassen van de probleemstructuur geleid tot nadere richtlijnen voor de wijze waarop men zich in de positie van de leerlingen kan verplaatsen. Hiervoor had ik slechts globale richtlijnen

⁴ Ook is het mogelijk dat het geraadpleegde tekstboek niet adequaat is. Dit ben ik bij de ontwikkeling van het scenario voor het immunologieonderwijs een aantal keren tegengekomen. Zo wordt er in veel tekstboeken ten onrechte vanuit gegaan dat fagocyten aspecifiek herkennen en dat Tkiller-cellen alleen maar in combinatie met MHC antigenen herkennen (zie scenario stap 3 en 5). Wanneer men een systeem opnieuw ontwerpt, komt men er achter dat dit uit functionele overwegingen niet het geval kan zijn. Fagocyten zouden anders ook lichaamseigen materiaal aanvallen. De Tkiller-reactie kan alleen op gang komen wanneer het vrijgekomen virus kan worden herkend.

geformuleerd. Aanvankelijk probeerde ik eerst de relevante voorkennis van leerlingen voor het betreffende ontwerpprobleem te formuleren en ging vervolgens na welke oplossing en nadelen ze met deze voorkennis zouden kunnen bedenken. Dit bleek voor de meeste ontwerpproblemen vrijwel onmogelijk te zijn, omdat pas duidelijk wordt welke voorkennis relevant is wanneer de alternatieve oplossingen en nadelen bekend zijn. Ik heb dan ook de procedure omgedraaid. Eerst bedenk je zelf met behulp van de ontwerpheuristiek oplossingen en bijbehorende nadelen voor het betreffende ontwerpprobleem. Daarna ga je voor elk van deze alternatieven na welke voorkennis dit veronderstelt bij leerlingen en maak je een inschatting of zij over deze voorkennis beschikken. Indien leerlingen hoogstwaarschijnlijk over de benodigde voorkennis beschikken, kun je er vanuit gaan dat leerlingen (niet noodzakelijkerwijs alle leerlingen) de betreffende oplossing en het bijbehorende nadeel ook zullen bedenken. Ik zal deze procedure met een eenvoudig voorbeeld illustreren.

Een mogelijke oplossing om te voorkomen dat een macrofaag lichaamseigen materiaal fagocyteert, is herkenning op het niveau van DNA. Een nadeel van deze oplossing is dat de cel al wordt beschadigd, voordat kan worden nagegaan of het DNA van lichaamseigen cellen is of van de ziekteverwekker. Het bedenken van deze oplossing en het bijbehorende nadeel veronderstelt tenminste de volgende voorkennis. Een leerling moet weten dat zowel lichaamseigen cellen als de ziekteverwekker DNA bezitten. Hij moet ook weten dat DNA van lichaamseigen cellen en ziekteverwekkers verschillen. Tenslotte moet hij weten dat het DNA zich in de cel bevindt en dus niet bereikbaar is zonder de cel (onherstelbaar) te beschadigen. In dit geval verwacht ik dat leerlingen over de benodigde voorkennis beschikken en dat ze dan ook op een dergelijke oplossing en nadeel zullen komen (zie 4.4).

Op bovengenoemde wijze kan worden vastgesteld of de leerlingen een alternatief zouden kunnen bedenken. Men zal echter eerst zoveel mogelijk alternatieven moeten genereren. Dit blijkt niet altijd eenvoudig te zijn, omdat je als ontwikkelaar de eindoplossing al kent. De ontwerpheuristiek blijkt het belangrijkste middel te zijn voor het genereren van alternatieven. De aanvullende aanwijzingen die in de heuristiek zijn opgenomen (zie 5.1) kunnen ook de ontwikkelaar behulpzaam zijn bij het genereren van alternatieve oplossingen. Zo bleek ik meer alternatieve oplossingen te kunnen bedenken door naar functionele analogieën te zoeken, vervolgens na te gaan hoe deze oplossingen kunnen worden gerealiseerd en na te gaan of de oplossing niet eenvoudiger kan. Met name deze laatste aanwijzing blijkt van belang te zijn. Oplossingen die ik bedacht bleken vaak te complex te zijn, ze bevatten te veel onderdelen. Door echter telkens na te gaan of onderdelen uit de oplossing niet kunnen worden weggelaten, kreeg ik meer zicht op al-

ternatieven die ook leerlingen kunnen bedenken.

Voor het genereren van alternatieven kunnen ook externe bronnen worden geraadpleegd. De historie van een vakgebied blijkt vaak een rijke bron te zijn van alternatieve oplossingen. Bij vroegere wetenschappers ontbrak namelijk vaak dezelfde voorkennis als nu bij leerlingen. Zo blijken de drie typen instructiemechanismen die leerlingen bedenken ook in de historie van de immunologie een rol te hebben gespeeld (Silverstein, 1989; O'Connor, 1995). Ook kunnen evolutionaire en vergelijkende studies een belangrijke bron zijn voor alternatieven. Dit is als volgt in te zien. Andere organismen (eventueel voorouders) kunnen hetzelfde ontwerpproblemen op een andere manier hebben opgelost. Dit is mogelijk, omdat de functie in een andere omgeving moe(s)t worden vervuld. Zo kan bij ons de zuurstofvoorziening niet door diffusie alleen worden geregeld omdat dan niet alle cellen van zuurstof kunnen worden voorzien. Voor eencellige organismen is diffusie echter voldoende.

Samenvattend kan worden vastgesteld dat de ontwikkelprocedure richting blijkt te kunnen geven aan de ontwikkeling van een scenario dat aan de gewenste kenmerken voldoet. Er zijn hier enkele aanvullende richtlijnen geformuleerd met betrekking tot het ontwerpen van het systeem: de ontwerpheuristiek kan bij het ontwerpen op twee manieren worden gebruikt en er is aangegeven hoe kan worden omgegaan met alternatieve oplossingen die beter lijken dan de tekstboekoplossing. Met betrekking tot het aanpassen van de probleemstructuur aan leerlingen zijn aanvullende richtlijnen geformuleerd voor het zich verplaatsen in de positie van de leerlingen en het genereren van alternatieve oplossingen en bijbehorende nadelen⁵.

5.5 Conclusie

Ontwikkeling, uitvoering en evaluatie van het scenario in twee rondes, heeft geleid tot beproeving en nadere uitwerking van de domeinspecifieke onderwijsbenadering ontwerpend leren. De eerder geformuleerde richtlijnen blijken veelal adequaat te zijn. Drie richtlijnen bleken te moeten worden bijgesteld. Deze richtlijnen zijn in de tweede ronde beproefd en adequaat bevonden. Het onderzoek heeft verder geleid tot nadere uitwerking van de richtlijnen. Drie van deze richtlijnen zullen nog moeten worden beproefd in vervolgonderzoek.

Er kan daarom worden geconcludeerd dat de nader uitgewerkte domeinspecifieke onderwijsbenadering ontwerpend leren concrete richtlijnen bevat voor de inrichting van biologietoelatingen waarin leerlingen zelf een bijdrage le-

⁵ Ook de uitgewerkte richtlijnen voor de inrichting en uitvoering van ontwerpend leren (5.3) en de vormgeving van het scenario (3.1) geven richting bij het aanpassen van de probleemstructuur.

veren aan de kennisontwikkeling. Deze richtlijnen zijn beproefd voor het immunologieonderwijs aan leerlingen 5 en 6 VWO, dat door mij zowel is ontwikkeld als gegeven. In 6.2 zal ik nader ingaan op de geschiktheid van ontwerpend leren voor andere onderwerpen uit het domein en op de bruikbaarheid voor andere docenten en ontwikkelaars. Tevens zal de praktische haalbaarheid van ontwerpend leren worden bediscussieerd en wordt nagegaan hoe reflectie op het idee van optimaal ontwerp kan worden vormgegeven en welke implicaties ontwerpend leren heeft voor het biologiecurriculum.

6

Slotbeschouwing

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste conclusies uit dit onderzoek samengevat en bediscussieerd. In 6.1 worden de conclusies met betrekking tot het scenario voor het immunologieonderwijs gepresenteerd en bediscussieerd, dit resulteert in aanbevelingen voor vervolgonderzoek. In 6.2 gebeurt dit voor de domeinspecifieke onderwijsbenadering ontwerpend leren. Tot slot wordt aangegeven wat de opbrengst is van dit onderzoek (6.3).

6.1 Scenario voor het immunologieonderwijs

Eén van de doelen van dit onderzoek was het ontwikkelen van immunologieonderwijs voor leerlingen van 5 en 6 VWO, waarin zij zelf een bijdrage leveren aan hun kennisontwikkeling. In twee ronden is een scenario tot stand gekomen, waarin gedetailleerd is beschreven en verantwoord hoe leerlingen de gewenste kennis over het immuunsysteem kunnen ontwikkelen en leren werken met de ontwerpheuristiek. Dit scenario blijkt grotendeels adequaat te zijn. Slechts enkele onderdelen dienen te worden bijgesteld; hiervoor zijn voorstellen gedaan die in vervolgonderzoek moeten worden beproefd (4.10). In deze paragraaf wordt nagegaan of het scenario geschikt is voor andere 5 en 6 VWO klassen en of het in de praktijk haalbaar is.

Geschiktheid voor andere 5 en 6 VWO klassen

Het onderzoek is kleinschalig opgezet. Het scenario is in de eerste ronde in één 5 VWO klas en in de tweede ronde in één 6 VWO klas beproefd. In beide ronden heb ik zelf het onderwijs gegeven. Dit roept de vraag op of met dit scenario overeenkomstige resultaten mogen worden verwacht, wanneer het onderwijs wordt gegeven door andere docenten voor andere 5 en 6 VWO leerlingen. Ik zal voor de relevante kenmerken van de onderzochte klassen nagaan

in hoeverre dit voorwaarden zijn om de gewenste resultaten te bereiken en taxeren of andere 5 en 6 VWO klassen aan deze voorwaarden voldoen.

- De leerlingen beschikten grotendeels over de voorkennis die in het scenario is gespecificeerd. Deze voorkennis is ook een voorwaarde voor een adequaat verloop van het onderwijsleerproces. Ik verwacht dat leerlingen in 5 en 6 VWO klassen over de vereiste voorkennis zullen beschikken als moleculaire genetica voorafgaand is behandeld.
- De leerlingen hadden nauwelijks ervaring met groepswerk of het zelfstandig ontwikkelen van kennis. Ervaring hiermee blijkt dus geen voorwaarde te zijn voor het bereiken van de gewenste resultaten. Dit is ook gunstig, omdat ik verwacht dat in veel klassen leerlingen deze ervaring ook niet hebben.
- Het onderwijs is uitgevoerd in kleine klassen met 14 leerlingen. Ik heb hier bewust voor gekozen, omdat het scenario nog in ontwikkeling was. In een kleine klas kunnen onverwachte oplossingen en nadelen eerder worden gesignaleerd en er kan meer aandacht aan worden besteed. Het scenario blijkt in de tweede ronde al redelijk nauwkeurig het feitelijke verloop van het onderwijsleerproces te voorspellen. Naar verwachting kan dit met het bijgestelde scenario nog verder worden verbeterd, zodat het onderwijs ook in grotere klassen succesvol zal kunnen worden gegeven.
- Het onderwijs heb ik zelf gegeven. Ik heb hiervoor gekozen omdat ik verwachtte dat dan het scenario ook wordt uitgevoerd zoals bedoeld en adequaat wordt ingespeeld op onverwachte gebeurtenissen. Omdat ik verwacht dat met het bijgestelde scenario nog weinig onverwachte gebeurtenissen zullen optreden, ga ik er vanuit dat ook andere docenten dit scenario kunnen uitvoeren als aan een aantal voorwaarden wordt voldaan. De docent moet niet alleen inzicht hebben in het scenario, maar dient tevens te beschikken over een aantal kerncompetenties die in 5.3 zijn beschreven. Niet alle docenten zullen hierover beschikken. In 6.2 zal worden beschreven hoe dit kan worden ondervangen.

Overigens zijn er enige aanwijzingen vanuit de praktijk dat het scenario in andere 5 en 6 VWO klassen en door andere docenten kan worden uitgevoerd. Een verkorte versie van het scenario dat in de eerste ronde is beproefd, is in het kader van nascholingscursussen onder 150 docenten verspreid. Hoewel de ervaringen van deze docenten niet systematisch in kaart zijn gebracht, rapporteerden verschillende docenten, ongevraagd, dat ze positieve ervaringen hadden opgedaan met het scenario.

In vervolgonderzoek zal nader moeten worden nagegaan hoe docenten in verschillende klassen met het (bijgestelde) scenario werken, waardoor meer inzicht ontstaat in de voorwaarden voor adequate uitvoering van het scenario.

Haalbaarheid in de praktijk

Het ontwikkelde onderwijs moet niet alleen effectief zijn, het moet ook haalbaar zijn in de praktijk. Bij de ontwikkeling van het onderwijs heb ik geprobeerd daar op verschillende manieren rekening mee te houden. Ten eerste

maakt ontwerpend leren het mogelijk dat leerlingen zelf kennis ontwikkelen, zonder dat ze data moeten verzamelen over het onderzoeksobject middels observatie of experiment. Ten tweede is de lessenserie schoolboekvervangend omdat de eindexamenstof wordt behandeld. Ten derde heb ik geprobeerd de leerstof in een beperkte tijd te behandelen. Uit de resultaten van de tweede ronde blijkt dat voor het adequaat uitvoeren van het scenario anderhalf lesuur meer nodig is dan docenten gebruikelijk aan dit onderwerp besteden.

Hoewel in deze extra tijd ook meer en andersoortige doelstellingen worden gerealiseerd dan in de eindtermen worden voorgeschreven, kan dit voor docenten een praktische drempel zijn om het scenario uit te voeren. Het is echter mogelijk het scenario zodanig in te korten dat toch de vereiste kennis voor het eindexamen wordt behandeld en de probleemstructuur behouden blijft. Enkele docenten rapporteerden dit als volgt te hebben gedaan. Zij lieten leerlingen in stap 4 wel een variatie-selectie mechanisme ontwikkelen, maar bespraken niet meer hoe de variatie middels een genherrangschikkingsmechanisme wordt gegenereerd. Dit genherrangschikkingsmechanisme is ook niet in de eindtermen opgenomen. Ze gaven vervolgens wel aan dat door een systeembeperking een B-cel maar één type receptor kan aanmaken, zodat door leerlingen het trefkansprobleem kan worden onderkend.

6.2 De domeinspecifieke onderwijsbenadering ontwerpend leren

In dit onderzoek is geconstateerd dat er concrete richtlijnen ontbreken voor de inrichting van biologieonderwijs waarin leerlingen zelf een bijdrage leveren aan de ontwikkeling van kennis. Een tweede doel van dit onderzoek was dan ook het ontwikkelen van een onderwijsbenadering die deze concrete richtlijnen verschaft voor een specifiek domein binnen de biologie, te weten: de functie en werking van biologische systemen van moleculair tot en met orgaanismaal niveau. Deze domeinspecifieke onderwijsbenadering is in twee fasen ontwikkeld. In de eerste fase zijn richtlijnen, respectievelijk ontleend aan een visie op leren en onderwijzen en aan een visie op organismen, bewerkt en geïntegreerd tot een eerste formulering van de onderwijsbenadering ontwerpend leren. In de tweede fase van het onderzoek heeft ontwikkeling, uitvoering en evaluatie van het scenario geleid tot beproeving en nadere uitwerking van deze onderwijsbenadering. Daarin zijn gespecificeerd en verantwoord: de ontwerpheuristiek waarmee leerlingen kennis kunnen ontwikkelen; de doelstellingen die met ontwerpend leren kunnen worden gerealiseerd; de inrichting en uitvoering van ontwerpend leren opdat deze doelstellingen kunnen worden gerealiseerd; en de wijze waarop scenario's kunnen worden ontwikkeld (hst. 5).

Dit betekent niet dat de onderwijsbenadering ontwerpend leren is uit ontwikkeld. In deze paragraaf worden enige aspecten van ontwerpend leren bedis-

cussieerd en worden aanbevelingen voor vervolgonderzoek geformuleerd. Ten eerste wordt aandacht besteed aan het toepassingsbereik van ontwerpend leren: de geschiktheid voor andere onderwerpen uit het domein en de bruikbaarheid voor andere docenten en andere ontwikkelaars. Indien ik hiermee al ervaring heb opgedaan, wordt dit vermeld. Ten tweede wordt de praktische haalbaarheid van ontwerpend leren nader verkend. In dit verband worden (ervaringen met) twee alternatieve inrichtingsvarianten van ontwerpend leren besproken. Ten derde wordt nagegaan hoe reflectie op het idee van optimaal ontwerp kan worden vormgegeven. Dit is nodig omdat uit het onderzoek blijkt dat door ontwerpend leren misconcepten over de aard van biologische systemen kunnen ontstaan of blijven voortbestaan (5.2). Uit het onderzoek blijkt ook dat functionele verantwoording van kennis niet altijd haalbaar is door de gangbare opbouw van het biologiecurriculum. Deze paragraaf wordt dan ook afgesloten met enkele suggesties voor de inrichting van het biologiecurriculum.

Geschiktheid voor andere onderwerpen

Ontwerpend leren is in dit onderzoek alleen beproefd voor het immunologieonderwijs. Dit roept de vraag op of ontwerpend leren ook geschikt is voor andere onderwerpen uit het domein. Evenals het immuunsysteem kunnen ook andere biologische systemen van moleculair tot orgaanmaal niveau worden beschouwd als optimale ontwerpen. Ontwerpend leren is daarbij in principe mogelijk. De voorkennis van de leerlingen bepaalt echter of ontwerpend leren daadwerkelijk geschikt is. Een ontwikkelaar kan globaal nagaan of leerlingen een bepaald biologisch systeem kunnen ontwerpen door eerst zelf het systeem te ontwerpen, te inventariseren op welke voorkennis een beroep wordt gedaan en vervolgens te taxeren of leerlingen over deze voorkennis beschikken.

Het onderzoek heeft inzicht verschaft in het type voorkennis dat vooral bepaalt of leerlingen een biologisch systeem kunnen ontwerpen. Ontwerpend leren veronderstelt kennis van functionele analogieën en kennis over SEO-beperkingen en de systeemomgeving. Kennis van functionele analogieën is van belang voor het genereren van oplossingen. Deze kennis zal veelal bij leerlingen aanwezig zijn. Kennis over SEO-beperkingen is nodig om na te gaan welke alternatieve oplossingen mogelijk zijn. Deze kennis zal vaak in onvoldoende mate aanwezig zijn bij leerlingen en zal dus veelal moeten worden aangeboden. Kennis over de systeemomgeving is van belang voor het vaststellen van de nadelen en het afwegen van oplossingen. Deze kennis is ook nodig om de functie van het systeem en zijn onderdelen te kunnen bepalen. Het is daarom vooral de voorkennis over de systeemomgeving die bepaalt of een leerling een bepaald biologisch systeem kan ontwerpen.

Ik heb inmiddels enige aanwijzingen vanuit de praktijk dat ontwerpend leren ook voor bepaalde andere onderwerpen uit het domein geschikt is. Ten

eerste zijn voor enige onderwerpen al globale probleemstructuren ontwikkeld. Hierin zijn de ontwerpproblemen geordend en zijn enkele alternatieve oplossingen en bijbehorende nadelen omschreven. Ik heb zelf dergelijke globale probleemstructuren ontwikkeld voor de eiwitsynthese, het oog en de bijendans. Voogt heeft (samen met anderen) dergelijke probleemstructuren ontwikkeld voor: glucoseopname (Voogt, 1997), de bouw van riet (Voogt & Fockens, 1996; Voogt, 1998), de bouw van de zwanehals (Fockens & Voogt, 1997) en de schoudergordel van de kat (Fockens, Kortselius & Voogt, 1999). Ten tweede hebben studenten voor enkele onderwerpen probleemstructuren nader uitgewerkt en gerapporteerd in de vorm van een scenario. Daarbij zijn echter de verwachtingen minder gedetailleerd weergegeven dan in het scenario voor immunologie. Het gaat daarbij om de volgende onderwerpen: altruïstisch gedrag (Van der Weiden, 1996), hart en bloedsomloop (Heerdink, 1997), zenuwstelsel (Vilrox, 1996), stofkringloop (Karssen, 1997) en fotosynthese (Potters, 1996). Ten derde hebben docenten mij gerapporteerd dat ze ontwerpend leren hebben toegepast, onder meer bij: toxicologie, signaaloverdracht bij zenuwen, mitose, meiose, spijsvertering, het oog, de nieren en hormoonregulatie.

In een vervolgonderzoek zal ontwerpend leren voor verschillende onderwerpen nader moeten worden uitgewerkt en beproefd. Dit heeft meerdere functies: het biedt inzicht in het toepassingsbereik van ontwerpend leren; het kan leiden tot een nadere uitwerking van de richtlijnen van ontwerpend leren; en de scenario's kunnen door docenten worden gebruikt.

Bruikbaarheid voor andere docenten

Niet alleen de geschiktheid van ontwerpend leren voor andere onderwerpen, ook de bruikbaarheid door andere docenten zal moeten worden onderzocht. Het onderzoek zelf heeft meer inzicht gegeven in de rol van de docent tijdens ontwerpend leren. In 5.3 worden de kerncompetenties beschreven waarover een docent dient te beschikken voor het adequaat begeleiden van leerlingen bij ontwerpend leren. De huidige grootschalige vernieuwingsprojecten in het onderwijs, zoals de invoering van het studiehuis, verlangen van de docent een soortgelijke rol. Hierin wordt immers van de docent verwacht dat hij niet langer kant-en-klaar informatie overdraagt, maar leerlingen begeleidt bij het zelfstandig verwerven van kennis (Bolhuis & Kluvers, 1996). Uit onderzoek blijkt dat veel docenten nog niet zijn voorbereid op deze andere rol (Bolhuis & Kluvers, 1996; Van den Akker, 1996; Borko & Putnam, 1996).

Wanneer docenten nog niet zijn toegerust om ontwerpend leren te begeleiden, kan hier op twee manieren aan worden gewerkt. Enerzijds kunnen inrichtingsvarianten van ontwerpend leren worden ontwikkeld die beter aansluiten bij de actuele mogelijkheden en opvattingen van de docent, maar waarin de essentie van ontwerpend leren behouden blijft. Twee inrichtingsvarianten wor-

den bij de bespreking van de praktische haalbaarheid van ontwerpend leren gepresenteerd. Anderzijds zal een scholingsdidactiek moeten worden ontwikkeld die docenten voorbereidt om ontwerpend leren te kunnen begeleiden. Inmiddels heb ik al voor verschillende groepen aanstaande en ervaren docenten scholingscursussen verzorgd over ontwerpend leren. Uit terugrapportages blijkt dat verschillende docenten die aan de cursussen hebben deelgenomen, ontwerpend leren ook in hun eigen lessen zijn gaan gebruiken. In vervolgonderzoek zal moeten worden nagegaan of, en zo ja hoe, opvattingen en gedrag van docenten gedurende de scholing en het werken met ontwerpend leren veranderen. Op grond van deze uitkomsten kan de scholingsdidactiek verder worden ontwikkeld.

Bruikbaarheid voor andere ontwikkelaars

In dit onderzoek heb ik zelf het scenario ontwikkeld. De onderwijsbenadering ontwerpend leren bevat richtlijnen die ook andere ontwikkelaars kunnen gebruiken bij het ontwikkelen van scenario's. Ik denk daarbij niet alleen aan biologiedidactici. Ook docenten kunnen de richtlijnen gebruiken om hun vakkennis te vertalen in zodanige probleemstructuren, dat leerlingen zelf een bijdrage kunnen leveren aan de kennisontwikkeling. Nu zal een docent meestal niet over de tijd beschikken om een scenario in dezelfde mate van detaillering uit te werken als ik voor het immunologieonderwijs heb gedaan. Uit de scholingscursussen en begeleiding van studenten blijkt echter dat het wel mogelijk is in betrekkelijk korte tijd minder gedetailleerde scenario's te ontwikkelen die bruikbaar zijn in de klas. Omdat hierin minder gedetailleerd het verwachte onderwijsleerproces is beschreven, zal de docent aanvankelijk ook meer onderdelen van het ontwerpproces van de leerlingen moeten overnemen. Door echter in elke volgende ronde steeds meer onderdelen van het ontwerpproces aan leerlingen over te laten, kan de probleemstructuur steeds beter aan de leerlingen worden aangepast. In vervolgonderzoek zullen op de situatie van de docent toegesneden richtlijnen en een daarbij behorende scholingsdidactiek verder moeten worden ontwikkeld. Ideeën hiervoor kunnen onder meer worden verkregen door de ervaringen van docenten die al scenario's hebben ontwikkeld, in kaart te brengen en te analyseren.

Haalbaarheid in de praktijk: inrichtingsvarianten

Ontwerpend leren is in het beproefde immunologieonderwijs zo ingericht dat leerlingen met elkaar en onder begeleiding van de docent zelf de meeste onderdelen van het systeem ontwerpen. Hoewel deze aanpak effectief blijkt te zijn, zijn er ook enkele praktische bezwaren aan verbonden. Ten eerste kost een dergelijke aanpak wat meer tijd dan een traditionele overdrachtsbenadering. Ten tweede kunnen leerlingen alleen ontwerpend leren wanneer er een scenario

beschikbaar is voor het betreffende onderwerp en wanneer een competente docent en medeleerlingen aanwezig zijn. Er zijn echter ook inrichtingsvarianten van ontwerpend leren denkbaar waarin bovengenoemde bezwaren zich in mindere mate voordoen. Wanneer een scenario voor het betreffende onderwerp beschikbaar is, kan worden gevarieerd in de mate waarin het ontwerpproces door de docent wordt overgenomen. Wanneer de docent het ontwerpproces helemaal overneemt, introduceert hij het probleem, formuleert de verwachte alternatieve oplossingen en nadelen, kiest de eindoplossing en het bijbehorende nadeel en biedt nog aanvullende informatie aan. De docent kan ook een gedeelte van het ontwerpproces overnemen door bijvoorbeeld bij de introductie van het probleem enige voorwaarden aan te bieden waaraan de oplossing moet voldoen. Overname van het ontwerpproces kan zowel door de docent, als door schriftelijke en digitale informatiedragers plaatsvinden.

Deze aanbiedende variant van ontwerpend leren kost minder tijd. Bovendien is het voor de docent eenvoudiger om de leerlingen te begeleiden. Deze variant verschilt nog in een belangrijk opzicht van het traditionele overdrachts onderwijs. De probleemstructuur blijft immers gehandhaafd, waardoor dus expliciet rekening wordt gehouden met de motieven en voorkennis van de leerlingen. Ik verwacht echter wel dat leerlingen als ze zelf ontwerpen, meer actief betrokken zijn bij het onderwijsleerproces, meer voorkennis activeren en beter met de ontwerpheuristiek leren werken (2.1.1). In vervolgonderzoek zal moeten worden nagegaan welke onderdelen van het ontwerpproces kunnen worden overgenomen met zo min mogelijk verlies van de beoogde leeropbrengst.

Een belangrijk praktisch bezwaar blijft ook bij de aanbiedende variant bestaan. Het veronderstelt de aanwezigheid van een probleemstructuur. Tekstboeken, die leerlingen zelfstandig moeten bestuderen (in en buiten schooltijd), zijn echter veelal niet op een dergelijke wijze gestructureerd. Leerlingen blijken bij het bestuderen van deze teksten vaak onvoldoende relaties te leggen tussen hun voorkennis en de leerstof en tussen onderdelen van de leerstof (Anderson & Roth, 1989; Elshout-Mohr, 1992). Hierdoor kunnen misconcepten ontstaan en wordt kennis onvoldoende geïntegreerd. Bovendien leren leerlingen hun kennis niet functioneel te verantwoorden, omdat een dergelijke verantwoording in de tekstboeken meestal ontbreekt. De leerlingen zouden echter het biologisch systeem dat in het tekstboek wordt gepresenteerd, opnieuw kunnen ontwerpen met behulp van de ontwerpheuristiek. Ik noem dit de zelfinstructievariant. Daarbij kunnen ze op dezelfde wijze te werk gaan als de ontwikkelaar, die ook eerst zelf met behulp van de ontwerpheuristiek en een tekstboek het systeem 'opnieuw' ontwerpt (5.4). Bij het ontwerpen kunnen de leerlingen de ontwerpheuristiek op twee manieren gebruiken. Zij kunnen enerzijds de functie van het systeem bepalen en vervolgens nagaan hoe de functie kan worden vervuld. Het tekstboek kan dan worden geraadpleegd om na te gaan of de zelf-

bedachte oplossing klopt. Anderzijds kunnen ze uitgaan van een onderdeel van een biologisch systeem dat in het tekstboek is vermeld, en nagaan welke functie dit vervult en waarom het nodig is dat deze functie wordt vervuld. Beide manieren kunnen elkaar aanvullen.

Ik heb inmiddels enige ervaring opgedaan met deze zelfinstructievariant¹. Leerlingen en studenten rapporteerden na afloop, dat ze op deze manier de leerstof beter begrijpen dan met hun eigen studieaanpak. Vergeleken met het onderzochte immunologieonderwijs worden echter in het algemeen minder alternatieven voor een ontwerpprobleem overwogen. Dit heeft waarschijnlijk twee redenen: in deze variant ontbreekt de stimulans van de groep en de eindoplossing is vanaf het begin bekend omdat deze in het tekstboek staat vermeld. In dit geval zal een leerling waarschijnlijk alleen meerdere alternatieven overwegen als hij zijn verworven kennis ook functioneel wil verantwoorden. De doelstellingen die leerlingen zelf nastreven bepalen waarschijnlijk in belangrijke mate de wijze waarop ze de ontwerpheuristiek zullen gebruiken (vgl. Vermunt, 1992). In vervolgonderzoek naar de zelfinstructievariant zal dan ook moeten worden nagegaan welke doelstellingen leerlingen hanteren bij het werken met de ontwerpheuristiek en hoe deze, indien nodig, in de gewenste richting kunnen worden uitgebreid.

Er zijn dus inrichtingsvarianten van ontwerpend leren denkbaar waarbij de bovengenoemde praktische bezwaren zich minder voordoen. Deze inrichtingsvarianten zullen wel middels ontwikkelingsonderzoek verder moeten worden doordacht en beproefd.

Reflectie op het idee van optimaal ontwerp

Het onderwijs is bij ontwerpend leren zo ingericht dat leerlingen een biologisch systeem leren begrijpen en met de ontwerpheuristiek leren werken. Daarbij is het idee van optimaal ontwerp zelf echter geen onderwerp geweest van reflectie. Dit is om twee redenen echter wel van belang. Ten eerste kunnen door ontwerpend leren misconcepten ontstaan (of blijven bestaan) over het idee van optimale ontwerpen in de natuur (5.2). Deze zullen, indien nodig, beargumenteerd moeten worden bijgesteld. Ten tweede kan reflectie op het idee van optimaal ontwerp leiden tot meer inzicht in hoe, wanneer en waarom de ontwerpheuristiek kan worden toegepast (vgl. Perkins & Salomon, 1988).

¹ Leerlingen van 5 VWO hebben op deze wijze het immuunsysteem bestudeerd. Hierbij werd het tekstboek van Kreutzer gebruikt (Oskamp et al., 1995). Propedeusestudenten biologie hebben op deze manier het immuunsysteem bestudeerd en daarbij werd het tekstboek van Campbell (1990) gebruikt. Voor een verslag van dit onderzoek verwijs ik naar Droog (1996). Tevens hebben docenten-in-opleiding deze variant gebruikt bij het bestuderen van verschillende biologische systemen in het kader van de lesvoorbereiding.

Ik zal hier eerst kort aangeven op welke aspecten van het idee van optimaal ontwerp reflectie tenminste nodig is en vervolgens globaal aangeven hoe de reflectie zou kunnen worden ingericht. Een optimaal ontwerp is die oplossing uit een set van mogelijke oplossingen die de functie vervult met de minste nadelen. De set van mogelijke oplossingen kan worden begrensd door systeem-, evolutionaire en ontogenetische beperkingen (2.2.4). Leerlingen realiseren zich waarschijnlijk nog onvoldoende dat deze SEO-beperkingen de set van mogelijke oplossingen kunnen begrenzen (5.2). Hierdoor kan het voorkomen dat ze uiteindelijk de voorkeur geven aan een oplossing die niet mogelijk is, maar wel de minste nadelen heeft. Reflectie op deze SEO-beperkingen is dan ook van belang.

Om deze beperkingen beter te begrijpen, zullen de leerlingen ook inzicht moeten verwerven in de ontstaanswijze van optimale ontwerpen in de natuur: evolutie door natuurlijke selectie². Uit onderzoek blijkt dat hierover bij leerlingen veel alternatieve denkbeelden bestaan (Janssen & Voogt, 1997). Zo blijken leerlingen, zoals we ook zagen bij immunologie, vaak de voorkeur te geven aan een instructiemechanisme in plaats van een selectiemechanisme. Zij gaan er vanuit dat de omgeving het organisme (doelgericht of blind) instrueert hoe het zich moet aanpassen. Omdat leerlingen bij ontwerpend leren kennis verkrijgen over een biologisch systeem door het opnieuw te ontwerpen, kan een instructie-opvatting gemakkelijk ontstaan of blijven voortbestaan. Het is dan ook zinvol leerlingen te laten reflecteren op zowel de aard als de ontstaanswijze van optimale ontwerpen in de natuur.

Tevens is het zinvol leerlingen te laten reflecteren op systeemeigenschappen die bepaalde optimale ontwerpen gemeenschappelijk hebben (Rosen, 1967). Zo vervullen bepaalde biologische systemen hun functie in een veranderende omgeving. Denk bijvoorbeeld aan bloeddrukregulatie of temperatuurregulatie (Buddingh', 1997; Voogt et al., 1992). Deze zelfregulerende systemen bestaan uit een regelkring waarin de volgende onderdelen kunnen worden onderscheiden: een detector, een effector, een norm en een comparator waar de werkelijke waarde wordt vergeleken met de normwaarde. Wanneer deze eigenschappen zijn geëxpliciteerd kan dit leerlingen extra sturing geven bij het ontwerpen.

Reflectie op het idee van optimaal ontwerp zou zo moeten worden vormgegeven dat leerlingen ook zelf inzien waarom ze hun kennis over het idee van optimaal ontwerp moeten bijstellen of uitbreiden (vgl. 2.1.3). Belangrijke aanknopingspunten voor reflectie zijn daarom de momenten waarop leerlingen bij

² Voor een analyse van moeilijkheden en mogelijkheden van evolutieonderwijs verwijs ik naar Janssen & Voogt (1997). Een nadere uitwerking van een van de mogelijkheden kan men vinden in Comvallius (1998).

het ontwerpen van een biologisch systeem op een andere oplossing uitkomen dan die in de natuur is geselecteerd. Naar aanleiding hiervan kan hun (impliciete) kennis over aspecten van het idee van optimaal ontwerp worden geëxpliciteerd en beargumenteerd worden uitgebreid of bijgesteld. Met leerlingen zal vervolgens moeten worden nagegaan welke consequenties de nieuw verworven kennis heeft voor het ontwerpen van biologische systemen. De verworven kennis over het idee van optimaal ontwerp wordt zo ook productief gemaakt voor de voortgaande kennisontwikkeling over de functie en werking van biologische systemen. In vervolgonderzoek zal een scenario moeten worden ontwikkeld waarin reflectie op het idee van optimaal ontwerp in samenhang met kennisontwikkeling over biologische systemen wordt uitgewerkt.

Implicaties voor het biologiecurriculum

Ontwerpend leren stelt eisen aan de selectie en ordening van de leerstof. Deze eisen kunnen soms conflicteren met de opbouw van het gangbare biologiecurriculum, waardoor leerlingen hun kennis niet functioneel kunnen verantwoorden (5.2). Ontwerpend leren biedt een nieuw criterium voor selectie en ordening van een belangrijk gedeelte van de leerstof uit het biologiecurriculum, te weten: de functie en werking van biologische systemen van moleculair tot en met orgaanmaal niveau. Een biologisch systeem zou idealiter pas moeten worden behandeld als de leerlingen weten waarom de functie van het betreffende systeem moet worden vervuld. Dit veronderstelt dan veelal weer kennis van andere biologische systemen. Ik zal dit met een voorbeeld illustreren.

Het hart met zijn pompfunctie kan dus pas worden behandeld als leerlingen inzien dat zonder pomp de bloedcirculatie onvoldoende is. Bloedcirculatie kan op zijn beurt echter pas worden behandeld wanneer leerlingen begrijpen dat diffusie onvoldoende is om de cellen van zuurstof te voorzien. Dit kan op zijn beurt pas weer aan de orde worden gesteld als leerlingen weten waarom cellen zuurstof nodig hebben.

Wanneer de leerstof volgens dit criterium wordt gestructureerd, leidt de behandeling van het ene biologisch systeem tot een ontwerpprobleem dat door het volgende biologische systeem weer wordt opgelost etc.³ Op deze manier beschikken leerlingen op elk moment over de voorkennis die nodig is voor het ontwerpen van het volgende systeem en weten ze waarom ze deze voorkennis zouden moeten uitbreiden. Dit draagt bij aan de integratie van verworven kennis over biologische systemen.

De ontwikkeling van een dergelijke probleemstructuur zal niet eenvoudig

3 Wanneer bepaalde onderwerpen van het curriculum volgens dit criterium worden geordend, betekent dit uiteraard niet dat deze onderwerpen ook volgens ontwerpend leren zouden moeten worden behandeld.

zijn. Verschillende oplossingen kunnen meer dan één nadeel hebben. Er zal dan een keuze moeten worden gemaakt in welke volgorde de nadelen zullen moeten worden behandeld. Ook zal het waarschijnlijk voorkomen dat een ontwerpprobleem op meerdere manieren kan worden opgelost en iedere oplossing tot een ander nadeel leidt. Ik zal dit illustreren met een voorbeeld.

Zo kan het probleem van de energievoorziening op twee manieren worden opgelost. Sommige organismen kunnen rechtstreeks gebruik maken van de zon. Dit leidt dan onder meer tot het ontwerpprobleem hoe zonlicht kan worden opgevangen en omgezet in een bruikbare vorm. Andere organismen zijn voor hun energievoorziening afhankelijk van andere organismen. Deze oplossing maakt het onder meer noodzakelijk dat ze andere organismen, hun voedsel, moeten kunnen opsporen. Daarvoor zal het in het algemeen nodig zijn dat ze hun voedsel kunnen waarnemen en dat ze er naar toe kunnen bewegen.

De probleemstructuur kent dan ook waarschijnlijk vele vertakkingen. Er zal dan moeten worden gekozen in welke volgorde de verschillende 'takken' aan de orde moeten worden gesteld.

6.3 Opbrengst van het onderzoek

In deze paragraaf wordt de balans opgemaakt van dit onderzoek en wordt de opbrengst geschetst. Drie opbrengsten kunnen worden onderscheiden, die hier achtereenvolgens worden besproken.

Scenario voor het immunologieonderwijs

Het onderzoek heeft een beproefd scenario voor het immunologieonderwijs opgeleverd. Uit een enquête, die voorafgaand aan dit onderzoek is afgenomen, bleek dat docenten behoefte hebben aan beproefd lesmateriaal over immunologie. Dit werd bevestigd tijdens de nascholingscursussen waaraan 150 biologiedocenten hebben deelgenomen. De deelnemers hebben allen een verkorte versie van het scenario uit de eerste ronde ontvangen. Uit terugrapportages blijkt dat verschillende docenten het scenario ook hebben gebruikt. Een aangepaste versie van het scenario is tevens opgenomen in het voorbeeldmateriaal van de SLO voor het vak algemene natuurwetenschappen (Heideman, 1997; Teekens-Veldkamp, 1997). In dit kader zijn eveneens nascholingscursussen aangeboden en verschillende biologiedocenten en niet-biologiedocenten hebben gemeld de aangepaste versie van het scenario te hebben gebruikt.

Het scenario heeft gedurende dit onderzoek een tweeledige functie vervuld en kan deze ook in de toekomst blijven vervullen. Enerzijds kan het worden gebruikt om leerlingen kennis te laten ontwikkelen over het immuunsysteem. Anderzijds kan het worden gebruikt in het kader van (na)scholing over ontwerpend leren. Onderzoek naar het leren van docenten en onderwijsinno-

vaties toont aan dat het belangrijk is dat een vernieuwing concreet is uitgewerkt, dat er bewijzen voor zijn dat het werkt in gewone klaspraktijken en dat de docenten de mogelijkheid wordt geboden hiermee te experimenteren (Van den Akker, 1997). In het scenario wordt ontwerpend leren concreet uitgewerkt, wat tot beter inzicht kan leiden in de onderwijsbenadering. Met de protocollen van het feitelijke verloop van het onderwijsleerproces kan worden aangetoond dat ontwerpend leren mogelijk is, waardoor het vertrouwen in de benadering kan worden versterkt. Bovendien biedt het scenario de docenten de mogelijkheid ook zelf met ontwerpend leren te experimenteren.

De domeinspecifieke onderwijsbenadering ontwerpend leren

In dit onderzoek zijn ook inzichten ontwikkeld die een breder toepassingsbereik hebben dan het immunologieonderwijs voor leerlingen van 5 en 6 VWO. Er zijn concrete richtlijnen ontwikkeld voor de inrichting van biologieonderwijs over de functie en werking van biologische systemen van moleculair tot orgaanmaatschappelijk niveau, waarin leerlingen zelf een bijdrage leveren aan hun kennisontwikkeling. Dergelijke concrete richtlijnen ontbraken tot op heden. De richtlijnen die in de onderwijsbenadering ontwerpend leren zijn opgenomen, kunnen niet alleen door vakdidactici, maar ook door docenten worden gebruikt voor het ontwikkelen van onderwijs. Voor verschillende onderwerpen en doelgroepen is hier al een begin mee gemaakt. Omdat ontwerpend leren bij het ontwikkelen van kennis vooral een beroep doet op de voorkennis van leerlingen kan het in verschillende leeromgevingen worden ingezet, waaronder een zelfinstructieomgeving.⁴

Ontwerpend leren past goed binnen de huidige vernieuwingen van het biologieonderwijs. Ook daar is het immers de bedoeling dat leerlingen een actievere rol krijgen bij de kennisverwerving (Timmermans, 1996). Bij ontwerpend leren wordt deze actieve kennisverwerving wel anders vormgegeven dan in het huidige biologieonderwijs gebruikelijk is (Janssen, 1997). Vaak wordt onderwijs zo ingericht dat leerlingen zelfstandig kunnen werken. Hiermee is echter nog niet gegarandeerd dat leerlingen de leerstof ook diepgaander verwerken. Soms worden leerlingen hiervoor studiestrategieën aangeboden (door de docent of het tekstboek) die hen helpen bij het dieper verwerken van de leerstof. Er is aandacht voor oriëntatie op de leerstof, voor het activeren van voorkennis en voor integratie en toepassing van kennis (Boekearts & Simons, 1995). Ontwerpend leren gaat daarbij echter nog een stap verder. Leerlingen verwerven hier actief kennis door deze opnieuw te ontwikkelen. Daarbij weten ze ook waarom ze hun kennis moeten uitbreiden. Ze leren daardoor niet alleen de stof dieper te verwerken, maar leren deze ook te verantwoorden en leren bovendien een vorm van biologisch denken.

⁴ Leerlingen zijn voor de kennisontwikkeling namelijk niet afhankelijk van observatie en experiment. Dit in tegenstelling tot de gebruikelijke vormen van onderzoek in het biologieonderwijs.

Zoekrichting voor de ontwikkeling van domeinspecifieke onderwijsbenaderingen

Het onderzoek heeft tenslotte nog inzichten opgeleverd die ook van toepassing zijn buiten het domein van ontwerp en leren. Binnen de constructivistische traditie zijn waardevolle richtlijnen ontwikkeld voor de inrichting van onderwijs, waarin leerlingen zelf een bijdrage leveren aan hun kennisontwikkeling. Deze richtlijnen zijn echter vakoverstijgend geformuleerd en bieden dan ook weinig handvatten voor de inrichting van domeinspecifiek onderwijs. In dit onderzoek zijn aanvullende richtlijnen ontleend aan het fundamentele idee dat organismen kunnen worden beschouwd als optimale ontwerpen. Dit idee is omgewerkt tot een ontwerpheuristiek die leerlingen richting heeft gegeven bij de ontwikkeling van kennis en de ontwikkelaar heeft geholpen bij de ontwikkeling van het scenario. Voor andere domeinen in de biologie, zoals de taxonomie en de ecologie, zouden op soortgelijke wijze aanvullende richtlijnen kunnen worden ontwikkeld. Een fundamenteel idee uit het betreffende domein kan worden geselecteerd en omgezet in een heuristiek (Janssen & Voogt, 1998). Bij de keuze van het fundamentele idee dient men met twee zaken rekening te houden (2.1.5). Ten eerste dient het idee zoveel mogelijk informatie te bevatten over het betreffende domein. Hoe meer informatie de heuristiek bevat over het domein, hoe meer sturing deze geeft aan de kennisontwikkeling. Ten tweede zal het idee leerlingen in staat moeten stellen bij de kennisontwikkeling zoveel mogelijk gebruik te maken van relevante voorkennis. Leerlingen zijn dan minder afhankelijk van externe informatiebronnen en het maakt een effectief leerproces mogelijk waarin leerlingen voortdurend hun voorkennis uitbreiden en bijstellen.

Literatuurlijst

- Akker, J.J.H. van den** (1996). *Het studiehuis: ook een leeromgeving voor docenten?* Amsterdam: IDOVU.
- Akker, J.J.H. van den** (1997). The science curriculum between ideals and outcomes. In: B. Fraser & K. Tobin (Eds.). *International handbook of science education*, (pp. 421-447). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Alexander, R. McN.** (1996). *Optima for Animals* (2nded.). Princeton: Princeton University Press.
- Anderson, C.W. & K.J. Roth** (1989). Teaching for meaningful and self-regulated learning of science. In: J.R. Brophy. *Advances in Research on Teaching*, Volume 1. (pp. 265-309). Greenwich: JAI Press.
- Ausubel, D.P.** (1968). *Educational psychology: A cognitive view*. New York: Holt, Rinehart & Winston.
- Barkow, J.H., L. Cosmides & J. Tooby (Eds.)** (1992). *The adapted mind: Evolutionary psychology and the generation of culture*. New York: Oxford University Press.
- Beckner, M.** (1968). *The biological way of thought* (2nd ed.). Los Angeles: University of California Press.
- Bereiter, C.** (1994). Constructivism, socioculturalism, and Popper's World 3. *Educational Researcher*, 23, 21-23.
- Bertalanffy, L. von** (1965). *Een biologisch wereldbeeld. Het verschijnsel leven in natuur en wetenschap*. Utrecht: Erven J. Bijleveld.
- Bertalanffy, L. von** (1968). *General system theory. Foundations, development, applications*. New York: Braziller.
- Boekaerts, M. & P.R.J. Simons** (1995). *Leren en instructie: Psychologie van de leerling en het leerproces*. Assen: Van Gorcum.
- Bolhuis, S. & C. Kluvers** (1996). *Op weg naar zelfstandig lerende leerlingen. Verslag van het eerste deelonderzoek naar procesgericht onderwijs: Wat doen en denken docenten die procesgericht onderwijzen?* Nijmegen: Katholieke Universiteit Nijmegen, Vakgroep Onderwijskunde.
- Borko, H. & R. Putnam** (1996). Learning to teach. In: D. Berliner & R. Calfee (Eds.). *Handbook of educational psychology*, (pp. 673-708). New York: Macmillan.

- Brown, J.S., A. Collins & P. Duguid** (1989). Situated cognition and the culture of learning. *Educational Researcher*, 18, 32-42.
- Brumby, M.N.** (1984). Misconceptions about the concept of natural selection by medical biology students. *Science Education*, 68, 493-504.
- Bruner, J.S.** (1960). *The process of education*. New York: Vintage.
- Bruner, J.S.** (1971). The process of education revisited. *Phi Delta Kappan*, 5, 17-21.
- Buddingh', J.** (1997). *Regulatie en homeostase als onderwijsthema: een biologie-didactisch onderzoek*. Utrecht: CD-β Press.
- Bunge, M.** (1979). *Treatise on Basic Philosophy. Volume 4. A world of systems*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.
- Campbell, N.A.** (1990). *Biology* (2nded.). Redwood City: The Benjamin/Cummins Publishing Company.
- Cobb, P.** (1994). Where is the mind? Constructivist and sociocultural perspectives on mathematical development. *Educational Researcher*, 23, 13-20.
- Collins, A., J.S. Brown & S.E. Newman** (1989). Cognitive apprenticeship: Teaching the crafts of reading, writing, and mathematics. In: L.B. Resnick (Ed.). *Knowing, learning and instruction: Essays in honor of Robert Glaser*, (pp. 454-494). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Comvalius, M.** (1997). *Evolutietheorie in het voortgezet onderwijs. Een argumentatiebenadering*. Doctoraalscriptie. Utrecht: Vakgroep Didactiek van de Biologie.
- Cronin, H.** (1991). *The 'ant and the peacock. Altruism and sexual selection from Darwin to today*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dawkins, R.** (1987). *The blind watchmaker*. Harlow: Longman Scientific & Technical.
- Dawkins, R.** (1995). *River out of Eden. A darwinian view of life*. London: Weidefeld & Nicolson.
- DeBoer, G.E.** (1991). *A history of ideas in science education*. New York: Teachers College Press.
- Dennett, D.C.** (1995). *Darwin's dangerous idea. Evolution and the meanings of life*. New York: Simon & Schuster.
- Driver, R. & J. Easley** (1978). Pupils and paradigms: A review of literature related to concept development in adolescent science students. *Studies in Science Education*, 5, 61-84.
- Driver, R., H. Asoko, J. Leach, E. Mortimer & P. Scott** (1994). Constructing scientific knowledge in the classroom. *Educational Researcher*, 23, 5-12.
- Droog, I.** (1996). *Ontwerpend leren als methode voor zelfstandig leren binnen het biologie-onderwijs*. Doctoraalscriptie. Utrecht: Vakgroep Didactiek van de Biologie.
- Duit, R.** (1994). Research on students' conceptions - developments and trends. In: H. Pfundt & R. Duit (Eds.). *Students' alternative frameworks and science education. Bibliography* (4nded.). Kiel: IPN.
- Ebbens, S., S. Ettekoven, & J. Rooijen van** (1996). *Effectief leren in de les. Basisvaardigheden voor docenten*. Groningen: Wolters-Noordhoff.
- Elshout-Mohr, M.** (1992). Teksten leren bestuderen en begrijpen. In: P.R.J. Simons & J.G.G. Zuylen. *Handboek huiswerkdidactiek en geïntegreerd studievoordigheidsonderwijs* (verkorte versie), (pp. 99-111). Tilburg: Mesoconsult.

- Ernest, P.** (1993). Constructivism, the psychology of learning, and the nature of mathematics: some critical issues. *Science & Education*, 2, 87-93.
- Eylon, B.S. & M.C. Linn** (1988). Learning and instruction: An examination of four research perspectives in science education. *Review of Educational Research*, 58, 251-301.
- Fockens, F.H. & P.A. Voogt** (1997). Dient de sierlijkheid van de zwaam alleen om ons te bekoren? *NVOX*, 22, 246-251.
- Fockens, F.H., M.J.H. Kortselius & P.A. Voogt** (1999). De kat, de sprong, de schok en toen.... *NVOX*, 24, 57-61.
- Futuyama, D.J.** (1983). *Evolutionary biology* (2nd ed.). Sunderland: Sinauer Associates.
- Gibbs, A. & A.E. Lawson** (1992). The nature of scientific thinking as reflected by the work of biologists & by biology textbooks. *The American Biology Teacher*, 54, 137-152.
- Giphart, M.J.** (1991). *Immunologie*. Groningen: Wolters-Noordhoff.
- Gould, S.J. & R.C. Lewontin** (1979). The spandrels of San Marco and the panglossian paradigm: A critique of the adaptationist programme. *Proc. Roy. Soc. B.*, 205, 581-598.
- Guzetti, B.J., T.E. Snyder, G.V. Glass & W.S. Gamas** (1993). Promoting conceptual change in science: A comparative meta-analysis of instructional interventions from reading education and science education. *Reading Research Quarterly*, 28, 117-155.
- Gravemeijer, K.P.E.** (1994). *Developing realistic mathematics education*. Utrecht: CD-β Press.
- Griffith, P.E.** (1996). The historical turn in the study of adaptation. *Brit. J. Phil. Sc.*, 47, 511-532.
- Haafte, A.W. van, M. Korthals, G.A.M. Widdershoven, J. Mul de & G.L.M. Snik** (1986). *Ontwikkelingsfilosofie. Een onderzoek naar de grondslagen van ontwikkeling en opvoeding*. Muiderberg: Coutinho.
- Hasting, J.W.** (1971). Light to hide by. Ventral luminescence to camouflage the silhouette. *Science*, 173, 1016-1017.
- Heerdink, H.** (1997). *Een hart voor zelfstandig leren*. Doctoraalscriptie. Utrecht: Vakgroep Didactiek van de Biologie.
- Heideman, W.** (1997). *Over-leven. Experimenteel onderwijsmateriaal voor het vak Algemene Natuurwetenschappen. Leerlingenmateriaal*. Enschede/Utrecht: SLO en CD-β Press
- Hinde, R.A.** (1975). The concept of function. In: Baerends, G., C. Beer & A. Manning (Eds.). *Function and evolution in behaviour: Essays in honor of Niko Tinbergen*, (pp. 3-15). Oxford: Clarendon Press.
- Hodson, D.** (1993). Re-thinking old ways: Towards a more critical approach to practical work in school science. *Studies in Science Education*, 22, 85-142.
- Janssen, F.J.J.M. & P.A. Voogt** (1995). Ontwerpend leren in het immunologie-onderwijs. *NVOX*, 20, 420-424.
- Janssen, F.J.J.M. & P.A. Voogt** (1996). Ontwerpend leren. Een doe-het-zelf handleiding. *NVOX*, 21, 42-48.
- Janssen, F.J.J.M.** (1997). Zelfstandig bestuderen van teksten: KIT-strategie of POK-strategie. In: A.J. Kallenberg & W.A. Brink van den. *Supplement succesvol studeren*, (pp. 7-14). Rotterdam: Erasmusuniversiteit.
- Janssen, F.J.J.M.** (1997). Evolutietheorie in het voortgezet onderwijs. *Tijdschrift voor Didactiek der β-wetenschappen*, 14, 56-71.

- Janssen, F.J.J.M. & P.A. Voogt** (1998). Learning by designing. A case of heuristic directed theory development in science teaching. In: W.F. McComas (Ed.). *The nature of science in science education. Rationales and strategies*, (pp. 151-162). Dordrecht. Kluwer Academic Publishers.
- Karssen, S.** (1997). *Stofkringloop*. Doctoraalscriptie. Utrecht: Vakgroep Didactiek van de Biologie.
- Klaassen, C.W.J.M.** (1995). *A problem-posing approach to teaching the topic of radioactivity*. Utrecht: CD- β Press
- Klinckmann, E. (Ed.)** (1970). *Biology teachers' handbook* (2nded.). New York: Wiley.
- Kitcher, P.** (1993). Function and Design. *Midwest Studies in Philosophy*, 18, 379-397.
- Kortland, J.** Proefschrift in voorbereiding.
- Kuiper, W.A.J.M.** (1993). *Curriculumvernieuwing en lespraktijk. Een beschrijvend onderzoek op het terrein van de natuurwetenschappelijke vakken in het perspectief van de basisvorming*. Enschede: OCTO.
- Langley, P., H. Simon, G.L. Bradshaw & J.M. Zytkow** (1987). *Scientific discovery. Computational explorations of the creative processes*. Cambridge: The MIT Press.
- Langman, R.E.** (1989). *The immune system. Evolutionary principles guide our understanding of this complex biological defense system*. San Diego: Academic Press.
- Lijnse, P.L.** (1995). "Developmental research" as a way to an empirically based "didactical structure" of science. *Science Education*, 79, 189-199.
- Matthews, M.** (1994). *Science teaching: The role of history and philosophy of science*. New York: Routledge.
- Mayr, E.** (1983). How to carry out the adaptationist programme. *The American Naturalist*, 121, 324-334.
- Millar, R. & R. Driver** (1987). Beyond processes. *Studies in Science Education*, 14, 33-62.
- Mintzes, J.J., J.E. Trowbridge, M.W. Arnaudin & J.H. Wandersee** (1991). Children's biology: Studies on conceptual development in the life sciences. In: S.M. Glynn, R.H. Yeany & B.K. Britton. *The psychology of learning science*, (pp. 179-202). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Nola, R.** (1997). Constructivism in science and science education: A philosophical critique. *Science & Education*, 6, 55-83.
- Nossal, G.J.V. & J. Lederberg** (1958). Antibody production by single cells. *Nature*, 181, 1419-1420.
- Nunez, F. & B. Banet** (1997). Students' conceptual patterns of human nutrition. *International Journal of Science Education*. 19, 509-526.
- O'Connor, K.** (1995). *Rather suddenly, the penny dropped! A literature study into the historical theory development in immunology and its use for teaching immunology in secondary schools*. Doctoraalscriptie. Utrecht: Vakgroep Didactiek van de Biologie.
- Oers, B. van** (1988). Modellen en de ontwikkeling van het (natuur-)wetenschappelijk denken van leerlingen. *Tijdschrift voor Didactiek der β -wetenschappen*, 6, 115-143.
- Ogborn, J.** (1997). Constructivist metaphors of learning science. *Science & Education*, 6, 121-133.
- Orian, G.H. & N.E. Pearson** (1978). On the theory of central place foraging. In: D.H. Horn,

- R. Mitchell & G.R. Stairs (Eds.). *Analysis of Ecological Systems*. Columbus: Ohio State University Press.
- Orzack, S.E. & E. Sober** (1994). Optimality models and the test of adaptationism. *American Naturalist*, 143, 361-380.
- Osborn, J.** (1995). Science for real or science as talk?: The limits of social constructivism. In: F. Finley, D. Allchin, D. Rhees & S. Fifeild (Eds.). *Proceedings of the Third International History, Philosophy, and Science Teaching conference*, (pp. 926-939). Minneapolis: University of Minnesota.
- Oskamp, A.A.G., A.W.H. Bakkem van & J.F. Groeman** (1995). *Kreutzer biologie voor de bovenbouw vwo 5v*. Groningen: Wolters-Noordhoff.
- Parker, G.A. & J. Maynard Smith** (1990). Optimality theory in evolutionary biology. *Nature*, 348, 27-33.
- Perkins, D & G. Salomon** (1988). Are cognitive skills context-bound? *Educational Researcher*, 18, 16-25
- Peters, R.S.** (1964). Education as initiation In: R.D. Archambault (Ed.). *Philosophical analysis and education*. (pp. 87-111). London: Routledge & Kegan Paul.
- Phillips, D.C.** (1995). The good, the bad, and the ugly: The many faces of constructivism. *Educational Researcher*, 24, 5-12.
- Pinker, S.** (1998). *How the mind works*. London: Penquin Books.
- Popper, K.R.** (1962). *The open society and its enemies* (4nd ed.). London: Routledge & Kegan Paul.
- Popper, K.R.** (1972). *Objective Knowledge*. Oxford: Clarendon Press.
- Potters, J.** (1996). *Fotosynthese in 8 stappen*. Doctoraalscriptie. Utrecht: Vakgroep Didactiek van de Biologie.
- Pranger, R.** (1990). Towards a pluralistic concept of function. Function statements in biology. *Acta Biotheoretica*, 38, 63-71.
- Resnick, L.B.** (1987). Learning in school and out. *Educational Researcher*, 16, 13-20.
- Resnik, D.** (1995). Functional language and biological discovery. *Journal of General Philosophy of Science*, 2, 119-134.
- Ridley, M.** (1993). *Evolution*. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Roebertsen, H.** (1996). *Integratie en toepassing van biologische kennis. Ontwikkeling en onderzoek van een curriculum rond het thema 'lichaamsprocessen en vergift'*. Utrecht: CD-β Press.
- Roitt, I.M.** (1997). *Roitt's essential immunology* (9nd ed.). Oxford: Blackwell.
- Rosen, R.** (1967). *Optimality principles in biology*. London: Butterworths.
- Schwab, J.J.** (1962). The teaching of science as enquiry. In: J.J. Schwab & P.F. Brandwein (Eds.). *The teaching of science*. Cambridge MA: Harvard University Press.
- Schwab, J.J.** (Ed.) (1963). *Biology teachers' handbook*. New York: Wiley.
- Schwab, J.J.** (1964). The structure of natural science. In: G.W. Ford & L. Pugno (Eds.). *The structure of knowledge and the curriculum*. Chicago: Rand McNally.
- Silverstein, A.M.** (1989). *A history of immunology*. London: Academic Press.
- Simon, H.A.** (1996). *The sciences of the artificial* (3rd ed.). Cambridge MA: MIT-press.

- Simons, P.R.J.** (1992). Constructive learning: The role of the learner. In: Corte, E. de (ed.). *Computerbased learning environments and problemsolving*: Berlin. Springer.
- Sober, E.** (1993). *Philosophy of biology*. Oxford: Oxford University Press.
- Solomon, J.** (1994). The rise and fall of constructivism. *Studies in Science Education*, 23, 1-19.
- Soontjens, F.J.K.** (1988). *Evolutie en finaliteit*. Nijmegen: KUN-press.
- Tamir, P.** (1996). Discovery learning and teaching. In: E. de Corte & F.E. Weinert. *International encyclopedia of developmental and instructional psychology*, (pp. 355-362). Oxford: Pergamon
- Teekens-Veldkamp, A.** (1997). *Over-leven. Experimenteel onderwijsmateriaal voor het vak Algemene Natuurwetenschappen. Docentenhandleiding*. Enschede/Utrecht: SLO en CD-β Press
- Theunissen, B. & R.P.W. Visser** (1996). *De wetten van het leven. Historische grondslagen van de biologie 1750-1950*. Baarn: Ambo.
- Timmermans, P.** (1996). *Biologie. Voorlichtingsbrochure havo/vwo. Voortgezet onderwijs*. Enschede: SLO.
- Verheul, E.** (1996). *Immunologie voor de bovenbouw van het VWO. Doctoraalscriptie*. Utrecht: Vakgroep Didactiek van de Biologie.
- Vermunt, J.D.H.M.** (1992). *Leerstijlen en sturen van leerprocessen in het hoger onderwijs*. Lisse: Swets & Zeitlinger.
- Vilrox, C.** (1996). *Het zenuwstelsel in 6 stappen. Doctoraalscriptie*. Utrecht: Vakgroep Didactiek van de Biologie.
- Vollebregt, M.J.** (1998). *A problem posing approach to teaching an initial particle model*. Utrecht: CD-β Press.
- Voogt, P.A., Kamp, M.J.A. & J. Buddingh'** (1992). *Het leven geregeld*. Enschede: SLO.
- Voogt, P.A.** (1997). Diabetes: wat is er aan de hand? Lesbrief volgens het principe van ontwerpend leren. *Bull. Onderw. Biol.* 28, 18-21.
- Voogt, P.A. & F.H. Fockens** (1996). Riet, onopvallend maar ... een mechanisch wonder! *NVOX*, 21, 348-353.
- Voogt, P.A. & F.H. Fockens** (1997). Waarom zwanen zo'n lange hals hebben. *NVOX*, 22, 264-270.
- Voogt, P.A.** (1998). Riet: wie kijkt daar nou naar? *NVOX*, 23, 381-389.
- Wandersee, J.H., J.J. Mintzes & J.D. Novak** (1994). Research on alternative conceptions in science. In: D.L. Gabel (Ed.). *Handbook of research on science teaching and learning*, (pp. 177-210). New York: Macmillan.
- Weiden, E. van der** (1996). *Ikke, ikke, ... en de rest...? Het ontstaan en voortbestaan van opofferend gedrag. Doctoraalscriptie*. Vakgroep Didactiek van de Biologie.
- Williams, G.C.** (1996). *Plan and purpose in nature*. New York: Harper Collins Publishers.
- Wubbels, Th. & J. Levy (Eds.)**. *Do you know what you look like? Interpersonal relationships in education*, (pp. 46-55). London: Falmer Press.

Samenvatting

De directe aanleiding voor dit onderzoek was de opname van het onderwerp immunologie in het examenprogramma biologie voor het VWO. Het immuunsysteem is een complex biologisch systeem dat bestaat uit veel interagerende onderdelen op verschillende organisatieniveaus. Veel docenten vinden het daarom moeilijk om immunologie te onderwijzen.

Eén van de doelen van dit onderzoek was dan ook het ontwikkelen van immunologieonderwijs voor leerlingen van 5 en 6 VWO. Dit onderwijs zou zo moeten worden ingericht dat leerlingen hierbij zelf een bijdrage leveren aan hun kennisontwikkeling. Dat wil zeggen dat leerlingen, onder begeleiding van de docent, problemen formuleren, voorlopige oplossingen hiervoor zoeken, en deze oplossingen ook toetsen. De verwachting was dat leerlingen op deze manier niet alleen adequate kennis verwerven over de functie en werking van het immuunsysteem, maar dat ze deze kennis tevens leren verantwoorden. Bovendien zouden ze zo een methode kunnen leren waarmee ze zelfstandig kennis over biologische systemen kunnen ontwikkelen. Ze leren dus niet alleen immunologie maar ook een vorm van biologisch denken.

In de literatuur ontbrak het echter aan concrete handvatten voor de inrichting van zulk biologieonderwijs in het algemeen en van immunologieonderwijs in het bijzonder. Deze vaststelling leidde er toe dat een tweede doel voor dit onderzoek is geformuleerd. Voordat begonnen werd met het ontwikkelen van een lessenserie over het immuunsysteem, moest eerst een onderwijsbenadering worden ontwikkeld die hiervoor concrete richtlijnen verschaft. Die richtlijnen zouden niet alleen moeten gelden voor het immunologieonderwijs, maar voor een bepaald domein van de biologie, i.c. de functie en werking van biologische systemen van moleculair tot organismeal niveau.

Middels een cyclisch proces van doordenken en beproeven heb ik getracht

de domeinspecifieke onderwijsbenadering en het immunologieonderwijs in relatie tot elkaar te ontwikkelen. Eerst werd op grond van een literatuuronderzoek de onderwijsbenadering zo ver mogelijk uitgewerkt. Deze onderwijsbenadering gaf vervolgens richting aan de ontwikkeling van een scenario voor het immunologieonderwijs. In dit scenario zijn het beoogde onderwijsleerproces en de beoogde leerresultaten gedetailleerd beschreven en verantwoord. Uitvoering en evaluatie van het scenario leidde tot bijstelling ervan en tot nadere uitwerking van de domeinspecifieke onderwijsbenadering.

In hoofdstuk 2 zijn de resultaten van het literatuuronderzoek gerapporteerd. De domeinspecifieke onderwijsbenadering is gebaseerd op een visie op leren en onderwijzen en een visie op organismen. In dit onderzoek is gekozen voor een constructivistische visie op leren en onderwijzen. Het centrale idee is dat onderwijs zo dient te worden ingericht dat leerlingen worden gestimuleerd hun voorkennis uit te breiden of bij te stellen in de gewenste richting. Dit algemene idee kan op veel manieren worden uitgewerkt. Ik heb daarom eerst mijn positie bepaald ten aanzien van drie dimensies waarin constructivistische onderwijsbenaderingen van elkaar kunnen verschillen. Op grond van deze positiebepaling zijn twee onderwijsbenaderingen geselecteerd die richtlijnen voor het biologieonderwijs kunnen verschaffen: probleemstellend onderwijs en het meester-gezel model. Het onderwijs zou zo moeten worden ingericht dat leerlingen zoveel mogelijk door hun eigen problemen gestuurd uitkomen bij de wetenschappelijk geaccepteerde kennis. Bij het formuleren en oplossen van deze problemen maken ze gebruik van een methode. Het werken met deze methode wordt eerst door de docent voorgedaan waarna ze deze methode zelf en met elkaar gaan gebruiken onder begeleiding van de docent. Beide vakoverstijgende onderwijsbenaderingen boden echter nog weinig concrete richtlijnen voor de inrichting van het biologieonderwijs. Bovendien ontbrak nog een geschikte methode voor kennisontwikkeling. De methode zou zoveel mogelijk beroep moeten doen op relevante voorkennis van de leerlingen. Bovendien moest ze informatie bevatten over organismen, opdat ze voldoende sturing zou geven bij de ontwikkeling van kennis. De methode moest met andere woorden worden gebaseerd op een visie op organismen. Hiervoor ging ik te rade bij de biologie.

In een eeuwenoude traditie in de biologie worden organismen beschouwd als optimale ontwerpen. Hoewel de verklaring voor het ontstaan van optimale ontwerpen in de natuur in de loop der tijden is veranderd, is het idee van optimaal ontwerp niet uit de biologie verdwenen. Dit idee heeft een heuristische waarde. Kennis over biologische systemen kan worden verkregen door ze 'opnieuw' te ontwerpen. In een onderzoeksprogramma binnen de evolutiebiologie wordt expliciet gebruik gemaakt van het idee van optimaal ontwerp. Daarbij is

ook een ontwerpheuristiek geformuleerd die onderzoekers sturing biedt bij de ontwikkeling van kennis over biologische systemen. In de evolutiebiologie wordt ontwerpen in het algemeen beschouwd als een vruchtbare heuristiek. Er is echter ook kritiek geleverd op het idee van optimaal ontwerp en de daarvan afgeleide heuristiek. Deze kritiek heeft niet geleid tot het verbannen van het ontwerpen uit de evolutiebiologie, maar tot het zorgvuldiger toepassen van de heuristiek.

De richtlijnen die zijn ontleend aan een constructivistische visie op leren en onderwijzen en aan een visie op organismen als optimaal ontwerp zijn vervolgens geïntegreerd, aangepast en uitgewerkt tot de onderwijsbenadering ontwerpend leren. Het centrale idee van ontwerpend leren is dat leerlingen kennis kunnen ontwikkelen over biologische systemen door deze systemen 'opnieuw' te ontwerpen. Deze domeinspecifieke onderwijsbenadering bestaat uit vier componenten:

1. Er is een ontwerpheuristiek ontwikkeld, bestaande uit vijf stappen, die leerlingen kan sturen bij het formuleren van problemen, het zoeken van oplossingen en het toetsen van oplossingen over de functie en werking van biologische systemen. Deze ontwerpheuristiek is aangepast aan het type voorkennis waarover leerlingen beschikken.

2. In de onderwijsbenadering zijn de doelstellingen die met ontwerpend leren worden nagestreefd gespecificeerd en verantwoord die met ontwerpend leren worden nagestreefd. Leerlingen leren niet alleen de functie en werking van een biologisch systeem kennen, maar leren deze kennis ook functioneel te verantwoorden: ze leren ook waarom het nodig is dat deze functie wordt vervuld en waarom de functie zo beter wordt vervuld dan door enkele alternatieven. Tevens leren leerlingen met de ontwerpheuristiek werken, zowel individueel als in groepjes.

3. Beschreven is hoe het onderwijs moet worden ingericht en uitgevoerd om de bovengenoemde doelstellingen te kunnen realiseren. De docent leert leerlingen met de ontwerpheuristiek te werken door deze eerst te demonstreren en vervolgens de leerlingen te begeleiden bij het werken met de ontwerpheuristiek. Hij stimuleert hen de heuristiek te gebruiken en geeft feedback op het gebruik van de ontwerpheuristiek. Het onderwijs is zo ingericht dat leerlingen, uitgaande van de functie van het systeem als geheel, stapsgewijs ontdekken hoe deze functie wordt vervuld. Daarbij lossen ze, met behulp van de ontwerpheuristiek, in elke stap een ontwerpprobleem op en formuleren voor de gekozen oplossing het bijbehorende nadeel, dat in de volgende stap wordt geherformuleerd tot het volgende ontwerpprobleem.

In elke stap kunnen een aantal fasen worden onderscheiden. Eerst wordt het ontwerpprobleem klassikaal geïntroduceerd. Vervolgens bedenken leerlingen individueel oplossingen en bijbehorende nadelen voor betreffende probleem,

waarna de oplossingen in de groepjes verder worden ontwikkeld. In de klassieke evaluatie worden vervolgens de groepsoplossingen geïnventariseerd en geëvalueerd, waarna de eindoplossing en het bijbehorende nadeel worden geselecteerd. Daarna wordt, indien nodig, nog aanvullende informatie door de docent verstrekt en krijgen leerlingen enige toepassingsvragen voorgelegd.

4. Tenslotte is in de onderwijsbenadering beschreven hoe scenario's met de gewenste kenmerken kunnen worden ontwikkeld. Drie fasen kunnen worden onderscheiden. In de eerste fase ontwerpt de ontwikkelaar zelf met behulp van de ontwerpheuristiek het betreffende systeem. Op deze manier wordt een voorlopige probleemstructuur verkregen. In de tweede fase wordt deze probleemstructuur aangepast aan de leerlingen en beschreven in een scenario. In de derde fase wordt het onderwijs uitgevoerd en geëvalueerd. Indien nodig wordt de probleemstructuur dan opnieuw aangepast.

De eerste uitwerking van de onderwijsbenadering ontwerpend leren heeft richting gegeven aan de ontwikkeling van een scenario voor het immunologie-onderwijs. Dit scenario is in een 5 VWO klas beproefd en bijgesteld. Het scenario dat in de tweede ronde in een 6 VWO klas is beproefd, is in hoofdstuk 3 gepresenteerd. De verwachting hierbij was dat leerlingen in zes stappen de gewenste kennis over het immuunsysteem verwerven en met de ontwerpheuristiek leren werken.

De resultaten van de beproefing van het scenario in de tweede ronde zijn in hoofdstuk 4 gepresenteerd. Leerlingen hebben grotendeels de gewenste kennis verworven. Zij bleken de functies en werking van de meeste onderdelen van het immuunsysteem te kennen. Deze kennis hebben ze ook geïntegreerd. Leerlingen hebben niet alleen relaties gelegd tussen de verschillende onderdelen van het systeem, maar ook tussen het systeem en de systeemomgeving. Ze konden tevens van de meeste onderdelen aangeven waarom het nodig is dat de functie wordt vervuld en waarom de functie zo beter wordt vervuld dan door enkele alternatieven. Het bijbehorende onderwijsleerproces is ook grotendeels verlopen zoals verwacht. Leerlingen zijn veelal middels afweging van alternatieven op de gewenste oplossing en het bijbehorende nadeel uitgekomen. De onverwachte resultaten in stap 2,3 en 4 gaven echter wel aanleiding het scenario voor deze stappen op een aantal onderdelen bij te stellen. Hiervoor zijn voorstellen gedaan die in vervolgonderzoek nog zullen moeten worden beproefd.

De leerlingen bleken al snel met de ontwerpheuristiek te kunnen werken, zowel individueel als in groepjes. Daarbij bleken ze, zoals verwacht, ook elkaar te stimuleren bij het werken met de ontwerpheuristiek. Het bijbehorende onderwijsleerproces is ook grotendeels verlopen zoals verwacht. De demonstratie van de ontwerpheuristiek verliep zoals gepland en de docent heeft door-

gaans op adequate wijze de leerlingen gestimuleerd met de ontwerpheuristiek te werken. De volgende onverwachte resultaten gaven echter wel aanleiding het scenario op een aantal punten bij te stellen. Leerlingen bleken tijdens de groepsbespreking soms het overzicht te verliezen over het ontwerpproces. Ze bleken bij het ontwerpen tevens nog een ander type voorkennis te gebruiken dan ik had verwacht. Tenslotte hebben zowel de docent als de leerlingen ook onverwachte manieren gebruikt om elkaar te stimuleren tot het werken met de ontwerpheuristiek. Er zijn voorstellen gedaan voor het verbeteren van het scenario met betrekking tot deze aspecten.

Uit de schriftelijke enquête, die leerlingen na afloop van de lessenserie hebben ingevuld, bleek dat leerlingen het onderwijsleerproces en de bijbehorende leerresultaten ook positief waardeerden. De leerlingen wilden dan ook wel vaker ontwerpend leren.

In hoofdstuk 5 is beschreven welke bijdrage de ontwikkeling, uitvoering en evaluatie van het scenario heeft geleverd aan de nadere uitwerking van de onderwijsbenadering ontwerpend leren. Dit is achtereenvolgens voor de vier componenten van de onderwijsbenadering besproken:

1. Leerlingen bleken met de ontwerpheuristiek kennis te kunnen ontwikkelen over biologische systemen, i.c. het immuunsysteem. Voor verschillende stappen uit de ontwerpheuristiek zijn aanvullende aanwijzingen geformuleerd. Zo zijn bijvoorbeeld aanwijzingen geformuleerd die leerlingen kunnen helpen bij het formuleren van de functie van het systeem als geheel.

2. Middels ontwerpend leren bleken de beoogde doelstellingen te kunnen worden gerealiseerd: leerlingen verwerven adequate kennis over de functie en werking van een biologisch systeem en konden deze kennis ook functioneel verantwoorden en ze leerden met de ontwerpheuristiek te werken. Functionele verantwoording van kennis bleek echter soms niet haalbaar te zijn door de gangbare opbouw van het biologiecurriculum. Door ontwerpend leren kunnen tevens misconcepten ontstaan of blijven voortbestaan over het idee van optimaal ontwerp in de natuur. In hoofdstuk 6 is beschreven hoe met deze onverwachte resultaten kan worden omgegaan.

3. De richtlijnen voor de inrichting en uitvoering van het onderwijs bleken grotendeels adequaat te zijn. Ze zijn veelal nader uitgewerkt. Er is gespecificeerd: hoe de functie van een systeem kan worden bepaald; op welk systeemniveau met ontwerpen moet worden begonnen; waar men op moet letten bij de introductie van het ontwerpprobleem; wanneer informatie moet worden aangeboden; hoe de individuele denkfase, de groepsbespreking en de klassikale evaluatie kan worden ingericht en voor welke aspecten toepassingsvragen moeten worden opgenomen. Drie richtlijnen moesten op grond van resultaten van de eerste ronde worden bijgesteld: de ontwerpheuristiek bleek beter op een

ander moment te kunnen worden gedemonstreerd dan verwacht, feedback op het gebruik van de ontwerpheuristiek bleek nauwelijks nodig te zijn en aanvullende informatie kon vaak beter op een ander moment worden aangeboden dan oorspronkelijk was gepland. Tot slot heeft het onderzoek inzicht gegeven in een aantal kerncompetenties waarover de docent moet beschikken voor het adequaat begeleiden van ontwerpend leren.

4. De ontwikkelprocedure bleek richting te kunnen geven aan de ontwikkeling van een scenario dat aan de gewenste kenmerken voldoet. Er zijn voor elk van de drie fasen aanvullende richtlijnen geformuleerd.

In hoofdstuk 6 zijn tenslotte de belangrijkste conclusies van dit onderzoek samengevat en bediscussieerd. Het scenario voor het immunologieonderwijs bleek grotendeels adequaat te zijn. In de discussie is nagegaan of met dit scenario vergelijkbare resultaten kunnen worden verwacht als het onderwijs wordt gegeven door andere docenten en aan andere 5 en 6 VWO leerlingen. Tevens is een voorstel gedaan voor een verantwoorde inkorting van het scenario, zodat het door docenten die minder tijd beschikbaar hebben, kan worden gebruikt.

De domeinspecifieke onderwijsbenadering bleek concrete richtlijnen te bevatten voor de ontwikkeling van biologieonderwijs waarin leerlingen zelf een bijdrage leveren aan hun kennisontwikkeling. De onderwijsbenadering is in dit onderzoek beproefd voor het immunologieonderwijs, dat door mij is ontwikkeld en gegeven. In de discussie is het toepassingsbereik van ontwerpend leren verkend: de geschiktheid voor andere onderwerpen uit het domein, en de bruikbaarheid voor andere docenten en ontwikkelaars zijn besproken. Tevens is aandacht besteed aan de haalbaarheid van ontwerpend leren in de praktijk. In dit verband zijn (ervaringen met) twee alternatieve inrichtingsvarianten besproken: de aanbiedende variant en de zelfinstructievariant. Ook is nader ingegaan op de noodzaak en vormgeving van reflectie op het idee van optimaal ontwerp in de natuur. Vervolgens is nagegaan hoe het biologiecurriculum zou kunnen worden ingericht opdat functionele verantwoording van kennis mogelijk wordt en leerlingen productief kunnen voortbouwen op eerder verworven kennis. Tot slot van dit hoofdstuk is de drievoudige opbrengst van dit onderzoek beschreven: een beproefd scenario voor het immunologieonderwijs; de domeinspecifieke onderwijsbenadering ontwerpend leren; en een zoekrichting voor de ontwikkeling van domeinspecifieke onderwijsbenaderingen.

Summary

The immediate cause for this developmental research project was the recent adoption of the topic immunology in the biology syllabus for pre-university education (VWO) in the Netherlands. Because the immune system is a complex biological system which consists of many interacting parts at several levels of organisation, many teachers find it difficult to teach. Thus, the first aim of the research project was to develop teaching material for immunology for VWO students in grades 5 and 6. The desire was to develop material in which the educational process was organised in such a way that students could contribute to their own growth of knowledge. Guided by the teacher, students should formulate problems and look for and test tentative solutions to their problems.

The researcher's expectations were that (i) students would acquire adequate knowledge about the function and mechanism of the immune system; (ii) students would learn to account for this knowledge; (iii) students would learn a method with which they could independently generate knowledge about biological systems. Students were meant to learn, therefore, not only immunology, but also a form of biological thinking.

A review of the general literature on science education showed a lack of specific guidelines for the organisation of this kind of biology education, especially for immunology education. This led to the formulation of a second research aim: prior to the development of a series of lessons on immunology, an educational approach must be developed that provides guidelines for the subject. These guidelines should apply to immunology education, and more generally to the entire domain pertaining to the function and mechanism of biological systems from the molecular to the organism level.

The research project set out to develop, in a cyclic process of reflection and testing, a domain-specific educational approach in relation to the develop-

ment of a 'scenario' consisting of a coherent series of lessons on immunology. On the basis of an extended study of the literature, the initial educational approach was specified which guided the development of the 'scenario' for immunology education. This scenario described in detail the intended teaching and learning process as well as the intended learning outcomes, and it provided a justification of the former in relation to the latter. The execution and evaluation of the scenario led then to its revision and to a more detailed version of the domain-specific educational approach.

The literature study led to the development of a domain-specific educational approach based on a vision of learning and teaching and on a vision of organisms (chapter 2). A choice was made for a constructivistic vision on learning and teaching, whose central idea is that the educational process should be organised in such a way that students are stimulated to extend or revise their pre-conceptions in a specific direction. This general idea can be specified in many ways. Thus, two constructivistic educational approaches were selected which provide guidelines for biology education: the problem-posing approach and the cognitive apprenticeship model. The educational process should be organised in such a way that students are guided as much as possible to arrive at valid scientific knowledge by the problems they themselves pose. In this process students learn to use a method for formulating and solving these problems. After the teacher has demonstrated the method, students use it individually and in groups under the teacher's supervision.

These general educational approaches, however, did not provide enough specific guidelines for the organisation of the process of biology teaching and learning. A suitable method for guiding the growth of students' knowledge was still missing. Such a method should address as much as possible the relevant prior knowledge. Further, since the method should provide sufficient guidance for the development of biological knowledge, it must contain information about organisms. In other words, the method must be based on a vision on organisms for which a study was made of the literature on biology and philosophy of biology.

According to a century-old tradition in biological thinking, organisms can be considered as being optimally designed. Although the *explanation* of optimally designed organisms has changed over the centuries, the *idea* of optimal design has not disappeared from biology. On the contrary, the idea has great heuristic value, that is, knowledge about biological systems can be acquired by 'redesigning'. An important research programme within evolution biology, 'adaptationism', explicitly uses the idea of optimal design. A so-called design heuristic has been formulated which provides guidance to researchers in the generation of knowledge about biological systems. In general this design heu-

ristic is considered to be a fruitful heuristic in evolution biology. There have been some criticisms, though, on the idea of optimal design and the heuristic derived from it. This has not led to the dismissal of the heuristic from evolution biology, but only to a more careful application of the design heuristic.

In the educational approach developed in this research, *learning by designing*, the guidelines, derived from a constructivistic vision on learning and teaching and from a vision on organisms as optimal design, are integrated and elaborated. The central idea of learning by designing is that students learn to generate knowledge about biological systems by redesigning them. This domain-specific educational approach consists of four components:

1. A design heuristic is developed to guide students in their formulation of problems and in their searching for and testing of these solutions with regard to the function and mechanism of biological systems. The design heuristic is adapted to the type of knowledge students already possess.

2. The aims of the learning-by-designing-approach are specified and justified in the educational approach. Students do not only learn the function and mechanism of a biological system, they also learn to account for this knowledge, that is, they also learn why a certain biological function needs to be fulfilled, and why a certain mechanism do this better than others. Further, students learn to work with the design heuristic, both individually and in groups.

3. A description is given of how the educational process must be organised and executed in order to realise the aims. Students learn the design heuristic at first from a teacher demonstration and then from using it under teacher supervision. The teacher stimulates students to use the heuristic and gives them feedback. The educational process is organised in such a way that students start from the idea of the function of the system as a whole and discover stepwise how this function is fulfilled. Guided by the design heuristic, students solve a design problem in each step of the learning process and formulate a disadvantage of the solution chosen for that step, which is then reformulated in the next step as a new design problem.

A number of phases can be distinguished in each step. The design problem is introduced in a teacher-led classroom discussion. Students try individually to think of solutions and their corresponding disadvantages. The solutions are further developed by students working in small groups. The group solutions are collected and evaluated by the entire class and the teacher, who together select a 'final' solution and describe its corresponding disadvantages. The teacher provides, if necessary, supplementary information, and students are given some assignments in which they apply the knowledge acquired.

4. The educational approach describes in three phases how a scenario can be developed with the desired characteristics. Firstly, the developer designs the system in question using the design heuristic. This leads to a preliminary pro-

blem structure. Secondly, this problem structure is adapted to students' prior knowledge and is described in a scenario. Thirdly, the actual teaching of the scenario takes place and is followed by its evaluation. If necessary, the problem structure is revised.

The initial elaboration of the educational approach learning by designing directed the development of a scenario for immunology education. This scenario was trialled in a classroom (5VWO) and then revised. The resulting revised scenario, which was again trialled in a classroom (6VWO), is presented in chapter 3.

The researcher's expectation was that students would acquire the desired knowledge on the immunology system in six steps and would learn to work with the design heuristic themselves. The second trial of the scenario led to the following results (chapter 4).

Students acquired the desired knowledge to a great extent. They appeared to know, in an integrated form, the function and mechanism of most parts of the immune system. Students not only constructed relationships between different parts of the system, but also between the system and its environment. For most parts of the system they could indicate why it is necessary that the corresponding function must be fulfilled and why a certain mechanism does it better than alternatives brought forward. Thus, the teaching and learning process has taken place largely as expected. By considering alternative solutions, in most cases students arrived at the desired solution and its accompanying disadvantages. Some of the unexpected results led to the revision of a number of points. Proposals for this revision are made in the thesis which should be trialled in further research.

Students were able to work with the design heuristic rather quickly, both individually and in groups. As expected, they also appeared to stimulate each other in working with the design heuristic. The demonstration of the design heuristic took place as planned, and in most cases the teacher adequately stimulated students to work with the design heuristic. The following unexpected results led to a revision of a number of points of the scenario. During group discussions students sometimes lost sight of the logic of the design process as a whole. Further, students appeared to use a different type of knowledge in the design process than expected by the researcher. Finally, both teacher and students used unexpected ways to stimulate each other in working with the design heuristic. Proposals are made here for improving the scenario in these respects.

The results of a questionnaire that students completed after the lesson series show that they evaluated in a positive way the teaching and learning process and the corresponding learning outcomes. The students expressed a desire for more learning by designing.

The development, execution, and evaluation of the scenario has resulted in a more detailed elaboration of the educational approach learning by designing. This is described for the four components of the educational approach (chapter 5).

1. Using the design heuristic, students appeared to be able to generate knowledge about biological systems, in this case the immune system. Supplementary guidelines are formulated for the design heuristic. For example, guidelines are formulated which could help students to arrive at knowledge about the function of the system as a whole.

2. It turned out to be possible to realise the intended aims by means of the educational approach learning by designing. Students acquired adequate knowledge about the function and mechanism of a biological system, could account for this kind of knowledge, and learned to work with the design heuristic. Because of the currently used sequence of topics in the biology curriculum in the Netherlands, it was not always possible for students to give an adequate account of the functions and mechanisms involved in immunology. Further, misconceptions about the idea of optimal design in nature can arise, or persist, when students use the design heuristic. Suggestions are made in chapter 6 for dealing with these unexpected results.

3. The guidelines for the organisation and execution of the teaching and learning process turned out to be largely adequate. The research led to further detail on the following points:

- how to determine the function of a system as a whole;
- at what system level to begin the design process;
- on what to focus by the introduction of a design problem;
- when to provide information to students;
- how to organise the individual thinking, the group discussion, and the group evaluation;
- which aspects should be addressed in the assignments for students to apply their knowledge.

On the basis of the results of the first trial three guidelines must be adjusted. It appeared preferable to demonstrate the design heuristic at another point than was used in the trial, feedback on the use of the design heuristic appeared hardly necessary, and supplementary information could be better provided at a point different from that initially planned. Furthermore, the research provides insight into the competences a teacher must have in order to adequately supervise the process of learning by designing.

4. The procedure outlined above for the development of a scenario proved satisfactory and led to a scenario with the desired characteristics. Supplementary guidelines have been formulated for each of the three phases.

The most important conclusions of this research are summarised and dis-

cussed in chapter 6. The scenario for the teaching of immunology lessons proved to be largely adequate. In the discussion the question is addressed, whether it is possible to arrive at similar results if the scenario learning by designing is used by teachers and students other than those involved in this case study. For teachers having less time available, a proposal is formulated in this thesis for a shorter scenario which is still consistent with the original educational approach.

The domain-specific educational approach, learning by designing, turned out to offer specific guidelines for the development of biology education in which students can themselves contribute to their own growth of knowledge. The educational approach has been tested for the topic of immunology, for which I developed and also taught a series of lessons. The discussion, therefore, explores the domain of application of learning by designing: whether the educational approach is suitable for other topics in the domain, and whether it can be used by other teachers and developers. The feasibility of learning by designing in classroom practice is also addressed. Hence, the experience with two alternative forms of learning by designing are discussed: a transmission form and a self-instruction form. The necessity for the organisation of reflection on the idea of optimal design is explored. Subsequently, the question is addressed how to organise the biology curriculum in such a way that students can productively extend biological knowledge acquired earlier, so that they are able to give an adequate account of the functions and mechanisms involved.

Finally, I describe the triple yield of this research: a trialled scenario for immunology education, a tested domain-specific educational approach learning by designing, and a heuristic for the development of domain-specific educational approaches in science education.

Dankwoord

Het onderzoek waar hier verslag van is gedaan, kan worden vergeleken met het zoeken in een doolhof. Verschillende mensen hebben me geholpen en gesteund bij deze zoektocht.

Allereerst wil ik Peter Voogt en Arend Jan Waarlo bedanken, omdat ze mijn route in het doolhof niet van tevoren hebben vastgelegd. Ik heb van hen de ruimte gekregen vele paden in het doolhof te bewandelen, ook wanneer deze in hun ogen doodliepen. Peter heeft me tevens laten ontdekken dat de biologie de belangrijkste inspiratiebron is voor de biologiedidactiek en wist me altijd weer de goede vragen te stellen. Arend Jan heeft altijd een actief luisterend oor geboden en er op toegezien dat mijn ideeën ook adequaat werden getoetst.

Verder wil ik Berry van Berkel bedanken, die mijn ideeën soms beter begreep dan ik zelf, met wie ik ontelbare gesprekken over didactiek en filosofie heb gevoerd en die me heeft ingewijd in de derde wereld van Karl Popper.

Ik ben ook veel dank verschuldigd aan mijn kamergenoten. Herma Roebertsen, die mijn luchtbellen feilloos wist door te prikken als ze niet uitvoerbaar waren. Rob Soekarjo, die mij telkens weer liet inzien dat ik het geheel nog niet overzag en slechts een keuze had gemaakt uit de vele mogelijkheden. En die me er van heeft overtuigd dat openheid en tijd de belangrijkste voorwaarden zijn voor creatief onderzoek. Marjolein Vollebregt, die enkele schrijf-fasen voorliep en hierdoor voorleefde wat me te wachten stond en hoe ik hiermee om kon gaan.

Ook wil ik een aantal collega's bedanken waarmee ik, eveneens, vele gesprekken heb gevoerd van biologische, didactische, filosofische of persoonlijke aard. Enkele van hen hebben ook technische ondersteuning geboden; van soep maken voor de nascholing, het uittypen van de bandjes, tot het deblokken van mijn belangrijkste bezit, de bibliotheekpas: Joke van Aalsvoort, Jeanine Acampo, Zolikhha Akchich, Art Alblas, Kerst Boersma, Jan Broertjes, Joop Buddingh', Kees van Driel, Harrie Eijkelhof, Maaïke Fennis, Herman Hooymayers, Mary Beth Key, Kees Klaassen, Marie-Christine Knippels, Koos Kortland, Riet Leewis, Piet Lijnse, Cees Loffeld, Ilona Mathijssen, Frits Pater,

Hanneke de Reus, Thom Somers, Ton van der Valk, Adri Verdonk, Wobbe de Vos, Marjolein de Vries, Daan van Weelie en Frans Wiersma.

Dit onderzoek had niet kunnen worden uitgevoerd zonder de medewerking van docenten en leerlingen. Ik wil de volgende docenten bedanken voor de lessen die ik in hun klassen heb mogen verzorgen en de gesprekken die we hierover hebben gevoerd: Bernard Beukers, Sofi Hermesen, Thijs Lavrijsen, Ad van Noort, Marie-Anne Platteel en Paul van der Zande. Sofi Hermesen is helaas veel te vroeg overleden. Ik wil de leerlingen uit deze klassen bedanken voor hun enthousiasme, humor en inventiviteit. Verder wil ik alle docenten(-in-opleiding) bedanken die een scholingscursus ontwerpend leren hebben gevolgd en de studenten die met mij het toepassingsgebied van ontwerpend leren hebben verkend. Ik heb veel van hen geleerd.

Ook wil ik Agnes Jacobs en Nico Verloop bedanken, zij hebben in de laatste fase van mijn proefschrift mijn werk in Leiden verlicht.

Mijn vrienden en familie wil ik bedanken voor hun belangstelling en ondersteuning. In het bijzonder wil ik hier mijn ouders en Anja noemen. Mijn ouders, omdat ze me altijd gestimuleerd hebben mijn eigen weg te gaan en deze weg met belangstelling hebben gevolgd. Anja, voor de vele luchtballen die we samen hebben geblazen, voor het soms wel en soms niet accepteren van mijn mentale afwezigheid, voor haar procesbegeleiding als het echt moeilijk was en voor haar warmte en relativeringsvermogen.

Curriculum Vitae

Fred Janssen werd geboren op 19 september 1967 te Tegelen. Hij behaalde zijn HAVO-diploma in 1984 en zijn VWO-diploma in 1986, beide aan het Kruisheren College te Uden. In juni 1992 studeerde hij af (cum laude) aan de Landbouwniversiteit Wageningen in de richting Biologie. In hetzelfde jaar behaalde hij ook zijn lesbevoegdheid voor het vak Humanistische Vormingsonderwijs. Hij heeft dit vak drie jaar gegeven aan basisschoolleerlingen van groep 7 en 8. Van augustus 1992 tot januari 1994 heeft hij zijn vervangende dienstplicht vervuld bij de Vakgroep Didactiek van de Biologie te Utrecht. Hij heeft onder meer gewerkt aan twee projecten op het gebied van Natuur- en Milieueducatie in opdracht van het ministerie van LNV. Beide projecten hebben geresulteerd in een aantal publicaties. In januari 1994 is hij in dienst getreden bij de Vakgroep Didactiek van de Biologie te Utrecht als assistent in opleiding. In deze functie heeft hij het onderzoek verricht waarover in dit proefschrift wordt gerapporteerd. In het kader van dit onderzoek heeft hij ook (na-)scholingscursussen gegeven. In deze periode heeft hij tevens studievoordigheidskursussen gegeven voor biologiestudenten aan de Universiteit Utrecht. Op verzoek van de Koninklijke Academie voor Wetenschappen (KNAW) heeft hij een literatuurstudie verricht naar de wijze waarop evolutietheorie in het biologieonderwijs kan worden onderwezen. Sinds september 1998 heeft hij een aanstelling als vakdidacticus biologie aan het Interfacultair Centrum voor Lerarenopleiding, Onderwijsontwikkeling en Nascholing (ICLON) te Leiden. Hij geeft hier het vak Leren en Communiceren en onderzoekt onder meer hoe ontwerpend leren biologiedocenten kan helpen bij het vertalen van hun vak-kennis naar onderwijs waarin leerlingen zelf een bijdrage leveren aan hun kennisontwikkeling. In december 1999 zal hij gaan deelnemen aan een onderzoek, waarin wordt nagegaan op welke wijze ontwerpend leren een bijdrage kan leveren aan de kennisontwikkeling van basisschoolleerlingen in de leergebieden natuuronderwijs en techniek.

