

# Samenvatting

Dit proefschrift beschrijft een ontwikkelingsonderzoek dat werd uitgevoerd bij het Centrum voor Didactiek van de Wiskunde en Natuurwetenschappen aan de Universiteit Utrecht van juni 1999 tot augustus 2003. Het onderzoek richtte zich op de introductie van systeemdenken in celbiologieonderwijs in de bovenbouw van het vwo. Het doel was de ontwikkeling van een theoretisch gefundeerde en empirisch geteste onderwijsleerstrategie voor 'de cel als systeem'. Deze strategie zou de gesignaleerde problemen in het leren en onderwijzen van celbiologie moeten oplossen en daarnaast indicaties moeten opleveren voor het ontwerpen van biologieonderwijs vanuit systeemtheoretisch perspectief. De centrale onderzoeksvraag is als volgt geformuleerd: *Op welke wijze kan een onderwijsleerstrategie, gebaseerd op systeemdenken, worden vormgegeven, opdat leerlingen een samenhangend en adequaat begrip verwerven van de cel als basis- en functionele eenheid van organismen?*

**Hoofdstuk 1** beschrijft de context van het centrale probleem van dit onderzoek, alsmede het eerste deel van de verkennende fase van het onderzoek waarop hoofdstuk 3 voortborduurt. De ontwikkelingen in het onderwijs en onderzoek in de biologie, evenals de huidige ideeën over leren en onderwijzen, fungeren als basis voor het beschrijven van onze domeinspecifieke visie op leren en onderwijzen.

Literatuuronderzoek laat zien dat veel conceptuele problemen in het biologieonderwijs ontstaan door de fragmentarische benadering van levensverschijnselen en het onvoldoende met elkaar in verband brengen van de structuren en processen op verschillende organisatieniveaus. Deze benadering lijkt zijn oorsprong te vinden in de historische ontwikkeling van de biologie zelf: de opdeling van de biologie in meerdere disciplines en de grote aandacht voor detailkennis binnen iedere discipline. De reductionistische onderzoeksbenadering was lange tijd dominant. Het huidige biologieonderwijs in Nederland weerspiegelt deze benadering nog steeds met als gevolg een overladen curriculum, een gebrek aan samenhang en een geringe relevantie voor leerlingen.

In het huidige biologisch onderzoek is er meer voor de holistische, dynamische en interactieve aard van levende systemen. Ook is er sprake van een steeds sterkere integratie van het onderzoek op verschillende biologische organisatieniveaus. Nieuwe inzichten in moleculaire processen zijn geleidelijk aan verbonden met fysiologische en ecologische processen en andersom ontleent veel onderzoek op het moleculaire niveau haar vragen aan nieuwe inzichten op het organismaal en ecosysteemniveau. Daarnaast speelt biologie een steeds grotere rol in het persoonlijk en maatschappelijk leven.

De wetenschappelijke ontwikkelingen in de biologie hebben in beperkte mate geleid tot inhoudelijke bijstellingen van het biologiecurriculum, maar dit heeft niet geresulteerd in een samenhangende en geïntegreerde aanpak van levensverschijnselen in de onderwijspraktijk. In onze visie moet in het biologieonderwijs het ontwikkelen van domeinspecifieke competenties centraal staan waarbij de benodigde kennis wordt gekoppeld aan voor leerlingen relevante en betekenisvolle praktijken. In deze studie wordt het systeemdenken gepresenteerd als een sleutelcompetentie. De competentie systeemdenken is hierbij gedefinieerd als het willen en kunnen relateren van de verschillende organisatieniveaus vanuit het perspectief dat natuurlijke gehelen, zoals organismen, complexe organisaties zijn die bestaan uit vele interagerende onderdelen die op hun beurt kleinere gehelen zijn, zoals cellen in een organisme. Onze aanname is

dat bewuste toepassing van het systeem perspectief leidt tot meer samenhang in het leren en onderwijzen van (cel)biologie.

Voor het ontwikkelen van een adequate onderwijsleerstrategie voor de cel als systeem is gekozen voor een probleemstellende benadering, waarbij leerlingen op inhoudelijke gronden actief worden betrokken bij hun eigen leerproces. In onze opvatting is een probleemstellende benadering compatibel met het perspectief van gesitueerde cognitie. Het is er namelijk op gericht om leerlingen actief te betrekken in sociale interacties binnen een geschikte onderwijspraktijk, waarbij het ontwikkelen van nieuwe concepten, vaardigheden en attitudes centraal staat.

**Hoofdstuk 2** beschrijft de interpretatieve onderzoeksbenadering die is gekozen om de centrale onderzoeksvraag te beantwoorden: het zogenoemde ontwikkelingsonderzoek. Deze benadering omvat een verkennende fase en een cyclische onderzoeksfase.

In de *verkennende fase* werden de algemene kenmerken en structuur van het beoogde onderwijsleerstrategie voor de cel als systeem geïdentificeerd. De theoretische onderbouwing van het onderzoek, onder meer bestaande uit doordenking van de conceptuele structuur van het vak en gerapporteerde oplossingen voor leerproblemen, vond grotendeels in deze fase plaats. Relevante literatuur werd bestudeerd en veelbelovende ideeën in de klassenpraktijk uitgetest. Dit resulteerde in een nadere problemdiagnose en toespitsing van mogelijke oplossingen. De onderzoeker gebruikte deze fase eveneens om meer inzicht te verkrijgen in de vakdidactiek.

Op basis van de resultaten van de verkennende fase werden ontwerpcriteria gedefinieerd voor een voorlopige onderwijsleerstrategie die werd ontwikkeld en getest in de *cyclische onderzoeksfase*. Daartoe werden twee casestudies op verschillende scholen gepland. Alvorens de strategie te testen, werd deze eerst uitgewerkt in een contextspecifiek scenario dat het verwachte onderwijsleerproces gedetailleerd beschrijft en verantwoord. Dit scenario stuurde de analyse van het feitelijk onderwijsleerproces in de klas. Bij het uittesten van het scenario in de praktijk werden verschillende datasets verzameld en geanalyseerd. Evaluatie van en reflectie op het uitgevoerde scenario gaven aanwijzingen voor het verbeteren van de onderwijsleerstrategie. Het gereviseerde scenario werd uitgetest in een tweede casestudy. Op deze manier werd de onderwijsleerstrategie gevormd in een cyclisch proces waarin ontwikkeling en onderzoek elkaar afwisselen. Dit leidde uiteindelijk tot een theoretisch gefundeerde en empirisch geteste onderwijsleerstrategie.

In **Hoofdstuk 3** wordt het grootste deel van de verkennende fase beschreven. In deze fase werden de belangrijkste problemen met betrekking tot het leren en onderwijzen van celbiologie geïdentificeerd middels literatuurstudie, interviews met docenten en leerlingen, en een schoolboekanalyse. Hierbij viel op dat veel begripsproblemen op het cellulaire niveau gerelateerd zijn aan het feit dat veel celbiologische begrippen het subcellulaire niveau betreffen en dat deze niet verbonden worden met het cellulair en organismaal niveau. Als gevolg hiervan hebben veel leerlingen moeite om zich een samenhangend beeld van de cel te vormen. Dit laatste vereist zowel het kunnen verbinden van verschillende begrippen op het cellulair niveau (horizontale samenhang) als het verbinden van verschillende begrippen op het cellulair en organismaal niveau (verticale samenhang). Een aantal oplossingen die in de literatuur worden aangedragen

voor de gesignaleerde problemen, hebben met name betrekking op het benaderen van de cel en zijn processen vanaf het concreet macroscopisch niveau. Een adequate strategie voor het verkrijgen van een samenhangend begrip van de cel werd echter niet aangetroffen. Een aantal interviews met Nederlandse biologieleraars en een schoolboekanalyse lieten vergelijkbare problemen zien als die genoemd worden in de literatuur. Ondanks het feit dat systeemdenken staat vermeld in de exameneisen, is het niet geïntegreerd in het celbiologieonderwijs.

Als basis voor een nadere uitwerking van de competentie systeemdenken wordt in het vervolg van hoofdstuk 3 een uiteenzetting gegeven van de drie belangrijkste systeemtheorieën. De theorieën verschaffen elk een specifieke kijk op levende systemen. De Algemene Systeemtheorie benadrukt voornamelijk de structurele organisatie van levende systemen; de Cybernetica werkt voornamelijk de regulatie en communicatie uit, en de Dynamische Systeemtheorie biedt een historisch perspectief op levende systemen. Op basis van deze verkenning en het verkregen inzicht in de genoemde leerproblemen in de celbiologie, is gekozen om de competentie systeemdenken nader te specificeren in termen van de Algemene Systeemtheorie, i.c. ‘open systeem’ en ‘organisatieniveau’. Een belangrijk aspect van de aldus geformuleerde competentie is ‘het onderscheiden van de verschillende organisatieniveaus (cel, orgaan en organisme) en het kunnen verbinden van biologische begrippen met de specifieke organisatieniveaus. Een meer algemeen aspect van de competentie systeemdenken is ‘het heen-en-weer denken tussen algemene systeemmodellen en meer concrete representaties van verschijnselen.

De eerste stap op weg naar het integreren van systeemdenken en celbiologieonderwijs bestond uit een samenhangende beschrijving van het kennisbestand van de celbiologie vanuit systeemtheoretisch perspectief. Daarin wordt de cel achtereenvolgens als autonome, complexe en functionele eenheid geconceptualiseerd. Voor de integratie van systeemdenken en celbiologie werden op theoretische gronden twee mogelijke benaderingen gepresenteerd:

- 1) Introductie van systeemdenken als kader voor de ontwikkeling van celbiologische kennis, of
- 2) Ontwikkeling van systeemdenken als meelopbrengst uit een aantal lessen over celbiologie en daarna toe te passen op een ander biologisch thema.

Om te kunnen kiezen tussen deze benaderingen en om een scherper beeld te krijgen van een mogelijk adequate onderwijsleerstrategie voor de cel als systeem zijn twee vooronderzoeken uitgevoerd. In het eerste vooronderzoek werden twee lessen over het onderwerp hormonale regulatie ontwikkeld en beproefd. Hierbij lag de nadruk op het verbinden van de celbiologische voorkennis van leerlingen met verschijnselen op hogere organisatieniveaus. Het tweede onderzoek richtte zich op het ontwikkelen en beproeven van interactief lesmateriaal waarin een hiërarchisch systeemmodel van de vertering wordt geïntroduceerd. Uit het eerste vooronderzoek werd onder andere geconcludeerd dat een lessenserie celbiologie expliciet aandacht moet besteden aan de relatie tussen de cel en bovenliggende niveaus. Het tweede vooronderzoek liet zien dat het ontwikkelen van een systeemmodel goed samen kan gaan met het afdalen van het orgaanmaal naar het cellulair niveau. Beide studies leidden ook tot het oplossen van het probleem of de strategie voor de cel als systeem zou moeten beginnen met celbiologie of met systeemdenken. In plaats van een keuze te maken voor één van de genoemde

benaderingen, leek een synthese mogelijk waarin het verwerven van celbiologische kennis parallel loopt aan de ontwikkeling van de competentie systeemdenken.

De verschillende onderzoeksactiviteiten in deze verkennende fase genereerden verschillende ideeën over hoe celbiologieonderwijs vanuit systeemtheoretisch perspectief vorm te geven en leidde tot de definiëring van een aantal ontwerpcriteria. Deze werden omgezet in een voorlopige onderwijsleerstrategie bestaande uit een sequentie van inhoudelijke vragen en een daarmee samenhangende sequentie van onderwijsleeractiviteiten met de beoogde uitkomsten. De strategie omhelst in totaal vijf fasen: I) globale oriëntatie op de celbiologie, II) verkenning van de levensfuncties en introductie van de cel als organisme, III) explicitering van systeemdenken waarbij een systeemmodel op organismaal niveau wordt geïntroduceerd, IV) verkenning van de cel (als functionele eenheid) en de organellen met behulp van het systeemmodel, en V) het verbinden van de cel met bovenliggende organisatieniveaus.

**Hoofdstuk 4** geeft de cyclische onderzoeksfase weer. In deze fase werd de onderwijsleerstrategie aangepast en geoptimaliseerd tot een empirisch gefundeerde en adequate sequentie van leeractiviteiten. De aanvankelijk ontwikkelde strategie en de gereviseerde strategie werden beide uitgewerkt in een contextspecifiek scenario en vervolgens beproefd in twee opeenvolgende casestudies. Het hoofdstuk besteedt voornamelijk aandacht aan de resultaten van de tweede onderzoeksronde, dat wil zeggen aan het gerealiseerde onderwijsleerproces op basis van het in de eerste ronde verbeterde onderwijsmateriaal. Een kritische beschouwing en het vervolgens reviseren van de eerste strategie stelde ons beter in staat om de essentiële elementen te bestuderen van een systeemtheoretische benadering van de celbiologie. De resultaten van de tweede casestudy geven de feitelijke onderwijsleerprocessen chronologisch weer en spiegelen deze aan de verwachtingen zoals vooraf geëxpliciteerd in het scenario.

In de eerste casestudy kwam een aantal tekortkomingen van de aanvankelijke onderwijsleerstrategie naar boven. Zo bleek de strategie niet doeltreffend genoeg voor het verwerven van een belangrijke deelcompetentie van het systeemdenken: leerlingen bleken onvoldoende in staat om het systeemmodel te gebruiken als instrument voor de verkenning van de cel als functionele eenheid. Om dit probleem op te lossen richtte de aangepaste onderwijsleerstrategie zich meer op het actief betrekken van leerlingen bij het ontwikkelen van verschillende (cel)modellen, inclusief het hiërarchisch systeemmodel. De complexe aard en de microscopische schaal van de cel vormde hierbij het motief om een model te ontwikkelen dat meer inzicht verschaft in de structurele organisatie van de cel.

De gereviseerde onderwijsleerstrategie, zoals getest in de tweede onderzoeksronde, omvat vijf fasen. Na een globale oriëntatie op cellen in fase I, betrekken de fasen II, III en IV de leerlingen bij het modelleren van cellen voorafgaand aan de ontwikkeling van het ontwikkelen van een algemeen hiërarchisch systeemmodel in fase V. Fase II bestaat uit de ontwikkeling van een aanvankelijk (nog impliciet) systeemmodel van vrij levende cellen op basis van de representaties die leerlingen zelf hadden voorafgaand aan de lessenreeks. Hierbij worden leerlingen gestimuleerd om heen-en-weer te denken tussen hun eigen representaties, hun observaties van 'echte' cellen, en de modellen zoals die in hun schoolboek staan. Fase III richt zich op het toepassen van het tot dan toe ontwikkelde model op cellen van een meercellig organisme. In deze fase worden

leerlingen gestimuleerd om heen-en-weer te denken tussen verschillende representaties van dierlijke en plantaardige cellen. Vervolgens bouwen leerlingen in fase IV een driedimensionaal model van een plantaardige cel.

De laatste modelleerstep betreft het uitbreiden van het celmodel naar de bovenliggende organisatieniveaus en het onderling verbinden van de verschillende niveaus. Deze stap gaat hand in hand met het expliciteren van het systeemdenken. Tenslotte leren leerlingen het hiërarchisch systeemmodel als instrument te gebruiken om inzicht te verkrijgen in een onderwerp dat meerdere organisatieniveaus doorkruist. Deze laatste stap tracht het systeemdenken op metacognitief niveau te ontwikkelen.

Uit het testen van de tweede onderwijsleerstrategie bleek dat de aard en sequentie van de leeractiviteiten in het algemeen als adequaat konden worden beschouwd. Door middel van concrete observaties en het gebruik van verschillende celmodellen werden leerlingen in staat gesteld om de verschillende cellulaire structuren te verkennen met de bijbehorende functies en onderlinge relaties in de cel. Dit resulteerde in een geïntegreerd beeld van de cel als basis en functionele eenheid van organismen. Het actief ontwikkelen van verschillende celmodellen stuurde leerlingen in de gewenste richting en vergrootte het inzicht in de ruimtelijke en dynamische organisatie van de cel (horizontale samenhang). Ondanks het feit dat leerlingen actief betrokken waren bij de verschillende modelleeractiviteiten, leek het twijfelachtig of leerlingen van iedere stap in het onderwijsleerproces de functie van het modelleren begrepen. Een belangrijke oorzaak hiervoor leek het feit dat reflectie op het modelleerproces en het expliciteren van de functie van de verschillende modellen, inclusief het hiërarchische systeemmodel, niet altijd werden uitgevoerd zoals bedoeld.

Het probleemstellende karakter van de leeractiviteiten stimuleerde leerlingen om deel te nemen aan de opeenvolgende activiteiten die hen in staat stelde meer inzicht te verkrijgen in de cel als onderdeel van het organisme als hiërarchisch systeem. In de strategie werd geleidelijk een motief ontwikkeld voor de introductie en explicitering van het systeemdenken. Een klein aantal onderwijsleeractiviteiten bleek nog aanpassing te behoeven ter verbetering van het probleemstellende karakter van de overgang tussen de betreffende activiteiten.

In de laatste fase van de strategie verwierven leerlingen een basiscompetentie in het systeemdenken. Dit werd bewerkstelligd in een proces van heen-en-weer denken tussen een algemeen hiërarchisch systeemmodel en concrete representaties van een biologisch onderwerp dat meerdere organisatieniveaus doorkruist. Deze laatste fase liet zien dat de introductie van een systeemmodel als instrument voor het verkennen van een biologisch onderwerp succesvol was verlopen. Tegelijkertijd bleek echter dat leerlingen het model niet spontaan inzetten als instrument om de structuren en processen op verschillende organisatieniveaus onderling te verbinden. Hierbij bleek sturing door de docent onmisbaar. Er kon dan ook geconcludeerd worden dat de onderwijsleerstrategie onvoldoende leidt tot de ontwikkeling van het systeemdenken op metacognitief niveau.

**In hoofdstuk 5** wordt de definitieve onderwijsleerstrategie gepresenteerd na aanpassing van de in de tweede casestudy geteste strategie. Vervolgens wordt een formele beschrijving van de strategie gegeven door een nadere uitwerking van de drie belangrijkste elementen: de probleemstellende benadering, het verwerven van

samenhangende celbiologische kennis en het modelleerproces. Daarna wordt de centrale onderzoeksvraag beantwoord.

De tweede onderzoeksronde leverde een aantal indicaties op voor het aanpassen en bijstellen van de onderwijsleerstrategie voor de cel als systeem. De belangrijkste punten van verbetering betroffen: 1) het expliciteren van en reflectie op het modelleerproces, 2) het bijstellen van de biologische inhoud van het interactief lesmateriaal (waarin de organisatieniveaus werden geëxpliciteerd) om het probleemstellende karakter van de overgang naar de volgende activiteit te verbeteren, en 3) het expliciet beantwoorden van de centrale vraag in de plenaire reflectie na de explicitering van de organisatieniveaus. Met deze aanpassingen beschouwen we de definitieve strategie voor de cel als systeem als een adequate strategie voor het ontwikkelen van samenhangende celbiologische kennis en een basiscompetentie systeemdenken.

De weg naar systeemdenken in celbiologieonderwijs bestaat uit een opeenvolging van zes fasen die samen de didactische structuur vormen. Deze fasen bestaan achtereenvolgens uit een globale oriëntatie op de celbiologie, ontwikkeling van een model van vrij levende cellen, toepassing van dit model op cellen in een organisme, het bouwen van een driedimensionaal model van een plantaardige cel, explicitering van systeemdenken, en toepassing van het hiërarchisch systeemmodel. Met betrekking tot de ontwikkeling van samenhangende celbiologische kennis, kan de strategie gezien worden als één probleemstellende cyclus. Deze begint bij het voorgaande thema over groei en ontwikkeling op het organismaal niveau, daalt af naar het cellulaire niveau en richt zich daar op de ontwikkeling van horizontale samenhang in de celbiologische kennis. Vervolgens wordt het cellulaire niveau verbonden met het organismaal niveau en staat dus de verticale samenhang centraal.

De strategie laat zien dat voldoende kennis van een biologisch onderwerp, zoals celbiologie, nodig is om een inhoudelijk motief te ontwikkelen voor systeemdenken. Terugkijkend op de fasering van de didactische structuur, onderscheiden we de volgende stappen voor het verwerven van de competentie systeemdenken in biologieonderwijs:

1. Algemene oriëntatie en het stellen van een centrale sturende vraag die een globaal motief verschaft voor het bestuderen van het betreffende onderwerp
2. a) Toespitsing van het globale motief op een meer inhoudsspecifiek motief voor kennisuitbreiding  
b) Uitbreiding van de kennis middels onderzoek en/of het aanreiken van informatie
3. Toepassing van de verkregen kennis in een nieuwe situatie
4. Uitbreiding van de kennis en het creëren van een behoefte tot reflectie op de tot nu toe verworven competentie
5. Explicitering en uitbreiding van de competentie door verbreding van het toepassingsgebied
6. Toepassing van de competentie en het inzicht verschaffen in de bruikbaarheid van de competentie bij het leren van volgende onderwerpen

Bij nadere beschouwing kan binnen de bovengenoemde fasen eveneens een probleemstellende structuur worden herkend. In plaats van over 'fasen' kan er dus beter over probleemstellende 'cycli' worden gesproken. Voor de leerlingen wordt de overgang tussen de opeenvolgende cycli gemarkeerd door een volgende leeractiviteit

waarin een nieuwe deelvraag centraal staat. In iedere cyclus kunnen de volgende stappen worden herkend:

- a. Formulering van een deelvraag
- b. Kennisuitbreiding middels onderzoek en/of aanreiken van informatie en het creëren van een behoefte tot reflectie
- c. Reflectie op de opgedane kennis in het licht van de centrale sturende vraag en het creëren van een behoefte tot kennisuitbreiding in een specifieke richting

De ontwikkelde strategie betreft studenten actief in een modelleerproces waarbij achtereenvolgens vorming, revisie en uitbreiding van een celmodel centraal staan. Het modelleren vindt plaats in vier van de zes probleemstellende cycli. In de tweede cyclus ontwikkelen leerlingen, op basis van hun eigen representaties van cellen, een model van vrij levende cellen die vervolgens wordt toegepast op dierlijke en plantaardige cellen in cyclus 3. In een reflectie hierop wordt het model aangepast, zodat het een betere afspiegeling is van zowel vrij levende cellen als van cellen in een meercellig organisme. De ontwikkeling van het celmodel wordt gecompleteerd in cyclus 4 waarin leerlingen een driedimensionaal model bouwen met als doel de consolidatie van de geleerde celbiologische kennis en uitbreiding van het ruimtelijke inzicht in de cellulaire organisatie. De laatste stap van het modelleerproces wordt uitgevoerd in cyclus 5 en 6; In de vijfde cyclus verkennen leerlingen het verteringsproces door structuren en processen te modelleren op het organismaal, orgaan en cellulair niveau middels interactief lesmateriaal. Door de structuren en processen op ieder niveau te abstraheren, ontdekken leerlingen dat ieder niveau gerepresenteerd kan worden door eenzelfde systeemmodel. Hierbij wordt het tweedimensionale celmodel uitgebreid door het in te bedden in het algemene hiërarchische systeemmodel. Tenslotte passen leerlingen dit model van geneste, open systemen in de zesde cyclus toe op het onderwerp borstvoeding. De modelleeractiviteiten kunnen als volgt worden gekarakteriseerd:

- A. Het modelleren van concrete cellen tot een algemeen 2-D portret van de cel
- B. Het bouwen van groot 3-D model van de cel
- C. Het modelleren van visuele representaties van het organismaal, orgaan en cellulair niveau tot een algemeen hiërarchisch systeemmodel

Bij elkaar vormen de drie modelleerfasen een sequentie van onderwijsleeractiviteiten startend bij de voorkennis en idiosyncratische representaties van leerlingen en eindigend bij het beoogde hiërarchische systeemmodel.

De resultaten van dit onderzoek laten zien dat het mogelijk is om een motief te ontwikkelen voor het leren systeemdenken door de competentie te integreren in een onderwijsleerstrategie over celbiologie. Bovendien ondersteunt het de veronderstelling dat het systeemdenken helpt bij het verkrijgen van een samenhangend begrip van biologische verschijnselen. Het hiërarchisch systeemmodel dat in de onderwijsleerstrategie wordt geïntroduceerd kan tevens als beginpunt dienen voor de introductie van cybernetische en dynamische systeemmodellen in het biologieonderwijs. Daarnaast kan het dienen als opstap naar het moleculair of het ecosysteem niveau. Gezien de bredere toepasbaarheid van het systeemdenken verdient het aanbeveling dat de competentie, geformuleerd als het kunnen en willen gebruiken van verschillende systeemmodellen als metacognitieve instrumenten, verder onderzoek verdient.