

Het natuurwetenschappelijk modelleren van
dynamische systemen
Naar een didactiek voor het voortgezet onderwijs

Ormel, Bart Johannes Bernardus

Het natuurwetenschappelijk modelleren van dynamische systemen; Naar een didactiek voor het voortgezet onderwijs / B.J.B. Ormel – Utrecht: CDβ Press, Freudenthal Instituut voor Didactiek van Wiskunde en natuurwetenschappen – Flsme wetenschappelijke bibliotheek; nr. 61; 2010.

Proefschrift Universiteit Utrecht. Met literatuuropgaaf. Met samenvatting. With a summery in English.

ISBN: 978-90-73346-67-3

Trefwoorden: voortgezet onderwijs / natuurkunde / natuurwetenschappelijk modelleren / computerm modelleren / dynamische systemen / klimaat / ontwikkelingsonderzoek / didactiek

Subject headings: secondary education / science / scientific modelling / computer modelling / dynamical systems / climate / design research / pedagogy

Het natuurwetenschappelijk modelleren van
dynamische systemen
Naar een didactiek voor het voortgezet onderwijs

Scientific modelling of dynamical systems
Towards a pedagogical theory for 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. J.C. Stoof, ingevolge het besluit van het
college voor promoties in het openbaar te verdedigen op woensdag 20 januari
2010 des middags te 12.45 uur

door

Bart Johannes Bernardus Ormel

geboren op 27 april 1979 te Haaksbergen

Promotor: Prof. dr. P.L. Lijnse
Co-promotor: Dr. E.R. Savelsbergh

Dit proefschrift werd mede mogelijk gemaakt met financiële steun van NWO-
PROO, projectnummer 411-01-121.

Inhoudsopgave

1. Inleiding	1
1.1 Het belang van natuurwetenschappelijk modelleren in het voortgezet onderwijs.....	1
1.2 Modelleren in het huidige natuurkundeonderwijs	2
1.3 Doel en opzet van dit proefschrift	3
2. Theoretisch kader en onderzoeksmethode	5
2.1 Modellen en modelleren	5
2.1.1 Modellen in de natuurwetenschap.....	6
2.1.2 Het natuurwetenschappelijk modelleerproces	9
2.1.3 Conclusie: twee typerende kenmerken	13
2.2 Een modelleercompetentie verwerven.....	13
2.2.1 Een competentie voor het modelleren van complexe dynamische systemen.....	13
2.2.2 De beginsituatie van leerlingen: vaardigheden en moeilijkheden	14
2.2.3 Twee verklaringen voor de gesignaleerde moeilijkheden.....	18
2.2.4 Specificatie van een globale modelleercompetentie.....	20
2.2.5 Modelleerervaring als basis voor competentieontwikkeling	21
2.3 Ontwerprichtlijnen voor een modelleerproces op basis van eerdere curriculumprojecten	22
2.3.1 Schwarz en White: meta-modelleerkennis	23
2.3.2 Maaß: een richtinggevend modelleerprobleem	26
2.3.3 Hestenes: domeinspecifieke modelleerheuristieken	28
2.3.4 Modelleren met STELLA: systeemdynamica als vakoverstijgend kader.....	31
2.3.5 Schecker: systeemdynamisch modelleren inhoudelijk ingevuld.....	34
2.3.6 Fuchs: het systeemdynamisch reconceptualiseren van de natuurkunde	36
2.3.7 Vollebregt: probleemstellend modelleren	38
2.4 Conclusies en discussie	42
2.4.1 Natuurwetenschappelijke modelontwikkeling	43
2.4.2 Betekenisvol voor leerlingen	44
2.4.3 Productieve constructieruimte.....	45
2.4.4 Onderzoeksvraag.....	47
2.5 Methodologisch kader.....	47
2.5.1 Een bruikbare vakdidactische theorie	47
2.5.2 Het ontwikkelen en toetsen van een vakdidactische theorie	48
2.5.3 Ontwikkelingsonderzoek: het ontwerp als onderzoeksinstrument.....	50
2.5.4 Scenario-gebaseerd ontwikkelingsonderzoek	51
2.5.5 Generaliseerbaarheid, theoretische opbrengst en vervolg	51

3. Eerste onderzoeksrunde	53
3.1 Doelen en randvoorwaarden voor het onderwijsontwerp.....	53
3.2 Verantwoording van het onderwijsontwerp.....	55
3.2.1 Klimaatmodelleren als context.....	55
3.2.2 Vakinhoudelijk overzicht.....	57
3.2.3 Modelleerssoftware	61
3.2.4 Opbouw van het lesmateriaal	62
3.2.5 Eerste episode: introductie van de globale vraagstelling.....	65
3.2.6 Tweede episode: het 1-laagsmodel.....	67
3.2.7 Derde episode: het 2-laagsmodel	70
3.2.8 Vierde episode: toekomstvoorspellingen op basis van scenario's.....	72
3.2.9 Vijfde episode: terugkoppelingen	76
3.2.10 Zesde episode: synthese	82
3.3 Empirische evaluatie van het onderwijsontwerp	84
3.3.1 Procedure en databronnen.....	84
3.3.2 Schets van de deelnemende docenten en resultaten van het voorbereidingstraject.....	86
3.3.3 Eerste episode: introductie van de globale vraagstelling.....	90
3.3.4 Tweede episode: het 1-laagsmodel.....	98
3.3.5 Derde episode: het 2-laagsmodel	111
3.3.6 Vierde episode: toekomstvoorspellingen met scenario's	121
3.3.7 Vijfde episode: terugkoppelingen	128
3.3.8 Zesde episode: synthese	138
3.4 Conclusies m.b.t. het ontwerp van de eerste ronde.....	143
3.4.1 Niveau en uitvoerbaarheid van het ontwerp	143
3.4.2 Natuurwetenschappelijke modelontwikkeling.....	144
3.4.3 Betekenisvol voor leerlingen	146
3.4.4 Productieve constructieruimte.....	148
3.5 Implicaties voor een herontwerp.....	150
3.5.1 De introductie van stapsgewijs rekenen.....	150
3.5.2 Een richtinggevende vraagstelling.....	150
3.5.3 Een inzichtelijk specialisatiemodel.....	151
3.5.4 Ruimte voor productieve leerlinginbreng.....	151
3.5.5 Aandacht voor leerlijnen in het modelleerproces.....	152
4. Tweede onderzoeksrunde	153
4.1 Een inleidende module over stapsgewijs rekenen.....	153
4.1.1 Verantwoording van het ontwerp.....	153
4.1.2 Procedure en databronnen.....	158
4.1.3 Het voorbereidingstraject met de docent.....	159
4.1.4 Empirische evaluatie	160
4.1.5 De mening van de leerlingen.....	168

4.2	Het herziene onderwijsontwerp ‘klimaatmodelleren’	172
4.2.1	Herzienen t.o.v. het eerste ontwerp	172
4.2.2	Procedure en databronnen	175
4.2.3	Het voorbereidingstraject met de docent	176
4.2.4	Eerste episode: globale vraagstelling complexe dynamische modellen.....	177
4.2.5	Tweede episode: opstellen van een eerste eenvoudig model.....	181
4.2.6	Derde episode: kwalitatieve uitbreiding van het startmodel	191
4.2.7	Vierde episode: computermodellen voor numeriek modelonderzoek.....	207
4.2.8	Vijfde episode: modeluitbreiding met een in de tijd variërende modelparameter.....	230
4.2.9	Zesde episode: modeluitbreiding met een dynamische terugkoppeling	234
4.2.10	De mening van de leerlingen	243
4.3	Conclusies	245
4.3.1	Evaluatie van de ontwerpherzienen.....	245
4.3.2	Conclusie over het herziene ontwerp.....	247
5.	Conclusies en discussie	249
5.1	Hoe kan modelleerervaring in het voortgezet onderwijs vorm krijgen? ...	249
5.1.1	Natuurwetenschappelijke modelontwikkeling	249
5.1.2	Een betekenisvol proces	254
5.1.3	Productieve constructieruimte.....	257
5.2	Implicaties	259
5.2.1	Competentieontwikkeling en modelleren in het curriculum	259
5.2.2	Voorwaarden aan implementatie van een modelleercurriculum.....	263
5.2.3	Vragen voor vervolgonderzoek	264
	Referenties	266
	Samenvatting	274
	English summary	280
	Dankwoord	287
	Curriculum vitae	289
	Flisme-reeks	290

1. Inleiding

Modelleren is een kernactiviteit in de natuurwetenschap. In het voortgezet onderwijs krijgt dit proces echter geen noemenswaardige invulling en ook de didactische kennis die nodig is om modelleren goed vorm te geven in het onderwijs is nog zeer onvolledig, hetgeen de aanleiding vormt voor het ontwikkelingsonderzoek dat in dit proefschrift wordt beschreven.

1.1 Het belang van natuurwetenschappelijk modelleren in het voortgezet onderwijs

Modelleren is het proces waarin een zeker systeem of een bepaalde situatie in natuurwetenschappelijke en/of wiskundige termen beschreven wordt. Door er modellen van te construeren worden verschijnselen uit de realiteit 'ingepast' in een natuurwetenschappelijk wereldbeeld: de vorming en bewegingen van de hemellichamen, de ontwikkeling van het weer op aarde, de verspreiding en werking van ziektekiemen, het herstel van een verstoord ecosysteem of juist het uitblijven ervan. Met behulp van een model kan men verwachtingen afleiden over het gedrag van het gemodelleerde verschijnsel of systeem. Als die verwachtingen bij toetsing aan de werkelijkheid juist blijken dan kan dit leiden tot een toenemend vertrouwen in het model, terwijl onjuiste verwachtingen aanleiding kunnen zijn tot herziening van het model. Als een model inzicht geeft in het te verwachten gedrag van het beschreven systeem wordt het ook mogelijk om dat systeem te sturen en te manipuleren. Modellen spelen zodoende een belangrijke rol in de techniek en dragen bij aan het realiseren van wonderen als een fusiereactor of een *lab-on-a-chip*.

Een kennismaking met modelleren biedt leerlingen een reëel beeld van (natuur)wetenschappelijke studie en onderzoek, en van bijbehorende beroepsperspectieven. Daarnaast is zo'n kennismaking van belang om publieksinformatie over modeluitkomsten te kunnen interpreteren en op waarde te schatten. Het brede publiek krijgt, naast het weerbericht, vooral te maken met de uitkomsten van natuurwetenschappelijke modellen als deze gebruikt worden in de beleidsondersteuning, zoals bij natuur- en klimaatbeheer, of bij het bestrijden van epidemieën. Het gaat dan vaak om het voorspellen van het gedrag van complexe systemen, waarvoor ingewikkelde modellen gemaakt zijn die met krachtige computers moeten worden doorgerekend. De betrouwbaarheid van zulke modellen staat regelmatig ter discussie in het maatschappelijk debat en enig begrip van de mogelijkheden en beperkingen van het natuurwetenschappelijk modelleren is dan belangrijk.

Het is daarom wenselijk dat leerlingen inzicht verwerven in het verklaren van gedrag van complexe systemen, in het construeren en doorrekenen van dynamische modellen en in de (on)zekerheden en (on)mogelijkheden die aan het gebruik ervan kleven. Het is echter niet voldoende deze kennis alleen als feit aan te bieden: tot de

doelen van het voortgezet onderwijs behoort het leren van natuurwetenschappelijke vakinhoud, waaronder (basis)modellen, maar ook het leren bedrijven van natuurwetenschap.

In art class, you'll learn to appreciate some great works of art, and you'll create some art yourself. In science class you'll spend plenty of time on appreciating great works of science, but how about the creative part? (Ian Lawrence op de GIREP-conferentie in Amsterdam (2006); geciteerd in: Savelsbergh, 2008, p. 3)

Op basis van onderwijskundig en vakdidactisch onderzoek wordt de stelling verdedigd dat (computer)modelleren bijdraagt aan een beter begrip van de vakinhoud, een beter begrip van het proces van kennisvorming en van de mogelijkheden en beperkingen van de eigen kennis (Gilbert & Boulter, 2000; Hestenes, 1987; Van Joolingen, De Jong, Lazonder, Savelsbergh, & Manlove, 2005; White & Frederiksen, 1998). Het is dan ook niet meer dan logisch dat modelleren een van de sleutelwoorden is in de voorgestelde nieuwe eindexamenprogramma's voor de natuurwetenschappelijke vakken voor havo en vwo (Savelsbergh, 2008; commissie Nieuwe Natuurkunde, 2006; commissie Toekomst WiskundeOnderwijs, 2007).

1.2 Modelleren in het huidige natuurkundeonderwijs

Om een systeem of situatie in een model te representeren moet het te onderzoeken verschijnsel in kaart gebracht worden en de mechanismen die het gedrag ervan kunnen verklaren, geïdentificeerd. Wat een geschikte representatie is, is mede afhankelijk van de onderzoeksvraag die beantwoord moet worden. Het modellerenproces kan dus in essentie teruggebracht worden tot het conceptualiseren van een zeker verschijnsel en het evalueren van het model ervan.

Veel van de vakinhoud van het reguliere natuurkunde curriculum in het voortgezet onderwijs betreft de grootheden om fysische verschijnselen te conceptualiseren en formules om relaties tussen deze grootheden te kwantificeren. Het kwalitatieve modellerenproces, waarin het met name gaat om het identificeren van een mechanisme, het conceptualiseren van een systeem en het evalueren van een ontwikkeld model, is in het natuurkundeonderwijs echter slecht herkenbaar. Daardoor houden veel leerlingen een slecht begrip van de precieze inhoud van de geleerde concepten, getuige de grote hoeveelheid literatuur over 'misconceptions' (Duit, 2007), en hebben zij weinig inzicht in de modelmatige aard van de geleerde relaties (Grosslight, Unger, Jay, & Smith, 1991).

Voor veel onderzoek aan dynamische systemen zijn computers onmisbaar in de natuurwetenschappelijke praktijk. In het voortgezet onderwijs worden dynamische verschijnselen echter slechts zeer beperkt behandeld. Van veranderende situaties worden vooral de vergelijkingen opgesteld voor de begin- en eindsituaties, maar een beschrijving van het tussenliggende proces is zeldzaam. Sinds de jaren negentig heeft het onderwerp computermodelleren niettemin steeds meer aandacht gekregen, en wordt

in het huidige natuurkunde-examenprogramma van leerlingen verwacht dat zij kunnen werken met computermodellen. De meest gebruikte modelleersoftware is *Coach*.

In de gangbare methodes zoals *Newton*, *Systematische Natuurkunde* en *Scoop* wordt aan computermodelleren een apart hoofdstuk besteed. De insteek in de genoemde methodes om modelleren als onderwerp te behandelen is dat ingewikkelde situaties toch precies beschreven kunnen worden of dat de computer gecompliceerde experimenten vervangt. In de boeken worden voorbeelden genoemd als het modelleren van bodembeweging, veel-deeltjes-systemen en aerodynamica. Die complexiteit blijkt echter nauwelijks in de opdrachten waaraan de leerlingen zelf werken; deze betreffen vooral de invloed van wrijving in 1- en 2-dimensionele bewegingen, en, vrijwel steeds in de marges, radioactief verval en het op- of ontladen van een condensator. Alleen in *Newton* is er daarnaast ook nog enige aandacht voor warmte en voor trillingen. Leerlingen krijgen dus vooral te maken met zeer elementaire situaties waarin de computer wel lastig rekenwerk overneemt, maar waarin de gemodelleerde systemen goed gedefinieerd zijn. In de leerlingopdrachten ligt de nadruk op het manipuleren van modelregels, modellen zijn veelal kant en klaar gegeven. Typische opgaven zijn om een gevraagde grootheid zichtbaar te maken, af te lezen en vervolgens zo te fitten dat er overeenstemming ontstaat met een meetgrafiek.

De rol van modelleren en van modellen in het huidige onderwijs staat dus in schril contrast met het belang dat er in de vakvernieuwingscommissies aan wordt toegekend. Wat met name ontbreekt, is om de causale relaties die het dynamisch gedrag veroorzaken toe te passen in niet-artificiële situaties. Daardoor ontbreekt het zicht op wat nu de kracht is van modelleren. Leerlingen hoeven niet zelf computermodellen te bouwen, en het computermodelleren komt niet geïntegreerd aan bod met de vakinhoud.

1.3 Doel en opzet van dit proefschrift

Bestaand onderzoek biedt ondersteuning voor het idee dat (computerondersteund) modelleren leerlingen kan helpen bij het leren redeneren over dynamische systemen (Feurzeig & Roberts, 1999; Löhner, 2005; Stratford, 1997; Westra, 2008). Toch worden de geclaimde voordelen van modelleren in de onderwijspraktijk nog niet zomaar gerealiseerd (Lijnse, 2008). Bovendien biedt dat onderzoek weinig specifieke aanwijzingen voor de vormgeving van onderwijs. De begrippen *model* en *modelleren* worden in de verschillende onderzoeken verschillend ingevuld en vaak niet precies gedefinieerd. Daardoor is onduidelijk welke modelleercompetentie een leerling dient te verwerven om een specifieke vakinhoud door modelleren te leren begrijpen. De centrale vraag voor dit proefschrift is daarom:

Hoe en in hoeverre moeten en kunnen leerlingen in het voortgezet onderwijs leren natuurwetenschappelijk te modelleren, in het bijzonder gegeven de beschikbaarheid van ICT-modelleertools?

We beperken ons daarbij tot het modelleren van dynamische systemen. Om de vraag te kunnen beantwoorden hebben we gekozen voor een zogenaamd ontwikkelingsonderzoek. Dat wil zeggen dat we op basis van initiële inzichten onderwijs ontwikkelden en deze in een cyclisch proces hebben getoetst en bijgesteld.

In hoofdstuk 2 beschrijven we de essentiële kenmerken van natuurwetenschappelijke modellen en van het natuurwetenschappelijke modelleringsproces. Vervolgens bespreken we de daarvoor benodigde vaardigheden en de moeilijkheden die leerlingen daarmee hebben. Op basis van een aantal curriculumprojecten identificeren we globale ontwerprijtlijnen om een modelleringsproces vorm te geven waarmee leerlingen modelleringservaring kunnen opdoen als basis voor een te ontwikkelen modelleringscompetentie. Deze vormden de uitgangspunten voor een prototypisch onderwijsontwerp dat in twee onderzoeksronden in de praktijk is geëvalueerd en bijgesteld.

In hoofdstuk 3 wordt het eerste lesontwerp, over het voorspellen van de temperatuur, gepresenteerd en verantwoord. Dit ontwerp is tot stand gekomen in samenwerking met een docentenpanel en klimaatwetenschappers van het IMAU (Institute for Marine and Atmospheric research Utrecht), en vervolgens door vier docenten in hun natuurkundelessen getest. In het hoofdstuk wordt een gedetailleerde analyse van de laatste twee uitvoeringen gegeven, op basis waarvan beargumenteerd wordt welke veranderingen in het ontwerp nodig zijn. Deze eerste ronde was primair exploratief van aard en was er op gericht om de haalbaarheid en geschiktheid van de geselecteerde vakinhoud te beoordelen en om zicht te krijgen op de didactische randvoorwaarden voor de uitvoerbaarheid van het geplande onderwijsleerproces.

Het herziene ontwerp, de verantwoording en de empirische evaluatie ervan zijn het onderwerp van hoofdstuk 4. In de tweede onderzoeksrunde stond de kwaliteit van het modelleringsproces centraal, alsmede gewenste ontwikkelingen in modelleringsvaardigheden.

In het laatste hoofdstuk van dit proefschrift worden de richtlijnen waarmee het ontwerp is vormgegeven kritisch geëvalueerd en waar mogelijk aangescherpt. Op basis van reflectie op de opgedane ervaringen wordt een modelleringscurriculum geschetst en worden aanwijzingen geformuleerd voor docentvoorbereiding.

2. Theoretisch kader en onderzoeksmethode

In dit hoofdstuk geven we allereerst een nadere definitie van het natuurwetenschappelijk modelleren van complexe dynamische systemen. In paragraaf 2.2 bespreken we aanwijzingen uit eerder onderzoek waaruit blijkt dat een domeingebonden competentie onderwijsbaar zou kunnen zijn. Een noodzakelijke voorwaarde hiervoor is dat leerlingen in elk geval ook zelf modelleerervaring opdoen. Vervolgens worden mogelijkheden en moeilijkheden van leerlingen ten aanzien van het uitvoeren van typische modelleeractiviteiten besproken. Op basis daarvan identificeren we essentiële elementen voor een globale basiscompetentie voor modelleren in het voortgezet onderwijs. De manier waarop het onderwijs in natuurwetenschappelijk modelleren is vormgegeven in een aantal grotere curriculumprojecten wordt besproken in paragraaf 2.3, om daaraan richtlijnen te ontleen voor een onderwijsontwerp dat leerlingen modelleerervaring moet bieden. Er wordt een drietal uitgangspunten geformuleerd die in modelleeronderwijs gerealiseerd moeten worden (paragraaf 2.4), namelijk:

1. Natuurwetenschappelijke modelontwikkeling: de essentiële kenmerken van het natuurwetenschappelijk modelleerproces komen in het onderwijs tot uitdrukking. In het bijzonder functioneren modelkeuzes en vereenvoudigingen binnen een doelgericht probleemoplosproces, en is het gedrag van complexe dynamische systemen gerelateerd aan het gemodelleerde mechanisme.
2. Betekenisvol voor leerlingen: het doelgerichte karakter van het modelleerproces is voor de leerlingen duidelijk als zij op elk moment kunnen inzien hoe de te ondernemen modelleeractiviteiten bijdragen aan het na te streven doel.
3. Productieve constructieruimte: leerlingen zijn zelf actief betrokken in het modelleerproces. Zij maken productieve beslissingen en keuzes die zij ook kunnen onderbouwen.

Het hoofdstuk eindigt met de onderzoeksvraag waarop in dit proefschrift een antwoord gezocht wordt: hoe zijn deze uitgangspunten voor het gewenste onderwijs in concreet modelleeronderwijs te realiseren?

2.1 Modellen en modelleren

In hoofdstuk 1 is beargumenteerd dat leerlingen een zeker inzicht en vaardigheid nodig hebben in het modelleren van complexe dynamische systemen, *i.e.* dat zij een modelleercompetentie bezitten. Praktisch betekent dit dat zij in zekere situaties zullen laten zien over bepaalde inzichten te beschikken en zo'n modelleerproces kunnen doorlopen. Natuurlijk moet er onderscheid gemaakt worden tussen de mate waarin een expert een modelleercompetentie bezit en de beheersingsgraad die voor het onderwijs acceptabel is (in het vervolg een basiscompetentie genoemd). Om een mate van beheersing te duiden, is een verwijzing nodig naar het spectrum van situaties

waarin de competentie van de leerlingen tot uiting moet komen (Van Merriënboer, Van der Klink, & Hendriks, 2002; Niss, 2004). Meerdere onderzoekers hebben geprobeerd om een modellercompetentie te definiëren (Maaß, 2006; Savelsbergh, 2008), door Maaß omschreven als “skills and abilities to perform modelling processes appropriately and goal-oriented as well as the willingness to put these into action” (p. 117). Hoe een modellercompetentie gespecificeerd wordt, hangt samen met de manier waarop het modellerproces inhoud krijgt. Het is daarom passend om eerst het modelbegrip en de inhoud van het modellerproces te definiëren.

2.1.1 Modellen in de natuurwetenschap

In vrijwel alle vormen van natuurwetenschappelijk onderzoek wordt intensief gebruik gemaakt van modellen. Afhankelijk van het onderwerp van onderzoek en van de rol die het model vervult binnen dat onderzoek kunnen die modellen op het eerste gezicht heel verschillend zijn. Vergelijk een ruimtelijk molecuulmodel met een wiskundig model, of een vliegtuigmodel voor in de windtunnel met een diermodel bij farmacologisch onderzoek.

Toch hebben die heel verschillende modellen ook iets gemeen en er is een uitgebreide traditie van wetenschapsfilosofisch onderzoek waarin geprobeerd wordt de essentie van dat gemeenschappelijke te karakteriseren. Een synthese van zulke algemeen geldige kenmerken uit wetenschapsfilosofische literatuur werd door Van der Valk, Van Driel en De Vos (2007) getoetst bij auteurs van recent natuurwetenschappelijk onderzoek waarin modellen een prominente plaats hebben. Zij komen tot de volgende kenmerken (p. 480–482):

1. Een model verwijst altijd naar een modelobject, en is ontworpen met een specifiek doel.
2. Een model dient
 - als onderzoeksinstrument om informatie te krijgen over het modelobject, dat zelf niet eenvoudigweg geobserveerd of gemeten kan worden;
 - als representatie van de wetenschappelijke kennis over het modelobject, om besluitvorming omtrent het modelobject te faciliteren.
3. In het domein waarbinnen het model valide gebruikt mag worden heeft het model enige overeenkomsten met het modelobject. Deze maken het mogelijk dat de onderzoeker het doel dat hij met het model heeft, realiseert (in het bijzonder: om er hypothesen aan te ontleen of om voorspellingen te doen die getest kunnen worden).
4. Een model verschilt in zekere opzichten van het modelobject. De verschillen maken het aantrekkelijker om het model te onderzoeken dan het modelobject zelf.
5. Een model heeft altijd een compromiskarakter ten gevolge van de conflicterende eisen die aan het model gesteld worden.
6. Modelconstructie vereist creativiteit, onder meer om een – voor het doel van het model – optimaal compromis te vinden tussen de gewenste overeenkomsten en benodigde verschillen met het modelobject.

7. Van hetzelfde modelobject kunnen meerdere consensusmodellen naast elkaar bestaan.¹ Niettemin kan op een zeker moment één model het beste zijn, afhankelijk van de vereiste precisie (van bijvoorbeeld de modelvoorspellingen of de ontwerpspecificaties).
8. In de loop van een onderzoek kan een model een ontwikkeling doormaken.

In bovenstaande opsomming van modelkenmerken ligt het accent sterk op de relatie tussen model en werkelijkheid: de eerste vijf punten van Van der Valk et al. hebben hierop betrekking. Dit vormt een afspiegeling van de discussies hierover in de wetenschapsfilosofie (cf. Cartwright, 1983; Giere, 1999; Hacking, 1983). Ook veel didactische onderzoeken richten zich juist op dit aspect (bijvoorbeeld Gilbert & Boulter, 1998). In deze discussies wordt veel aandacht besteed aan het model als een object dat iets voorstelt (representatie). De vraag is dan wát het model voorstelt en hoe zich dit verhoudt tot de werkelijkheid (Bailer-Jones, 2002). Vanuit verschillende filosofische uitgangspunten, zoals instrumentalisme versus realisme, komt men dan tot onoplosbare meningsverschillen. Voor de wetenschappelijke praktijk van het modelgebruik hebben deze discussies echter geen grote gevolgen gehad. De wetenschapsfilosoof Giere betoogt dan ook dat de focus op een “two-place relationship between linguistic entities and the world” tot schijnproblemen leidt, omdat het model zijn ‘betekenis’ ontleent aan de context waarin het gebruikt wordt. Hij stelt voor het antwoord op de vraag naar de betekenis van het model te beschouwen als afgeleide van de modelleerpraktijk waarbinnen dat model functioneert:

Shifting the focus to scientific practice suggests that we should begin with the activity of representing, which, if thought of as a relationship at all, should have several more places. One place, of course, goes to the agents, the scientists who do the representing. Since scientists are intentional agents with goals and purposes, I propose explicitly to provide a space for purposes in my understanding of representational practices in science. So we are looking at a relationship with roughly the following form: S uses X to represent W for purposes P. (Giere, 2004, p. 743).

Hoewel ook bij bijvoorbeeld Van der Valk et al. sprake is van een doel dat een onderzoeker nastreeft, van creativiteit en van modelontwikkeling, ligt de focus bij de betekenis van het model als entiteit op zich. De activiteit van het modelleren en de rol van de onderzoeker daarin als ‘intentioneel handelend subject’ worden nauwelijks uitgewerkt. Dat is wellicht ook niet verwonderlijk omdat Van der Valk et al. hun analyse begonnen bij de eindproducten van de wetenschap (gepubliceerde artikelen). Bovendien was het onderzoek van Van der Valk et al. gericht op het vinden van een ‘grootste gemene deler’ van diverse vormen van modelgebruik in de wetenschappen. Door de beschrijving toe te spitsen op modellen van complexe

¹ Een consensusmodel is een model dat in de wetenschappelijke gemeenschap algemeen aanvaard is en dat niet (meer) ter discussie staat (Van Hoeve-Brouwer, 1996). Ook: canoniek model (Van Oers, 1988).

dynamische systemen krijgen de generieke kenmerken al een concretere invulling; dit wordt hieronder gedaan. In de daaropvolgende sectie beschrijven we het modelleringsproces in termen van de activiteiten die wetenschappers uitvoeren om een model van een complex, dynamisch systeem te construeren en te onderzoeken.

Een complex systeem kenmerkt zich per definitie als een systeem met een groot aantal variabelen en invloeden; de complexiteit is een structuurkenmerk. Bij wetenschappelijke praktijken waarin complexe, dynamische systemen worden gemodelleerd valt onder andere te denken aan klimaatmodelleren, het modelleren van colloïdale systemen, ecologisch modelleren en economisch modelleren. Het onderzoek in zo'n praktijk is gericht op het voorspellen en verklaren van de tijdsontwikkeling van het systeem. Nu eens ligt de nadruk op het systeemgedrag als een autonoom verschijnsel, dan weer betreft het onderzoek naar het effect van een interventie. Om in dergelijk onderzoek inzicht te krijgen in een systeem wordt een model van het systeem ontwikkeld waarin de eigenschappen van het systeem volgen uit een onderliggend causaal mechanisme. Het construeren van een fysisch model is *theoriegedreven*, dat wil zeggen: uitgaande van de grootheden en relaties tussen grootheden die in een fysische theorie worden voorgeschreven. In een fysisch-mathematisch model zijn de fysische eigenschappen van een systeem gerepresenteerd als kwantitatieve variabelen en worden veranderingen in deze variabelen door wiskundige relaties gekwantificeerd.

Een model dat gebruikt wordt om kwalitatief inzicht te krijgen in de basale interacties die het systeemgedrag determineren, fungeert als een *toy model*. Voor het betrouwbaar voorspellen van het gedrag van een complex systeem is dat niet voldoende; wetenschappers willen grootheden die het systeem karakteriseren ook voldoende nauwkeurig kunnen berekenen. Niet alleen de belangrijkste mechanismen zijn dan van belang, maar er moet ook rekening worden gehouden met vele details en kleinere invloeden.

Over het algemeen is het ontwikkelen en onderzoeken van professionele modellen voor complexe systemen een langdurig proces. Daarin kunnen verschillende groepen specialisten elk verschillende delen van het model gedetailleerd uitwerken en maken wetenschappers gebruik van modellen die door anderen zijn ontwikkeld. Vaak zijn er vele iteraties nodig om, beginnend met een toy model, te eindigen met een model dat het systeemgedrag adequaat beschrijft, inclusief de eventuele grenzen aan die voorspelbaarheid. Het doorrekenen van de mathematische modellen vereist behoorlijk wat rekenkracht, waarvoor de computer onontbeerlijk is.

In de ontwikkeling van toy model naar accuraat model is de spanning herkenbaar tussen gewenste precisie enerzijds en eenvoud anderzijds: “[The scientist] correlates the missing predictive accuracy of models with the insights provided by a model – insight compensates for lack of detail” (Bailer-Jones, 2002, p. 286). Van der Valk et al. identificeren deze spanning als een essentieel kenmerk van modellen. Vanwege het compromis tussen eenvoud en precisie moeten de waarden die de

modellen voorspellen met een zeker voorbehoud geïnterpreteerd worden. Door verschillende oorzaken kunnen er onzekerheden in de voorspellingen zitten:

- Het gedrag van het systeem wordt beïnvloed door veel factoren en processen. Het is veelal niet mogelijk om deze allemaal in rekening te brengen, omdat dit (a) te veel werk is, (b) het modelgedrag onbegrijpelijk wordt omdat de bijdrage van elke invloed niet goed onderscheiden wordt, en (c) het model dan niet meer door te rekenen is. Bovendien is het soms niet eens zeker of alle belangrijke factoren wel bekend zijn.
- Vaak is de relevante theorie wel bekend (mechanica, thermodynamica, etc.), maar is het systeem te ingewikkeld om alles in termen van fundamentele wetten te beschrijven. Er zijn dan ook fenomenologische relaties nodig.
- Al bij de invoer van parameterwaarden kunnen onnauwkeurigheden in het model 'ingebakken' worden door onnauwkeurigheden in gebruikte meetgegevens. Uit het klimaatonderzoek zijn bijvoorbeeld de beperkingen bekend dat niet van het gehele relevante aardoppervlak meetgegevens beschikbaar zijn en dat directe metingen slechts een beperkte tijdspanne omvatten. Directe en indirecte meetmethoden moeten met elkaar gekalibreerd worden.
- De gevoeligheid van het systeem bepaalt hoe sterk de uitkomsten afhangen van de nauwkeurigheid van de invoer. Soms kan een kleine onnauwkeurigheid grote onzekerheid in de uitkomst opleveren. Dat kleine verschillen in invoer tot verschillend systeemgedrag leiden, is kenmerkend voor chaotische systemen.
- Het vinden van modeluitkomsten vereist het numeriek doorrekenen van grote stelsels van vergelijkingen. Voor grote modellen is de beschikbare reken capaciteit een beperkende factor bij het modelontwerp en bij modelonderzoek. Beperkingen aan het rekenalgoritme zelf kunnen gevolgen hebben voor de uitkomsten van het model.

Evaluatie van dergelijke oorzaken van onzekerheid zijn noodzakelijk om zicht te hebben op de begrenzingen van een modelvoorspelling.

2.1.2 Het natuurwetenschappelijk modelleerproces

In een (natuur)wetenschappelijk modelleerproces zijn karakteristieke deelprocessen te onderscheiden. Deze liggen gedeeltelijk al besloten in de genoemde modelkenmerken, zoals het formuleren van een doel, het opstellen van toetsbare voorspellingen, het testen van het model, en evaluatie en revisie van het model.

In een onderzoek van enige omvang en complexiteit zal de evaluatie vaak leiden tot nieuwe of bijgestelde vragen en/of modellen, en zijn er meerdere iteraties of cycli nodig voordat de onderzoeksvragen bevredigend beantwoord zijn. In de onderwijskundige en didactische literatuur over modelleren wordt deze cyclus door verschillende auteurs in verschillende bewoordingen beschreven. De ontstaansgeschiedenis van deze procesmodellen is overeenkomstig: ze zijn niet

gebaseerd op een empirische beschrijving van expertgedrag, maar komen voort uit een – normatieve – taakanalyse en, voor een deel, uit retrospectie van ervaren onderzoekers. De modellen worden gepresenteerd als een doelmatige manier om een probleem aan te pakken. Voor zover de beschrijvende validiteit van dergelijke modellen empirisch getoetst is, blijkt dat de genoemde activiteiten wel te herkennen zijn in het expertgedrag (Zhang, Liu, & Krajcik, 2006) maar dat experts bij complexere problemen veelvuldig afwijken van de strikte chronologie (Fortus, 2005; Willemain, 1995).

Niettemin kan een procesmodel bruikbaar zijn om het modellerenproces voor leerlingen hanteerbaar te maken, om een onderwijsontwerp te structureren (zie bijvoorbeeld Hestenes, 1987; Schwarz & White, 2005) en/of als analysekader voor de modellerenprocessen van leerlingen (Löhner, 2005; Maaß, 2006). De meeste van die beschrijvingen komen onderling sterk overeen en ook de overeenkomsten met algemene procesmodellen voor probleemoplossen of voor het doen van onderzoek

Tabel 1. Activiteiten in het modellerenproces volgens verschillende auteurs, geordend naar de vier-fasen indeling die in dit onderzoek gehanteerd wordt.

	Probleem- verkenning	Modelspecificatie en implementatie	Modelonderzoek	Evaluatie
Maaß (2006)	Probleemsituatie vereenvoudigen	'Echt model' mathematiseren	Oplossing zoeken met wiskundig model	Wiskundige oplossing interpreteren en valideren
Savelsbergh (2008)	Situatie analyseren Probleem definiëren Vereenvoudigen	Conceptueel model formaliseren Analyseren	Wiskundig model implementeren Computermodel doorrekenen	Modeluitkomst interpreteren (Experimenteel) toetsen
Hogan & Thomas (2001)	Construeren modeldiagram Eerder model reviseren	Model kwantificeren		Uitkomsten interpreteren
Hestenes (1985)	Beschrijving systeem m.b.v. objectvariabelen Karakteriseren van dynamisch gedrag en type interactie	Specificeren van beginsituatie, beweging- en interactiewetten	Wiskundig model ramificeren	Modeluitkomst valideren
Schwarz & White (2005)	Vraag stellen Hypothese opstellen Situatie onderzoeken Data analyseren	Modelleren		Evalueren
Willemain (1995)	Context onderzoeken Probleem definiëren Variabelen en relaties bepalen	Parameters schatten en berekenen Rekenalgoritme kiezen	Model testen Model onderzoeken Resultaten verkrijgen	Evalueren Resultaten toepasbaar maken

zijn opvallend. Wel is er een grote variatie in voorgestelde labels en definities daarvan in de literatuur. Verschillen op detailniveau zijn vaak te verklaren uit verschillen in de beoogde leerdoelen of de gebruikte modelleertaken. Gegeven de beperkte empirische validiteit van de voorgestelde procesmodellen lijkt het voor didactisch gebruik vooral van belang om een eenvoudige en inzichtelijke indeling van het modelleerproces te hanteren met concrete operationalisaties van de gehanteerde fasen. We onderscheiden vier fasen om de belangrijkste typen activiteiten te ordenen, namelijk probleemverkenning, modelspecificatie en implementatie, modelonderzoek en evaluatie (zie Tabel 1).

Probleemverkenning

In de onderzoekspraktijk begint een wetenschappelijk modelleerproces vaak vanuit een slechtgedefinieerd probleem, met eventueel een of meerdere hypothesen die onderzocht kunnen worden. Om een slechtgedefinieerd probleem oplosbaar te maken moeten de gehanteerde begrippen geoperationaliseerd worden. De benodigde concepten en relaties worden ontleend aan bestaande natuurwetenschappelijke theorieën en modellen.

Vaak is het nodig om het probleem in te perken voordat het succesvol opgelost kan worden. Relevante strategieën voor dit inperken zijn bijvoorbeeld om te beginnen met een eenvoudiger versie van het probleem, dat in ieder geval wel op te lossen is, en/of om in eerste instantie alleen de belangrijkste invloed te modelleren (Bailer-Jones, 2002; Schoenfeld, 1985). Het formuleren van een goede onderzoeksvraag en het opstellen van testcriteria vereist al enig idee van de situatie. In de beginfase van het modelleerproces zullen de voorstelling van de te onderzoeken situatie (het conceptueel model) en de vraagstelling zich dus in onderlinge samenhang ontwikkelen.

In een studie naar expertgedrag bij het oplossen van een aantal slechtgedefinieerde problemen vond Schoenfeld dat professionele wiskundigen de helft van hun tijd spenderen aan het 'begrijpen van het probleem' (Schoenfeld, 1985); in een onderzoek door Willemain besteedden professionele modelleerders hier zo'n 15% van de tijd aan (Willemain, 1995). Hoewel ook dat nog een substantieel deel van de tijd is, is het verschil tussen de bevindingen van Schoenfeld en van Willemain opmerkelijk. Een oorzaak voor dit verschil kan gelegen zijn in de aard van de opdracht die de experts kregen. De wiskundigen waren geselecteerd als experts in probleemoplossen, maar kregen wiskunde problemen uit een ander domein dan waarin ze normaliter werkzaam waren. De experts van Willemain kregen opdrachten die min of meer op hun gewone werkterrein lagen.

Bekend is dat domeinkennis voor een belangrijk deel verschillen verklaart in prestaties van experts en beginners (Shin, Jonassen, & McGee, 2003). Experts ontleen richting aan hun kennisbasis, in de vorm van ervaringen met soortgelijke problemen, situationele kennis en 'kant-en-klare' modellen (Chi, Feltovich, & Glaser, 1981; Savelsbergh, De Jong, & Ferguson-Hessler, 2002).

Modelspecificatie en implementatie

Om (kwantitatieve) resultaten te kunnen genereren moet het conceptueel model geoperationaliseerd worden, bijvoorbeeld in de vorm van een stelsel van differentievergelijkingen met concrete parameterwaarden. De benodigde gegevens zijn vaak maar gedeeltelijk beschikbaar en/of niet onbeperkt nauwkeurig. Het is dan noodzakelijk om schattingen te maken om het model toch door te kunnen rekenen. De aannames en vereenvoudigingen die nodig zijn om een waarde te kunnen schatten introduceren nieuwe onnauwkeurigheden in de modeluitkomsten.

Om een stelsel van vergelijkingen door te kunnen rekenen wordt dit geïmplementeerd in een rekenprogramma.

Modelonderzoek

Allereerst wordt natuurlijk nagegaan of het model zich naar verwachting gedraagt. Als het model zich bij tests volgens verwachting gedraagt, ontstaat enig vertrouwen in het model en kan het model gebruikt worden voor het beantwoorden van de onderzoeksvraag.

Verder is modelonderzoek belangrijk voor het verwerven van inzicht in een systeem en eventueel nieuwe onderzoeksvragen:

In science there is an important, and extremely common, form of experiment, at times referred to somewhat dismissively as exploratory, that is guided by no specific hypothesis to be tested, and no clear control condition, but only a vague and general direction of inquiry. The goal of exploratory experiments is to permit phenomena to appear that will invite exploration or suggest whole new forms of representation or generate new hypotheses. (Klahr & Simon, 1999, p. 526)

Complexe vraagstukken vragen om een uitgebreid modelonderzoek om alle relevante uitkomsten in kaart te brengen: ranges voor waarden, regimes in uitkomsten, overgangen daartussen en afhankelijkheden tussen variabelen. Van tevoren is het vaak niet goed in te schatten welke modelgedragingen relevant zijn; immers, om het systeem nader te kunnen onderzoeken is het model nu juist nodig.

Evaluatie

In de evaluatie worden de uitkomsten beoordeeld in het licht van de vraagstelling, de opgeworpen hypothesen en empirische gegevens die beschikbaar zijn. Het model moet toetsbare voorspellingen kunnen doen om modevaluatie mogelijk te maken. Om de uiteindelijke modelresultaten op hun waarde te kunnen schatten, is inzicht nodig in de bronnen van onzekerheid.

Het gevolg van de evaluatie kan zijn dat het model gereviseerd moet worden, of dat er nieuwe onderzoeksvragen rijzen (Wong & Hodson, 2009); in dat geval is er sprake van een modelleercyclus. Doordat experts goed gespecificeerde verwachtingen hebben van de modeluitkomsten, kunnen ze goed onderscheid maken tussen verwachte en onverwachte uitkomsten. Het zijn vooral onverwachte

uitkomsten die de aandacht krijgen en die leiden tot redeneer- en modelleeractiviteit (Dunbar, 2000).

2.1.3 Conclusie: twee typerende kenmerken

In het voorgaande is modelleren omschreven als een proces van kennisontwikkeling en van kennistoepassing. Met name twee kenmerken van natuurwetenschappelijke modelontwikkeling bepalen de aard van het proces en de modellen.

Ten eerste is modelontwikkeling een doelgericht probleemoplosproces. De verschillende activiteiten die in het modelleerproces te identificeren zijn, volgen niet uit een prescriptieve beschrijving van het proces maar ontleen hun rationale aan de verwachte bijdrage ervan aan de oplossing. Startend vanuit een slechtgedefinieerd probleem leiden strategische keuzes tot een sequentie van goed gedefinieerde en hanteerbare deelproblemen, waarvan elk aanleiding geeft tot een eigen modelleercyclus. Modeliteraties zijn dus het resultaat van inperkingen die gemaakt moeten worden om greep te krijgen op een complex probleem. Hoewel inperkingen de kans op succes vergroten, ontleen modellen tegelijkertijd hun compromiskarakter nu juist aan overwegingen om een probleem goed af te bakenen of om een mechanisme in te perken. Modelaanpassingen zijn dus nodig als een model een onderzoeksvraag niet voldoende beantwoordt.

Ten tweede is het doel van het modelleren van complexe dynamische systemen het voorspellen van de systeemgedragingen op basis van een causaal model. Extrapolatie op basis van de beschikbare waarnemingen, zonder inzicht in het onderliggende mechanisme, heeft beperkte voorspellende waarde. Het bedenken van een mechanisme start niet willekeurig, maar is theoriegedreven: aansluitend bij en geformuleerd in termen van bekende natuurwetenschappelijke inzichten. Voor het genereren van modelresultaten van een mathematisch model van een dergelijk systeem is in het algemeen vereist dat het op de computer numeriek geïntegreerd wordt. De betrouwbaarheid van de modelvoorspellingen wordt begrensd door beperkingen aan het model (onvolledigheid, scenario's) en onzekerheden in het model (onnauwkeurigheden in de modelparameters en -relaties). Complexe systemen kunnen verrassend gedrag vertonen, zoals oscillaties, plotselinge sprongen, onomkeerbare verandering, gevoeligheid voor beginwaarden en hysterese-lussen.

2.2 Een modelleercompetentie verwerven

2.2.1 Een competentie voor het modelleren van complexe dynamische systemen

Voor allerlei vakgebieden geldt dat de typische ontwikkeling tot een expertniveau zeker zo'n tien jaar duurt (Chase & Simon, 1973; Ericsson, Krampe, & Tesch-Römer, 1993). Los van een eventuele modelleercompetentie heeft de expert in die periode een uitgebreide domeinkennis ontwikkeld. Deze kennis is bovendien

anders georganiseerd dan die van de beginner: de expert ziet productieve structuren en hanteert heuristieken die helpen om het probleem hanteerbaar te maken (De Groot, 1978 (1965); Feynman, 1965; Larkin, 1983). Het valt daarom te verwachten dat de expert ook bij het modelleren van nieuwe processen voordeel zal hebben van de bekende structuren en heuristieken.

Maar wanneer kun je spreken van een modelleercompetentie? De vraag is wat er gebeurt als de expert een modelleerprobleem op heel ander terrein probeert aan te pakken. Onderscheidt de expert zich ook in een nieuw domein van de beginner? Specifiek voor modelleren is daar geen empirisch onderzoek naar gedaan. Wel meer algemeen aan het oplossen van open, slechtgedefinieerde problemen. Experts op zeker terrein pakken problemen op een geheel nieuw terrein zeker anders aan dan willekeurige beginners, en reguleren beter hun proces als ze een probleem oplossen (Alexander & Judy, 1988; Perkins & Salomon, 1989). Dat impliceert niet dat de kennis van de expert zonder meer succesvol generaliseerbaar is. Een expert kan grote moeite hebben om de relevante kenmerken van een grafiek uit een aanpalend vakgebied te interpreteren (Roth & Bowen, 2003). Het is te verwachten dat dergelijke obstakels van voorbijgaande aard zijn en, hoewel transfer naar andere domeinen niet altijd onmiddellijk succesvol is, zal een modelleerexpert uit zeker vakgebied zich meestal snel kunnen inwerken in een aanpalend probleemgebied als er van vergelijkbare modelstructuren en oplosmethoden gebruik gemaakt wordt. Er bestaat dus zoiets als een min of meer domeingebonden modelleercompetentie, die grotendeels uit impliciete (niet-verwoorde) kennis bestaat. Voor nauw verwante domeinen zal waarschijnlijk ook van een dergelijke competentie geprofiteerd kunnen worden.

Wat de meest relevante aspecten zijn van een modelleercompetentie voor het voortgezet onderwijs zal, naast de beschikbare hoeveelheid tijd, vooral afhangen van het beginniveau van de leerlingen en de onderwijsbaarheid van de beoogde competentie.

2.2.2 De beginsituatie van leerlingen: vaardigheden en moeilijkheden

Kinderen hebben al vanaf jonge leeftijd ervaring met al dan niet expliciete vormen van modelgebruik en veel aspecten van wetenschappelijk modelgebruik zijn te beschouwen als een uitbreiding en systematisering van alledaagse redeneerpatronen. Zo zoeken kinderen al op jonge leeftijd naar causale verklaringen die structuur brengen in hun ervaringen (Sobel, Tenenbaum, & Gopnik, 2004). Het gebruik van modellen als representatie voor de werkelijkheid is te herkennen bij peuters vanaf ongeveer drie jaar oud, die in staat zijn om op basis van een schaalmodel hun weg te vinden in een werkelijke situatie. Vóór die leeftijd interpreteren de kinderen het schaalmodel niet als verwijzing naar een werkelijke situatie (deLoache, 2002). Rond diezelfde leeftijd ontstaat inzicht in de beperkingen van schaalmodellen: bij jongere kinderen is bijvoorbeeld waargenomen dat ze probeerden een modelglijbaan als echte glijbaan te gebruiken (deLoache, Uttal, & Rosengren, 2004).

Analoog aan het idee van kinderen als kleine onderzoekers, zijn kinderen dan ook te beschouwen als ‘natural modelers’ (Lehrer & Schauble, 2000). Lehrer en Schauble concluderen dat de mentale basisprocessen die een rol spelen bij dit ‘alledaags modelleren’ ook van belang zijn voor het modelmatige redeneren in de wetenschap. Daarmee is niet gezegd dat er geen grote verschillen zouden zijn, maar wel dat leerlingen relevante voorkennis en ervaring hebben die hun denken en handelen beïnvloeden en waar dus in een eventueel onderwijsleertraject op voortgebouwd moet worden.

In het vervolg van deze paragraaf bespreken we empirische gegevens over de prestaties van leerlingen bij (deel)processen van het natuurwetenschappelijk modelleren in het onderwijs.

Probleemverkenning

De aanleiding voor een modelleerproces is een vraag die beantwoord moet worden. Een goede vraagstelling en/of hypothese geeft richting aan het proces van modelontwikkeling en -onderzoek. In veel studies wordt gevonden dat de vraagstellingen en hypothesen van leerlingen te vaag en te weinig toetsbaar zijn om sturing te geven aan het vervolgproces (De Jong & Van Joolingen, 1998). Succesvolle leerlingen onderscheiden zich hierbij wel van minder succesvolle leerlingen doordat ze verklaringen opperen en oorzaak-gevolg-relaties benoemen (Chin & Brown, 2000; Stratford, Krajcik, & Soloway, 1998). Het stellen van de juiste vragen is niet alleen een noodzakelijke eerste stap in een modelleerproces, het zelf opwerpen van vragen door de leerlingen blijkt ook bevorderlijk voor een diep begrip van de probleemsituatie (Hofstein, Navon, Kipnis, & Mamlok-Naaman, 2005).

De vraagstelling ontwikkelt zich in samenhang met het conceptueel model. De ontwikkeling van een conceptueel model verloopt in het onderwijs wezenlijk anders dan in de onderzoekspraktijk doordat leerlingen veel minder relevante voorkennis hebben. Uit vergelijkingen tussen leerlingen die met meer en minder succes een modelleertaak uitvoerden, blijkt dat goede modelleerders het aantal factoren in hun model proberen te beperken, terwijl zwakke modelleerders streven naar volledige weergave van de situatie (Hogan & Thomas, 2001; Sins, Savelsbergh, & Van Joolingen, 2005). Bij deze fase hoort ook het ontwikkelen van verwachtingen over het modelgedrag. Leerlingen redeneren voornamelijk lokaal (*‘A veroorzaakt B’*) en lineair (*‘meer A geeft evenredig meer B’*), ook als complexere redeneringen vereist zijn – parallelle, gelijktijdige invloeden en versterkende en verzwakkende terugkoppelingen (De Bock, Van Dooren, Janssens, & Verschaffel, 2002; Löhner, 2005; Perkins & Grotzer, 2005).

Het gebruik van grootheden is kenmerkend voor het fysicaliseren van een conceptuele voorstelling. Dit is voor leerlingen niet vanzelfsprekend; vaak is hun situatiebeschrijving georiënteerd op objecten en gebeurtenissen (Kurtz dos Santos & Ogborn, 1994). Met name voor zwakke modelleerders blijkt het moeilijk hiervan te abstraheren (Powell & Willemain, 2007).

Modelspecificatie en implementatie

Om het model te kunnen doorrekenen moeten de parameters en verbanden tussen grootheden geoperationaliseerd worden. Zwakke modelleerders varen daarbij blind op de gegeven numerieke waarden (Powell & Willemain, 2007). Als dergelijke cijfers ontbreken hebben zwakke leerlingen geen enkel vertrouwen in hun model, terwijl succesvolle leerlingen parameterwaarden schatten om zo het kwalitatieve modelgedrag te kunnen onderzoeken. Zwakke leerlingen zijn geneigd in de wiskundige uitwerking hun model teveel te vereenvoudigen door bijvoorbeeld periodieke veranderingen weer te geven met constante gemiddelden (Hogan & Thomas, 2001).

Waar in het bovenstaande sprake is van schatten is niet in de eerste plaats het ‘technische’ schatten bedoeld, maar vooral het ‘functionele’ schatten. Technisch schatten verwijst dan naar het bij benadering bepalen van een uitkomst op basis van volledige gegevens zonder de volledige berekening uit te voeren, bijvoorbeeld om daarna, als de berekening alsnog volledig wordt uitgevoerd, een controlemogelijkheid te hebben. De prestaties van Nederlandse leerlingen in dit ‘technisch schatten’ zijn goed (Janssen, Van der Schoot, & Hemker, 2005; OESO, 2004). ‘Functioneel schatten’ verwijst naar het benaderen van een benodigde parameter, vaak op basis van onvolledige informatie, met een nauwkeurigheid die voldoet in het licht van het gestelde doel. Voor een ‘toy model’ bijvoorbeeld zijn exacte getallen helemaal niet nodig, maar moeten parameterwaarden functioneel geschat kunnen worden. Fortus (2008) onderzocht hoe leerlingen schattingen maken als niet alle benodigde informatie gegeven is. Veelal hebben leerlingen geen moeite om vast te stellen dat er aannames nodig zijn, maar alleen diegenen die al ervaring hadden met het maken van schattingen slaagden er ook in om deze aannames te maken.

Een internationaal veel gebruikt modelleerprogramma in het onderwijs is STELLA; in Nederland is het vergelijkbare programma Powersim beter bekend. Deze programma's zijn geënt op systeemdynamische concepten als voorraden en stromen, die worden gerepresenteerd met vaten, pijplijnen en kraantjes. Van deze grafische, systeemdynamische tools worden twee voordelen verwacht: (1) het modeldiagram verduidelijkt voor leerlingen de conceptuele structuur van een model, en (2) de stromingmetafoor ondersteunt hun inzicht in dynamische verschijnselen. Leerlingen kunnen met STELLA werkende modellen construeren van biologische en natuurkundige verschijnselen, zowel van schoolse onderwerpen als van complexere (Hogan & Thomas, 2001; Schecker, 1998; Westra, 2008). De vermeende voordelen van de grafische omgeving worden echter niet vanzelfsprekend te gelde gemaakt. Verschillende onderzoekers merken op dat leerlingen moeite hebben met het identificeren van stroom- en voorraadgrootheden, zeker in het mechanica domein (bijvoorbeeld Doerr, 1996 en referenties daarin). Het gebruik van STELLA voor het modelleren van mechanicasituaties leidt bijvoorbeeld niet tot een beter begrip van de mechanica theorie (Schecker, Klieme, Niedderer, Ebach, & Gerdes, 1999). Om profijt te hebben van de stromingmetafoor moeten gebruikers vertrouwd zijn met basale stromingsverschijnselen. Dit is echter niet vanzelfsprekend (Booth Sweeney &

Sterman, 2000). Om modelgedrag te verklaren kijken leerlingen vooral naar lokale structuren, bijvoorbeeld de variabelen die direct van invloed zijn op een grootte, maar niet naar de structuur van het model als geheel (Löhner, 2005).

In een vergelijkende studie met een semi-kwantitatieve grafische tool en een kwantitatieve tekstgeoriënteerde tool vond Löhner (2005) dat de tekstomgeving het modelleringsproces van de leerlingen kon belemmeren omdat de leerlingen moeite hadden om de benodigde modelvergelijkingen zelf correct op te stellen. Dit geldt natuurlijk evenzeer als dezelfde vergelijkingen in een grafische omgeving gespecificeerd moeten worden. Een grafische omgeving biedt de leerlingen echter wel een extra mogelijkheid om de conceptuele structuur van een model te verduidelijken en te bediscussieren. Echter, in haar studie vond Löhner in de grafische conditie ook een negatieve correlatie tussen de kwaliteit van het eindmodel en het gemiddeld aantal geprobeerde relaties: leerlingen probeerden meer verschillende relaties uit, maar niet doelgericht.

Modelonderzoek

In deze fase wordt het model getest en vervolgens gebruikt om nieuwe resultaten te genereren en deze te interpreteren. Beginnende en zwakke modelleerders volgen daarbij een ‘engineering approach’, door vooral te proberen de verwachte effecten te produceren (Schauble, Klopfer, & Raghavan, 1991). Dit uit zich bijvoorbeeld doordat zij zich vooral focussen op het fitten van hun modelresultaten met de data. Bovendien zijn beginnende en zwakke modelleerders geneigd onverwachte resultaten te verklaren uit factoren die geen onderdeel uitmaakten van het model (Bliss, 1994; Bliss & Sakonidis, 1994; Kurtz dos Santos & Ogborn, 1994). Succesvolle leerlingen zijn eerder geneigd hun modeluitkomsten te interpreteren in termen van het gebruikte model (Hogan & Thomas, 2001; Sins, 2006). Het modelgedrag kan daarbij op verschillende niveaus geïnterpreteerd worden: een slingerbeweging heeft een mechanische oorzaak, maar de modelstructuur is ook op te vatten als een voorbeeld van een harmonische oscillator. Verwachtingen over mogelijke typen modelgedrag helpen om het modelgedrag te interpreteren als resultaat van gemodelleerde invloeden en de rekenmethode. Leerlingen hebben maar een zeer beperkt beeld van zulke klassen van systeemgedrag. Booth Sweeney (2000) vond bijvoorbeeld dat slechts een minderheid van de studenten van een MIT-managementopleiding (20-35 jaar) in staat was het verloop van het waterniveau in een badkuip te voorspellen in een situatie waar de uitstroom constant bleef terwijl de instroom uniform toenam.

Evaluatie

In de onderzoekspraktijk biedt een onverwachte uitkomst aanleiding tot productief denkwerk. Bij veel modelleer- en onderzoeksopdrachten in de schoolpraktijk wijst een onverwachte uitkomst eenvoudigweg op een fout antwoord (Chinn & Malhotra, 2002). In veel gevallen zijn leerlingen geneigd onverwachte of strijdige resultaten te negeren (Chinn & Brewer, 1998; Schauble, et al., 1991).

Procesregulatie

Als er, behalve domeinkennis, één aspect gerapporteerd is waarin experts en/of succesvolle leerlingen zich onderscheiden van beginners en minder succesvolle leerlingen, dan is het wel de mate waarin zij in staat zijn hun eigen onderzoeksproces te reguleren (zie bijvoorbeeld De Jong & Van Joolingen, 1998; Powell & Willemain, 2007; Schoenfeld, 1985).

Het ligt voor de hand dat leerlingideeën over modellen en modelleren hun invloed hebben op de manier waarop de leerling een modelleertaak aanpakt. Veel onderzoek naar leerling-ideeën over modellen is gebaseerd op interviewstudies. Vaak wordt daarin gevraagd naar opvattingen over modellen in het algemeen. Een grote meerderheid van de leerlingen in de hogere jaren van het voortgezet onderwijs en de eerste jaren van het universitair onderwijs ziet een model vooral als een (vereenvoudigde) weergave van de werkelijkheid. Leerlingen beschouwen daarnaast een model ook als een representatie van wetenschappelijke kennis. Verreweg de meeste leerlingen beschouwen een model niet als een onderzoeksinstrument. Dat is niet verrassend; leerlingen hoeven zich over het algemeen niet bewust te zijn van de beperkte geldigheid van de didactische modellen waarmee zij te maken krijgen, de subjectieve keuzen die bij het modelontwerp gemaakt worden en de mogelijkheid dat vervolgvragen een verdere modelontwikkeling vereisen (Gilbert, 1991; Grosslight, et al., 1991; Kurtz dos Santos & Ogborn, 1994; Treagust, Chittleborough, & Thapelo, 2004).

Deze opvatting van de leerlingen over de betekenis en functie van modellen zal van invloed zijn op hun taakopvatting bij een modelleertaak. Uit de literatuur over 'leren onderzoeken' is bijvoorbeeld bekend dat veel leerlingen menen dat het primaire doel van een experiment is om een zeker effect te laten zien. Een dergelijke opvatting leidt tot een 'engineering approach' (proberen om dat effect te realiseren) die wordt gecontrasteerd met een 'scientific approach'; deze laatste kenmerkt zich door een systematisch onderzoek naar het effect van mogelijke invloeden (Sandoval, 2005; Schauble, et al., 1991; Zimmerman, 2000). De leerlingen hebben echter nauwelijks ervaring met natuurwetenschappelijk modelleren, en het valt te verwachten dat hun algemene opvattingen daarover niet erg stabiel zijn. Schauble et al. laten dan ook zien dat de taakperceptie beïnvloed werd door de 'aard' van de opdracht.

2.2.3 Twee verklaringen voor de gesignaleerde moeilijkheden

Hoewel alledaagse vaardigheden en denkprocessen ten grondslag liggen aan het modelleren, stuiten leerlingen op een groot aantal moeilijkheden als zij het modelleerproces met voldoende wetenschappelijke kwaliteit moeten uitvoeren. Voor zover leerlingen vraagstellingen en/of hypothesen formuleren, zijn deze vaak onvoldoende specifiek om richting te geven aan het vervolg. Leerlingen zijn wel goed in staat om creatieve verklaringen te opperen voor een verschijnsel. Vervolgens blijkt het voor veel leerlingen moeilijk om te selecteren welke elementen centraal staan en welke elementen in eerste instantie buiten beschouwing mogen blijven. Vooral zwakke leerlingen streven naar een volledige weergave. Alles lijkt belangrijk

en leerlingen vrezen dat een onvolledig model direct ongeldig is. Bij het mathematiseren van het model volgen dan alsnog, ongeplande, vereenvoudigingen. Bij het modelonderzoek zien ze essentiële modelgedragingen over het hoofd, ze interpreteren de modeluitkomsten op basis van ad hoc aannames en bij de evaluatie negeren ze onverwachte uitkomsten. Er treden dus in alle fasen van het modelleren problemen op. Veel van de problemen in latere fasen lijken toegeschreven te kunnen worden aan dingen die in eerdere fasen niet goed zijn gegaan; zo is het moeilijk modelresultaten te evalueren als je geen verwachtingen hebt over de range waarbinnen die uitkomsten zouden moeten liggen. Verder valt op dat het gehele proces zeer ongericht verloopt. We kunnen de verklaring voor de waargenomen problemen in twee richtingen zoeken: enerzijds in tekortschietende kennis en vaardigheden van de leerling en anderzijds in de modelleertaken die meestal aangeboden worden.

De bevinding dat leerlingen weinig richtinggevende vragen formuleren en dat ze ook weinig aandacht besteden aan de situatieverkenning zou er op kunnen wijzen dat ze te weinig inzicht hebben in het belang van de vraagstelling en/of hypothese. Daarnaast speelt zeker ook het gebrek aan domeinkennis een rol: de leerling weet niet wat de centrale factoren zijn, of wat mogelijk interessante modelaspecten en gedragingen zijn. Beide aspecten, een gebrek aan domeinkennis en een gebrek aan inzicht in het modellerenproces (een meta-cognitieve vaardigheid), bieden ook mogelijke verklaringen voor de gesignaleerde problemen in de volgende fasen. Sommige van de genoemde bevindingen, zoals de neiging om modeluitkomsten te interpreteren door verwijzing naar elementen buiten het model, lijken daarnaast te wijzen op een tekortschietend modelbegrip.

Een heel ander type verklaring gaat uit van het type opdrachten dat leerlingen krijgen. In het gebruikelijke onderwijs worden leerlingen wel met modellen geconfronteerd, maar dat zijn dan vrijwel altijd reeds bestaande en veelal gedidactiseerde modellen waarvan de geldigheid niet ter discussie staat; er wordt weinig door de leerlingen, of de docent, zelf gemodelleerd (Chinn & Malhotra, 2002). Het is dan ook niet verwonderlijk dat leerlingen een beperkt beeld hebben van wetenschappelijke modellen en van het proces waarin die modellen functioneren. In veel opdrachten staat de juiste uitkomst bij voorbaat vast, en is er geen echte onderzoeksvraag waar het model antwoord op zou kunnen geven. In zo'n geval rest de leerlingen niet anders dan zo goed mogelijk instructies te volgen voor het uitvoeren van de gestelde taak. Het zou kunnen dat leerlingen tot veel meer in staat zijn als zij werken aan een voor hen geschikte 'echte' onderzoeksvraag. Een dergelijke analyse vormt de grondslag voor onderwijsontwerpen waarin leerlingen 'onderzoekend leren' (Kuhn, 2007; Smith, Maclin, Houghton, & Hennessey, 2000).

De genoemde verklaringsrichtingen zijn beide relevant voor een didactiek van natuurwetenschappelijk modelleren. Alvorens hierop de aandacht te richten wordt in de volgende sectie eerst een globale modelleercompetentie gespecificeerd.

2.2.4 Specificatie van een globale modelleercompetentie

Op grond van de beschreven natuurwetenschappelijke praktijk en de beginsituatie van de leerlingen bevat een globale competentie voor het modelleren van complexe dynamische systemen in ieder geval de hierna volgende elementen.²

Een competent modelleerder kan met betrekking tot

- *de probleemverkenning:*
 - een model gebruiken voor onderzoeksdoeleinden, door een onderzoekbare vraagstelling te formuleren, een slechtgedefinieerd en complex modelleerprobleem op te delen in goedgedefinieerde en eenvoudiger deelproblemen, verwachtingen te formuleren die met het model onderzocht kunnen worden, oorzaken van onzekerheden en fouten te identificeren als resultaat van gemaakte vereenvoudigingen en aannames, en toetsbare voorspellingen op te stellen met het model.
 - een kwalitatief fysisch model ontwikkelen door een complex dynamisch systeem te analyseren, in te perken en te vereenvoudigen tot een situatie die onderzoekbaar is, en deze situatie te beschrijven in termen van grootheden en relaties tussen grootheden die in een natuurwetenschappelijke theorie worden voorgeschreven.
- *de modelspecificatie en implementatie:*
 - een model kwantificeren en (in principe) doorrekenen door de relaties tussen de modelelementen in een kwalitatief model te specificeren, schattingen te maken voor parameterwaarden, en modelvergelijkingen numeriek te integreren als een begintoestand en veranderingsregels gespecificeerd zijn.
 - een computermodel bouwen door een wiskundig model te implementeren in modelleersoftware.
- *het modelonderzoek:*
 - een computermodel gebruiken door de voor toetsing en evaluatie benodigde modelresultaten zichtbaar te maken en modeluitkomsten te interpreteren als het resultaat van de model- en rekenregels.
 - een model testen aan de hand van gespecificeerde verwachtingen.
 - een model onderzoeken door na te gaan wat de gevolgen zijn van de onzekerheden in de modelinput (zijnde het gevolg van gemaakte modelkeuzes) en in de parameterruimte verschillende klassen van kwalitatieve gedragingen te herkennen.

² We beschouwen vooral die elementen die onderscheidend zijn voor het modelleren van complexe dynamische systemen.

- *de modevaluatie:*
 - evalueren in hoeverre met een model een vraagstelling voldoende beantwoord wordt.
 - de noodzaak voor modelrevisie herkennen.
- *de procesregulatie:*
 - het modellerproces sturen door doelgericht modelleractiviteiten te plannen die bijdragen aan het oplossen van een probleem, en te monitoren in hoeverre de opbrengsten van een activiteit daadwerkelijk bijdragen aan de beoogde oplosroute of een aanpassing van de geplande modellerstappen noodzakelijk maken.
 - beschikken over een modelbegrip met kenmerken zoals bijvoorbeeld geïdentificeerd door Van der Valk et al. (paragraaf 2.1.1), d.w.z. een modelbegrip waaruit doelgerichtheid, keuzevrijheid en onvolledigheid blijkt.

2.2.5 Modellerervaring als basis voor competentieontwikkeling

Het ligt voor de hand dat het verwerven van een competentie oefening vereist. De twee geopperde verklaringen (in paragraaf 2.2.3) voor de gesignaleerde tekortkomingen in het modelleren door leerlingen hebben heel verschillende implicaties voor modelleronderwijs, met name wat betreft de vraag wát er geoefend moet worden. Daarnaast valt het nog te bezien hoe oefenen vorm moet krijgen en welke begeleiding de leerlingen geboden moet worden. Om in al de mogelijke antwoorden een richting te vinden beginnen we met de vraag of ‘heel veel oefenen’ de meest effectieve leerweg is.

In onderzoek op zulke uiteenlopende gebieden als muziek, sport en geneeskunde is gebleken dat ‘deliberate practice’ effectiever is dan ongericht oefenen (Ericsson, Krampe, & Tesch-Römer). Onder deliberate practice wordt verstaan: training aan de hand van op maat gesneden oefeningen, waarin de lerende direct gerichte feedback krijgt op zijn of haar prestaties. Begeleiding op maat is nodig om juist de zwakke punten te oefenen. Dit impliceert dat degene die de oefenaar begeleidt een duidelijk idee heeft van het gewenste niveau en de zwakke plekken van de oefenaar kan identificeren. Voor de oefenaar is het belangrijk dat deze het doel van de oefening begrijpt, om daaraan de motivatie te ontfangen om de oefeningen te doen.

Dan de vraag of binnen de randvoorwaarden van het voortgezet onderwijs ook een generalisatie van modellervaardigheden onderwijsbaar zou kunnen zijn. De bevindingen op het gebied van probleemoplosonderwijs en planningsvaardighedenonderwijs suggereren dat dergelijke vaardigheden niet in hun algemeenheid, dat wil zeggen ‘domein-ongebonden’, onderwezen kunnen worden (Resnick, 1987, pp. 34, 35). Ten aanzien van transfer van concrete (algoritmische) vaardigheden is wel aangetoond dat deze bevorderd kan worden door de te transfereren elementen, in combinatie met de vertaalslag naar het nieuwe domein en eventuele beperkingen, te expliciteren. Ook goedgedefinieerde redeneerpatronen

zoals ‘causaal redeneren’ kunnen langs deze weg succesvol gegeneraliseerd worden (Nisbett, 1993). Transfer van goedgedefinieerde en algoritmische vaardigheden is mogelijk, mits (Singley & Anderson, 1989):

- de identieke elementen (kennis of vaardigheden) in opeenvolgende training- en transfertaken herkenbaar aanwezig zijn;
- de trainingstaak grondig beheerst wordt;
- de identieke elementen gegeneraliseerd of geabstraheerd worden (dusdanig dat deze herkenbaar blijven in de trainingstaak).

Een complicatie bij het modelleren is dat de benodigde deelvaardigheden en deelactiviteiten hun betekenis en richting ontleen aan het proces als geheel. Als de benodigde deelvaardigheden enkel afzonderlijk in oefensituaties onderwezen worden, zien leerlingen onvoldoende in wanneer deze deelvaardigheden bruikbaar zijn (Maaß, 2006; Schoenfeld, 1985). Het doelgerichte karakter van het modelleren wordt alleen zichtbaar als de modelleractiviteiten in samenhang functioneren. Een noodzakelijke voorwaarde voor het verwerven van een modellercompetentie is dan ook dat leerlingen zelf begeleid modellerervaring opdoen. Een curriculumlijn voor het onderwijzen van een modellercompetentie zou kunnen bestaan uit een reeks modellerproblemen, op elkaar voortbouwend door reflectie (Kortland, 2001).

Dat is echter niet eenvoudig te realiseren binnen de randvoorwaarden van het voortgezet onderwijs: leerlingen hebben slechts beperkte domeinkennis en beperkte algebraïsche vaardigheden, een enkele docent heeft twintig tot dertig leerlingen voor zich in een klas en ziet een klas veelal slechts één of twee uur per week, en de onderwijscultuur is vooral gericht op het oplossen van goedgedefinieerde opgaven met één juist antwoord.

Het hoofddoel van het in dit proefschrift beschreven onderzoek is om na te gaan hoe, binnen de beschreven randvoorwaarden, modellerervaring als basis voor competentieontwikkeling vorm kan krijgen. We richten ons daarbij vooral op die aspecten van het modelleren die niet goed als geïsoleerde deelvaardigheden te trainen zijn. In de volgende paragraaf gaan we na hoe men in een aantal curriculumprojecten het modelleren heeft vormgegeven en in hoeverre de leerlingen hiermee bruikbare ervaring opdoen.

2.3 Ontwerprichtlijnen voor een modellerproces op basis van eerdere curriculumprojecten

In verschillende interventiestudies is met meer of minder succes geprobeerd een modellercompetentie, of aspecten daarvan, te onderwijzen. In de verschillende studies wordt het modelleren door leerlingen verschillend ingevuld, en komen de kenmerken van modellen en modellerprocessen die in de voorgaande paragrafen zijn besproken in verschillende mate tot uitdrukking. In deze sectie bespreken we enkele relevante interventiestudies, om daaruit lessen te trekken voor de didactiek van het modelleren van complexe dynamische systemen.

2.3.1 Schwarz en White: meta-modelleerkennis

Het *model-enhanced ThinkerTools*-curriculum (verder: METT-curriculum) is erop gericht om leerlingen meer inzicht te geven in de rol en betekenis van modellen in de wetenschap en in het proces van modelleren (Schwarz & White, 2005). Schwarz en White hanteren een ruime definitie van het begrip ‘model’:

[W]e broadly define a scientific model as a set of representations, rules, and reasoning structures that allow one to generate predictions and explanations. Scientific models can range in form from scale models of the solar system, to computer simulations of galaxy collisions, to quantitative laws such as $F = ma$, to qualitative principles such as “when no forces are acting, an object’s velocity remains the same, because there is nothing causing it to change.” Models, in this sense of the term, are tools for expressing scientific theories in a form that can be used for purposes like prediction and explanation. (Schwarz & White, 2005, pp. 166–167)

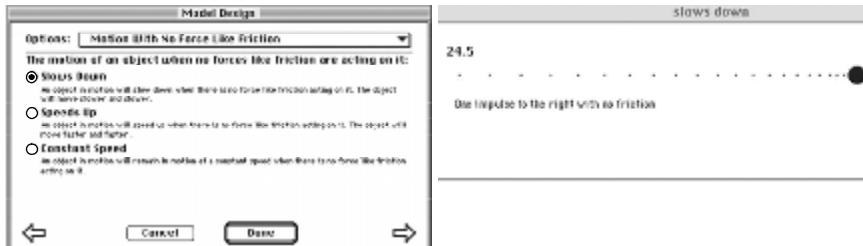
De genoemde voorbeelden suggereren dat fysische wetten en principes ook gezien worden als modellen (hoewel in de laatste zin toch weer onderscheid gemaakt wordt tussen theorieën en modellen). Modelleren definiëren zij als:

the process used in much of modern science that involves (a) embodying key aspects of theory and data into a model – frequently a computer model, (b) evaluating that model using criteria such as accuracy and consistency, and (c) revising that model to accommodate new theoretical ideas or empirical findings”. (Schwarz & White, 2005, p. 167)

Het verwerven van *meta-modeling knowledge*, *i.e.* inzicht in de aard van modellen en van het modelleerproces, beschouwen zij niet als waardevol in zichzelf, maar zij achten dit ook noodzakelijk om de leerlingen toe te rusten voor het onderzoekend leren. Dit concluderen zij op basis van hun eerdere *ThinkerTools Inquiry Curriculum* (White & Frederiksen, 1998), waarvan het METT-curriculum een herziening is. In deze beide projecten ‘ontdekken’ de leerlingen de Newtoniaanse mechanica-wetten door te experimenteren met gegeven simulaties. Schwarz en White betogen dat leerlingen in het eerste *ThinkerTools*-project weinig blijk gaven van inzicht in het doel en de status van de ontwikkelde modellen, en dat dit gebrek aan *meta-modeling knowledge* hen hinderde bij het ontwikkelen en toepassen van modellen.

Beschrijving interventie

Het METT-curriculum is gericht op leerlingen van ongeveer 13 jaar oud (7th grade) en beslaat ruim tien lessen van 45 minuten. De leerlingen doorlopen in deze lessenserie in totaal zeven keer een modelleercyclus aan de hand van expliciete instructies over het onderzoeksproces. In elke cyclus wordt een nieuwe mechanica-wet ‘ontdekt’ in een simulatieomgeving genaamd *ThinkerTools*. De leerlingen construeren het gewenste model door voor iedere benodigde mechanica-wet te kiezen uit een aantal opties (Figuur 1, links). De computer simuleert vervolgens de gevolgen van de gekozen bewegingsregel (Figuur 1, rechts).



Figuur 1. Links: de leerlingen wordt gevraagd een bewegingsregel te selecteren in het geval er geen wrijving zou zijn. Rechts: het resultaat in de microworld-simulatie van de gekozen bewegingsregel.

Elke modelleercyclus die de leerlingen doorlopen, is onderverdeeld in zes fasen: (1) ze krijgen een ‘voorspellingsvraag’ voorgelegd (“wat zou er gebeuren als...”); (2) ze bedenken een aantal hypothesen voor de gegeven situatie, (3) ze onderzoeken de situatie experimenteel; (4) ze analyseren de data en selecteren de meest geschikte hypothese; (5) ze simuleren de gevolgen van de gekozen hypothese in een computermodel; en (6) ze evalueren hun model. Als start van de evaluatiefase wordt plenair besproken welke modelregels de beste zijn en waarom. De leerlingen evalueren vervolgens hun eigen model door hun model cijfers te geven voor accuraatheid, plausibiliteit, bruikbaarheid en consistentie, en beargumenteren deze.

Ter ontwikkeling van hun kennis over de aard van modelleren bestuderen de leerlingen tijdens de eerste twee cycli drie achtergrondteksten over wetenschappelijke modellen, over hoe het programma *ThinkerTools* werkt en over het nut van computermodellen.

Resultaten

Het onderwijs is uitgevoerd in vier klassen binnen het vak *Science*. Op basis van een pre- posttestvergelijking concluderen de auteurs dat de *meta-modeling knowledge* en de onderzoeksvaardigheden van de leerlingen na de interventie verbeterd zijn, hoewel de vooruitgang in *meta-modeling knowledge* beperkt blijft tot de twee aspecten aard en bruikbaarheid van modellen. Er waren vier aspecten onderscheiden; voor de beide andere (aard van het modelleerproces en modevaluatie) was het ontwikkelde meetinstrument te onbetrouwbaar om conclusies te kunnen trekken. Interviews met de leerlingen geven hierover meer inzicht. Wat betreft de aard van het modelleerproces werd bijvoorbeeld gevraagd of en zo ja wanneer wetenschappers hun modellen herzien. De helft van de geïnterviewde leerlingen gaf een antwoord dat Schwarz & White als ‘matig’ beoordelen, namelijk dat een model wordt aangepast als er meer informatie beschikbaar is. ‘Goed’ zou zijn dat een model aangepast wordt als het dan beter aan het doel beantwoordt. Wat betreft modevaluatie verwezen de meeste leerlingen naar criteria als adequaatheid en plausibiliteit.

De natuurkundekennis is ook toegenomen, maar minder dan in het oorspronkelijke *ThinkerTools*-curriculum. Vooral bij de moeilijker onderdelen van de stof leverde het METT-curriculum minder leerwinst op. De onderzoekers concluderen dat

[c]omplex model-design rules for this topic and less exposure to the Newtonian micro-worlds in METT may have made it difficult for students to develop Newtonian conceptual models that could be used to generate the correct answers to these problems. (Schwarz & White, 2005, p. 199)

Bovendien bleek het METT-curriculum vooral effectief voor de betere leerlingen, terwijl in het oorspronkelijke ThinkerTools-curriculum de goede en de zwakke leerlingen gelijkelijk profiteerden.

Discussie

In het onderwijs van Schwarz & White is het de bedoeling dat de leerlingen een aantal fundamentele natuurwetten ‘zelf ontdekken’. De meest opvallende ontwerpkenmerken zijn:

- het modellerenproces wordt voor de leerlingen geëxpliciteerd;
- leerlingen krijgen de mogelijkheid om verschillende modelregels toe te passen en te onderzoeken;
- leerlingen evalueren modelregels door de modeluitkomsten te vergelijken met verwachtingen en empirische gegevens.

Hoewel kennisonwikkeling centraal staat, vertoont de invulling die Schwarz en White aan modelleren geven weinig overeenkomst met het natuurwetenschappelijke modellerenproces zoals beschreven in paragraaf 2.1.2. De creatieve en technische kanten van het modelontwerp worden volledig omzeild door leerlingen de gewenste modelregel te laten kiezen uit een gegeven reeks van opties. Het valt dan ook niet te verwachten dat leerlingen door deze lessenserie vaardiger worden in het zelf ontwikkelen van modellen voor nieuwe, open probleemsituaties – wat overigens ook niet het doel was van het METT-curriculum. Wat hier wel vorm krijgt, is een expliciete rol voor verwachtingen. Om dergelijke verwachtingen op te roepen krijgen leerlingen aan het begin van elke cyclus een voorspellingsvraag te beantwoorden. Leerlingen gebruiken deze bij het evalueren van het model.

Er is expliciet aandacht geschonken aan *meta-modeling knowledge*. Opvallend is hoe divers de verschillende aspecten hiervan onderwezen worden. Uit de interviews blijkt dat de leerlingen er precies dat van hebben geleerd waarmee ze zelf ervaring opgedaan hebben: modellen worden herzien op basis van nieuwe informatie (uit nieuwe situaties), en modellen worden geëvalueerd op basis van epistemologische waarden (de vier waarmee de leerlingen hebben gewerkt kunnen zij concreet benoemen). Het reviseren van modellen om zo te bereiken dat het model beter aan het gestelde doel voldoet (geen nieuwe informatie of situatie gegeven), maakt geen deel uit van het onderwijs. In de interviews benoemt een meerderheid van de leerlingen dit aspect dan ook niet. Over de aard en bruikbaarheid van modellen wordt de leerlingen een en ander verteld alvorens zij zelf gaan modelleren. Hoewel dit lijkt te resulteren in hogere scores op een vragenlijst over modelbegrip, leidt dat er niet toe dat leerlingen met meer succes onderzoekend leren dan in het eerdere *ThinkerTools*-project. Leerlingen zijn dan ook niet in de situatie gebracht dat hun modelbegrip er toe doet in het modellerenproces.

2.3.2 Maaß: een richtinggevend modelleerprobleem

Een heel andere benadering is te vinden bij Maaß (2006). Zij stelt als doel dat leerlingen vaardiger moeten worden in het toepasbaar maken van hun, reeds aanwezige, wiskundige kennis in nieuwe *real world* problemsituaties. Ter nadere specificatie omschrijft ze een modelleercompetentie als

[the] skills and abilities to perform modelling processes appropriately and goal-oriented as well as the willingness to put these into action. (Maaß, 2006, p. 117)

Als de belangrijkste componenten van zo'n competentie onderscheidt zij enerzijds de kennis en vaardigheden om deelprocessen in het wiskundig modelleerproces succesvol te doorlopen, en anderzijds metacognities aangaande beschikbare domeinspecifieke kennis en kunde, voortgang en regulatie van het proces, en motivatie.

Beschrijving interventie

De interventie omvat een reeks van zes modelleerproblemen die in de loop van een schooljaar behandeld worden bij het vak wiskunde (grade 7: leerlingen van 13 jaar). De meeste opgaven betreffen het schatten van een grootte in een 'realistische' probleemcontext, zoals bijvoorbeeld de hoeveelheid verf die nodig is voor het spuiten van een Porsche. De modelleertaak houdt voor de leerlingen in dat zij een goede schatting maken van het Porsche-oppervlak. Andere problemen waaraan de leerlingen werken betreffen het schatten van het aantal mensen in een file van bepaalde lengte en de bijdrage van zonne-energie aan het verwarmen van water in openbare gebouwen in hun woonplaats.

Het modelleerproces wordt ook hier gestructureerd met behulp van een geëxpliciteerde modelleercyclus. Er worden vijf fasen onderscheiden: (1) het probleem wordt vereenvoudigd tot een realistisch model; om het oppervlak van de Porsche te beschrijven wordt bijvoorbeeld een schaalmodel geconstrueerd met alleen rechthoekige vlakken. (2) Dit model wordt gemathematiseerd (wiskundig beschreven). (3) Er wordt een wiskundige oplossing geconstrueerd; (4) deze wordt geïnterpreteerd als een oplossing voor het realistisch model. (5) Ten slotte moet deze oplossing gevalideerd worden voor het oorspronkelijke probleem.

Er is veel ruimte voor eigen inbreng van de leerlingen. Op basis van een plenaire discussie worden zoveel mogelijk potentiële oplossingsmethoden verzameld. Voor de schatting van het Porsche-oppervlak suggereren leerlingen bijvoorbeeld om uit te gaan van het oppervlak van de bekisting die de Porsche precies omvat, om het oppervlak op te delen in rechthoeken en driehoeken, of het oppervlak te omwikkelen en de bedekking naderhand te meten. Elke methode wordt door een ander groepje leerlingen uitgewerkt, waarna de resultaten gepresenteerd worden (alleen indien mogelijk: voor de laatste oplosmethode is geen Porsche beschikbaar). Dit leidt tot een discussie over welk resultaat het beste is, en een evaluatie van het achterliggende model. Ten slotte wordt door de docent of in het lesmateriaal uitgelegd hoe het probleem in de praktijk wordt opgelost. In het geval van de

Porsche benadert het tekenprogramma van de auto-ontwerpers het materiaaloppervlak door het op te delen in kleine rechthoekjes.

Resultaten

Het onderwijs werd uitgevoerd met 42 leerlingen verdeeld over twee klassen. De ontwikkeling van een modellercompetentie is met een pre-posttestmeting onderzocht, aangevuld met o.a. logboeken en de antwoorden van leerlingen op huiswerkopdrachten en specifieke modelleervragen bij (reguliere) toetsen. Maaß concludeert dat bij vrijwel alle leerlingen sprake is van een toegenomen modellercompetentie. Na het jaar doorliepen de leerlingen zelfstandig een modellerproces, hoewel zij niet altijd tot correcte bevindingen kwamen.

Maaß signaleert een aantal problemen bij leerlingen wat betreft het gebruik van wiskunde; deze komen goed overeen met de bevindingen van Hogan en Thomas (2001); zie ook paragraaf 2.2.2. Als leerlingen een situatie moeten vereenvoudigen vatten sommigen dit op als gokken of als ervoor zorgen dat de berekening zo eenvoudig mogelijk wordt. Bovendien menen sommige leerlingen dat een getal altijd een exacte waarde voorstelt – ongeacht de wijze van berekening. Het valt ook op dat sommige leerlingen niet verwachten dat hun wiskundekennis bruikbaar is bij het oplossen van real world problems; wiskunde geeft volgens deze leerlingen te zeer een ideale beschrijving.

Om het modellerproces succesvol te kunnen doorlopen bleek het niet voldoende dat leerlingen afzonderlijke deelstappen kunnen uitvoeren. Belangrijk is, signaleert Maaß, dat

[t]he learners should keep an overview over their proceedings and aim at a goal when modelling a problem. An essential part of modelling competencies seems to be competencies for a goal-oriented proceeding. A 'sense of direction' must exist. (Maaß, 2006, p. 137)

Discussie

Het onderwijs van Maaß lijkt te leiden tot een toegenomen modellercompetentie bij de leerlingen. Als kanttekening bij deze conclusie moet worden opgemerkt dat de leerlingen bij de posttest inmiddels een jaar ouder zijn. Bovendien blijft onduidelijk wat de meting precies inhoudt.

De problemen die Maaß de leerlingen aanbiedt, leiden tot een modellerproces waarin een groot aantal kenmerken van het natuurwetenschappelijk modelleren, zoals beschreven in paragraaf 2.1, herkenbaar zijn. Het model wordt ontwikkeld om binnen een min of meer realistische context een probleem op te lossen. De onderzoeksvraag geeft richting aan de afweging welke kenmerken wel en niet in het model gerepresenteerd moeten worden. Hierdoor komt ook het vereenvoudigen van de probleemsituatie tot z'n recht. Groepen leerlingen kunnen verschillende modellen ontwikkelen voor hetzelfde modelobject en, hoewel Maaß er niet veel over zegt, is het goed voorstelbaar dat de ontwikkelde modellen in de loop van het onderzoek ook een ontwikkeling kunnen doormaken.

Welke specifieke kenmerken van het onderwijs zijn te identificeren die te relateren zijn aan de vooruitgang van de leerlingen? Evident is het herhaaldelijk aanbieden van open modelleerproblemen. Ook valt op dat de modelleertaken zo zijn ontworpen dat de leerlingen ze (vrijwel) geheel zelfstandig kunnen uitvoeren. Maaß geeft verder weinig gegevens over het lesverloop in de klas.

Maaß heeft haar problemen zo gekozen dat *common sense* noties gebruikt kunnen worden en de benodigde wiskundekennis welbekend is.³ Desondanks herkennen leerlingen niet vanzelfsprekend hoe die bekende wiskundekennis bruikbaar zou zijn bij het oplossen van het hier besproken type problemen. Bij het natuurwetenschappelijk modelleren van dynamisch systeemgedrag, zoals klimaat, speelt domeinkennis een veel prominentere rol. De interventie van Maaß maakt nog niet duidelijk hoe leerlingen kunnen leren deze – nieuw te verwerven – domeinkennis productief te maken voor het oplossen van complexe problemen.

2.3.3 Hestenes: domeinspecifieke modelleerheuristieken

In de *modeling approach* van David Hestenes (Hestenes, 1987; Wells, Hestenes, & Swackhamer, 1995) is het doel dat leerlingen zowel nieuwe vakinhoud leren als zelf modelleren. Zowel qua *onderwijsinhoud* als qua *onderwijsmethode* staat de ontwikkeling van modellen centraal. Het uitgangspunt voor zijn *modeling theory of science instruction* is dat

[s]tudents should be taught that the key to solving a typical physics problem is the development of a model from the given information. (...) Thereafter, the problem solution follows from some ramification of the model. (...) The modeling strategy I have been discussing provides a coherent framework for lectures about models throughout a physics course. The instructor should strive to show students how models are used to “understand” empirical phenomena. (Hestenes, 1987, p. 446)

Hestenes' aanpak is er op gericht om de domeinkennis van leerlingen zodanig in 'basismodellen' te structureren dat deze houvast bieden bij het probleemoplossen in nieuwe situaties, én om de leerlingen 'regels' te leren hoe de modellen geconstrueerd moeten worden. De aanpak is hoofdzakelijk toegepast in het mechanicaonderwijs, een onderwerp waarvan goed gedocumenteerd is dat leerlingen ook na het gevolgde onderwijs grote moeite houden met het gebruiken van hun formele natuurkundekennis in nieuwe situaties.

Beschrijving interventie

In een mechanicacursus volgens de *modeling approach* worden één voor één de benodigde basismodellen ontwikkeld (*model development*) en toegepast in een reeks

³ Het type opgaven vertoont sterke overeenkomst met de, onder natuurkundigen bekende, Fermi-problemen (Moore, 1987): het gaat niet om exacte uitkomsten, maar om beargumenteerde schattingen in de juiste orde van grootte, en er wordt nauwelijks beroep gedaan op specifieke domeinkennis.

uiteenlopende situaties (*model deployment*). Ieder basismodel, zoals het puntdeeltje onderhevig aan een constante kracht of de harmonische oscillator, vormt de oplossing voor een ‘paradigmatisch probleem’, dat wil zeggen:

- de oplossing staat model voor de aanpak van soortgelijke problemen;
- de beoogde domeinspecifieke modelleertechnieken en heuristieken worden gebruikt;
- alle basismodellen samen dekken de karakteristieke problemen uit het gehele domein van de mechanica.

De eerste fase, het proces van modelontwikkeling, wordt expliciet gestructureerd in vier stadia (*stages*). In het beschrijvingsstadium (1) wordt een beschrijving gegeven van het te modelleren object, het gedrag ervan en de relevante interacties, met nadruk op de grafische weergave in (*free-body*) diagrammen. Daarbij worden leerlingen uitgedaagd hun eigen, niet noodzakelijk correcte, ideeën te verwoorden en uit te werken, om zo de pre- en misconcepten van de leerlingen te confronteren met de Newtoniaanse axioma's. De opbrengsten na dit stadium zijn de toestands- en interactievariabelen die een rol spelen, zoals snelheid en kracht. In het formuleringsstadium (2) worden de bewegingswetten opgesteld voor de modelobjecten en worden de beginvoorwaarden gespecificeerd. Na het tweede stadium resulteert dus een volledig mathematisch model. In het uitwerkingsstadium (3, *ramification stage*) krijgt de leerling inzicht in de mogelijke gedragingen van het model door het model door te rekenen met verschillende beginwaarden. Tenslotte wordt in het validatiestadium (4) getoetst of de modeluitkomsten kloppen met de empirie.

De tweede fase, modeltoepassing, betreft het aanwenden van het model voor het beschrijven van een scala aan situaties. De bedoeling hiervan is dat

[t]his helps free the students' understanding of the model from the specific context in which it was developed. The model may be deployed to describe, to explain, to predict, or to design a new experiment. (Wells, et al., 1995, p. 616)

Bij de modeltoepassing onderscheidt Hestenes slechts twee stadia: het ontwikkelingsstadium en het uitwerkingsstadium (dat nu, anders dan bij de ontwikkeling van het basismodel, gericht is op het vinden van de gevraagde uitkomst). De leerlingen werken in groepjes aan een reeks problemen. Daarbij gebruiken ze *hand-outs* met de relevante modeltypen en bijbehorende oplossingen als naslag (zie bijvoorbeeld Figuur 2). Elk groepje construeert zijn model op een eigen whiteboard, zodat de modellen en de modelresultaten plenair gepresenteerd en bediscussieerd kunnen worden. Na iedere stap wordt een zogenaamde post-mortemanalyse uitgevoerd om uit de opgedane ervaringen lessen te trekken voor een volgend probleem.

Kinematical Type	Defining equations		Solution		Motion Map
	vectorial	coordinate	vectorial	coordinate	
Uniform Velocity	$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0$ $(\mathbf{a} = \mathbf{0})$	$v = v_0$ $(a = 0)$	$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}t$	$x = x_0 + v t$	
1-dim Uniform Acceleration	$\mathbf{a} = \mathbf{a}_0$ $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{a} \Delta t$	$a = a_0$ $\Delta v = a \Delta t$	$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{a}t$ $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{v}_0 t + \frac{1}{2} \mathbf{a} t^2$ $x^2 = v_0^2 t^2 + 2a(x - x_0)t$	$v = v_0 + a t$ $x = x_0 + \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t$ $v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$	
2-dim Uniform Acceleration	$\mathbf{a} = \mathbf{a}_0$ $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{a} \Delta t$	$a_x = a_{0x}$ $a_y = a_{0y}$ $\Delta v_x = a_{0x} \Delta t$ $\Delta v_y = a_{0y} \Delta t$	$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{a}t$ $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{v}_0 t + \frac{1}{2} \mathbf{a} t^2$ $x^2 = v_{0x}^2 t^2 + 2a_x(x - x_0)t$ $y^2 = v_{0y}^2 t^2 + 2a_y(y - y_0)t$	$v_x = v_{0x}$ $x = x_0 + v_{0x} t$ $v_y = v_{0y} + a_y t$ $y = y_0 + v_{0y} t + \frac{1}{2} a_y t^2$ $v^2 = v_{0x}^2 + 2a_y(y - y_0)$	

Figuur 2. Voorbeelden van uitgewerkte kinematicamodellen.

Volgens Hestenes zijn de belangrijkste verschillen met het reguliere mechanicaonderwijs:

- expliciete heuristieken, niet alleen voor het algemene modelleringsproces maar ook voor (domein)specifieke onderdelen daarin, zoals een specificatie van opbrengsten van de verschillende stadia en de eigenschappen van de verschillende mechanica-modellen.
- veel ruimte voor het uitwerken en testen van (niet-canoneke) leerlingideeën bij de modelontwikkeling.
- veel aandacht voor het beschrijvingsstadium en postmortemanalyses. Aan dit laatste besteedde een goede docent gemiddeld een derde deel van de onderwijstijd (Wells, et al., 1995).

Resultaten

De effectiviteit van de *modeling approach* voor het mechanicaonderwijs is in diverse studies aangetoond. De leerlingen ontwikkelen een beter begrip van de Newtoniaanse mechanica (Halloun & Hestenes, 1987; Wells, et al., 1995). De leerlingen presteren beter op probleemoplostaken doordat hun kennisstructuur lijkt op die van experts: ze herkennen welk basismodel relevant is voor de situatie én ze hebben paraat welke uitwerkingen daarbij horen (Malone, 2006). Ook vond Malone dat, in vergelijking met leerlingen die dit onderwijs niet hadden gevolgd, de leerlingen beter het oplosproces in de gaten hielden door te verantwoorden waarom ze een bepaalde richting volgden en of deze richting tot resultaat leidde. Bovendien spoorden de modelleerleerlingen met meer succes fouten op; ze evalueerden hun antwoorden door te kijken of het antwoord zinvol was of probeerden met een alternatieve berekening tot hetzelfde antwoord te komen. Met name dit laatste duidt er op dat deze leerlingen veel flexibeler een probleem kunnen aanpakken.

Discussie

De aanpak van Hestenes is effectief voor het leren oplossen van mechanicaproblemen. Anders dan bij Schwarz en White ontwikkelen de leerlingen zelf modellen, en anders dan bij Maaß betreft het niet alleen de toepassing van kennis maar ook de ontwikkeling van nieuwe kennis. Een nieuw ontwerpkenmerk is dat Hestenes de leerlingen domeinspecifieke heuristieken biedt voor het construeren van modellen, waarmee hij het modelleerproces beduidend verder specificeert dan alleen de verschillende fasen in een cyclus. Door de geëxpliciteerde heuristieken is het voor alle leerlingen duidelijk welke informatie zij op een whiteboard moeten vermelden als zij zelfstandig modelleren, waardoor het mogelijk is om de modellen en modelkeuzes van verschillende leerlinggroepen met elkaar te vergelijken.

De modellen die de leerlingen leren maken ontbreekt het echter aan complexiteit. Er wordt gewerkt aan goedgedefinieerde standaardopgaven, er hoeft niets vereenvoudigd te worden, beperkte geldigheid en onzekerheid spelen geen rol, evenmin als het compromiskarakter van een model. De directe toepasbaarheid van de *modeling approach* blijft voornamelijk beperkt tot het gebruik van specifieke domeinkennis bij het oplossen van goedgedefinieerde problemen. Bij het computerondersteund modelleren van complexe dynamische verschijnselen, zoals dat in dit onderzoek gedefinieerd is, gaat het daarentegen veelal om slechtgedefinieerde multidisciplinaire problemen. Het is de vraag of er ook in dat geval basismodellen te identificeren zijn, alsmede aanwijzingen voor het construeren van die modellen, die de leerling houvast bieden bij het aanpakken van problemen in onbekende situaties.

2.3.4 Modelleren met STELLA: systeemdynamica als vakoverstijgend kader

Eén manier om structuur te bieden bij het modelleren van complexe dynamische verschijnselen is te kijken naar typen systeemgedrag. Onafhankelijk van het domein zijn in veel dynamische systemen gelijksoortige gedragingen te herkennen: (exponentiële) groei; (gedempte) oscillatie; hysteresis, etc. In de 'systeemdynamische' aanpak (Forrester, 1968) beschouwt men de elementaire modellen die deze gedragingen vertonen als basismodellen. Bij deze aanpak hoort een eigen terminologie (*stocks, flows*) en een beeldtaal om modelstructuren zichtbaar te maken. Het computerprogramma STELLA wordt in onderwijsexperimenten veel gebruikt als laagdrempelig gereedschap om met behulp van de systeemdynamische taal modellen te bouwen en door te rekenen.

Beschrijving interventies

In de projecten *Systems Thinking and Curriculum Innovation* (STACI) en *Cross-Curricular Systems Thinking and Dynamics using STELLA* (CC-STADUS) was het doel dat docenten zelf systeemdynamische modules bij hun lessen zouden ontwikkelen (Fisher & Zaraza, 1998; Mandinach & Cline, 1994; Zaraza & Fisher, 1999). Beide projecten

waren gericht op docenten uit alle vakrichtingen: naast de natuurwetenschappelijke vakken zijn ook cultuur- en maatschappijvakken als geschiedenis en literatuur vertegenwoordigd.

In het STACI-project participeerde een tiental scholen gedurende meerdere jaren. Van elke school namen minstens vijf docenten met verschillende achtergronden deel. De docenten volgden gedurende twee weken workshops over systeemtheorie en STELLA. Ze werkten dan samen in groepjes waarin verschillende disciplines vertegenwoordigd waren om modellen te ontwikkelen van complexe dynamische situaties. Gedurende het jaar werkte elk team op hun eigen school aan de implementatie van systeemdynamisch modelleren in hun lessen.

In CC-STADUS werd jaarlijks een zomercursus van drie weken verzorgd voor enkele tientallen nieuwe docenten. Ook in dit project werd gewerkt met schoolteams. Docenten meldden zich per drietal aan, zodat met elk drietal wiskunde, een natuurwetenschappelijk en een sociaal-wetenschappelijk vak op een school vertegenwoordigd was. De docenten oefenden met STELLA aan de hand van een viertal basispatronen: lineaire groei, exponentiele groei, S-groecurves en kwadratische vergelijkingen. Elke docent modelleerde deze in vakspecifieke situaties, maar door de focus op de modelstructuren ontwikkelden de deelnemers een vergelijkbare ervaring met STELLA en eenzelfde taal. Deze ervaring en taal hadden ze nodig om uiteindelijk in gemengde groepen een model te maken van een vakoverstijgend probleem:

The shared experience in learning STELLA gives participants a common language for discussing models. This facilitates designing models for their final project. It also starts teachers thinking about how model archetypes translate across disciplines. This in turn starts a series of conversations on system dynamics as the language that allows ideas and concepts to cross the line between disciplines. The project has gradually moved into advocacy for system dynamics as the field that can bind the other disciplines into a coherent whole. (Zaraza & Fisher, 1999, p. 43)

Het eindproduct, een vakoverstijgend model, werd toegevoegd aan de verzameling materialen die voor docenten beschikbaar was om in de school te gebruiken. De docenten werden in het navolgende schooljaar gestimuleerd om deze modellen in hun lessen te gebruiken.

Resultaten

Mandinach en Cline positioneren de docenten in een matrix, naar het typisch modelgebruik van elk op de ene as ('conservative', 'constrained' en 'epitome') en de beheersing van de modelleertools op de andere ('survival', 'mastery' en 'impact'). Het meest conservatief is om de leerlingen een gegeven model te laten wijzigen en verbeteren. Bij *constrained modeling* worden computermodellen gemaakt bij de 'traditionele' problemen uit het lesmateriaal, zodat modelconstructie in feite een alternatieve oplosmethode is voor de gewone opgaven. 11 van de 35 docenten gebruiken de tool alleen om leerlingen parameterwaarden te laten manipuleren

(‘conservative’), terwijl 14 docenten de tool zowel conservatief gebruiken als voor ‘constrained modeling’. Alle gradaties van beheersing komen onder deze 25 docenten voor. Er is sprake van *epitome modeling* als leerlingen modellen construeren op basis van hun eigen conceptualisering van het domein. Een docent die zelf nauwelijks de tool kan gebruiken, kan toch zijn studenten ondersteunen in ‘epitome modeling’. De beheersingsgraad van de tool voorspelt dus niet het type modelgebruik. Niettemin komt ‘epitome’ modelleren het meest voor bij die docenten die ook, meer dan de andere docenten, (delen van) het curriculum aanpassen aan een systeemdynamisch perspectief. Mandinach en Cline menen dat juist die docenten kiezen voor ‘epitome’ modelleren omdat zij er niet voor terugschrikken om aanpassingen te maken. Dat juist ‘conservative’ en ‘constrained’ modelleren zoveel voorkomt, wordt dan verklaard doordat beide typen het meest eenvoudig in te passen zijn in de bestaande lessen.

Mandinach en Cline wijzen er op dat computermodellen die geschikt zijn voor het onderwijs enerzijds niet al te complex moeten zijn, maar anderzijds wel voldoende ingewikkeld om de inzet van een computermodel functioneel te maken. Ze specificeren niet verder waar deze balans ligt. Zaraza & Fisher wijzen op nog een andere balans, namelijk de mate waarin het model specifiek is voor een situatie. *Content-rich models* zijn zo specifiek, dat ze buiten de gemodelleerde situatie niet gebruikt kunnen worden. Vaak bevatten deze veel details, en zijn ze (mede daardoor) behoorlijk complex. *Curricula-rich models* daarentegen zijn breed toepasbaar omdat ze een idee representeren dat in een scala van problemen terugkomt. Docenten vonden het moeilijk om in hun eigen lessen te ontdekken waar modellen gebruikt konden worden, en hoe deze dan onderwezen moesten worden. Met name de modellen die als *content-rich* gekwalificeerd kunnen worden, worden door de docenten nauwelijks in hun lessen gebruikt omdat ze zo probleemspecifiek zijn.

Zaraza en Fisher merken op dat docenten uit verschillende vakken de modellen verschillend gebruiken in hun onderwijs. Met name de wiskundeleraars focuseren vanzelf op de basisstructuren, maar zijn over het algemeen slecht in staat om deze in te bedden in relevante situaties. Biologie-, cultuur- en maatschappijdocenten dragen veelal complexe en interessante problemen aan, echter:

[U]nfortunately, they tended to want to develop an exhaustively complete model. Whether this is done in an attempt to imply validity or precision by adding all the details, or an attempt to simply tie together all the variables that normally can't be dealt with simultaneously, the result is an impossible model. (Zaraza, 1995, p. 9)

Docenten die vertrouwd zijn geworden met modelleren in hun lessen melden dat dit een positieve invloed heeft op de betrokkenheid van de leerlingen en op hun kritische houding.

Discussie

In deze modelleeraanpak worden met STELLA modellen ontwikkeld voor complexe dynamische systemen. Het ‘epitome’ modelleren dat Mandinach en Cline

onderscheiden, komt, afgaande op hun korte omschrijving, goed overeen met het gezochte natuurwetenschappelijk modelleren. Zij geven echter geen zicht op het klassenproces waarin dit vorm krijgt.

Zowel het ‘conservative’ en ‘constrained’ modelleren als het modelgebruik in de cursus van Zaraza en Fisher (voor zover de auteurs daar zicht op geven) duiden niet zozeer op natuurwetenschappelijk modelleren. Vaak gaat het om modellen die qua benodigde vakkennis het *common sense* niveau niet overstijgen, en in de cultuur- en literatuurvakken wordt STELLA voornamelijk gebruikt voor het representeren van verbanden in een complexe situatie die echter niet zinvol te kwantificeren zijn. Modellen die voor deze vakken worden ontwikkeld beschrijven bijvoorbeeld het uitbreken van de Iraanse Revolutie of een plot uit een van de werken van Shakespeare. Een variabele zoals bijvoorbeeld ‘spanning’ loopt dan op onder invloed van verschillende factoren, met als resultaat een plotselinge wending in het verloop. Bovendien wordt de benodigde wiskunde vaak goeddeels verstopt. De inzet van STELLA lijkt in deze projecten tot doel te hebben om de leerlingen te laten ervaren dat ‘alles met alles samenhangt’. Daarmee hebben deze studies voor onze doelen een beperkte bruikbaarheid.

2.3.5 Schecker: systeemdynamisch modelleren inhoudelijk ingevuld

Schecker gebruikt het computerondersteund modelleren ter ondersteuning van het mechanicaonderwijs. Hij verwacht dat systeemdynamica het inhoudelijk begrip van natuurkundige vakinhoud bevordert omdat deze van nature goed aansluit bij de basisconcepten van het systeemdenken. Hij onderzocht of het gebruik van STELLA in dit domein leidt tot een beter begrip van de vakinhoud, en bovendien of het gebruik van STELLA ook een transfereerbare vaardigheid oplevert (Schecker, 2005; Schecker, et al., 1999).

Interventie

Schecker ontwikkelde een intensieve mechanica cursus voor de bovenbouw van het Gymnasium, gedurende 20 weken, vijf uur per week.

De onderwerpen zijn kinematica en de wetten van Newton. Ongeveer een kwart van de onderwijstijd wordt besteed aan vijf typische modelleeropdrachten, waarin zowel experimenten worden gedaan als computermodellen gemaakt. Elke opdracht correspondeert met een thema, zoals eenparige beweging, eenparige versnelling of 2-dimensionele bewegingen. Elke opdracht bestaat uit vier fasen: experimenten, introductie van begrippen, modelontwikkeling en berekeningen.

Schecker laat zijn leerlingen werken aan realistische problemen waarin bijvoorbeeld wrijving van belang is; naar zijn idee zullen leerlingen hierdoor beter de kracht van computermodellen gaan waarderen. De modellen dienen antwoord te geven op vragen als “hoe lang duurt het voordat...”. Vanuit modelleerperspectief is zo’n vraagstelling prima; er is immers een duidelijk doel. Het doel om kwantitatieve uitkomsten te genereren ligt echter veel duidelijker aan de oppervlakte dan het verklaren van gedrag.

Voor aanwijzingen over het gebruik van computermodelleren in het onderwijs moeten we afgaan op publicaties van vóór het onderzoek (o.a. Schecker, 1993; Schecker, 1998). Leerlingen ontwikkelen de computermodellen, ook voor het gebruik in een plenaire discussie. Kant-en-klare modellen worden niet ‘aangeleverd’. Leerlingen hebben de vrijheid om met eigen modelstructuren te komen. Het modeldiagram is zeker zo belangrijk als de modeluitkomsten, want hierbij wordt verantwoord waarom relaties gelegd worden. Aan de hand van een computermodel wordt de globale structuur van een fysische beschrijving besproken. Leerlingen proberen te voorspellen wat het modelgedrag is voordat het model gerund wordt. Modelresultaten worden geëvalueerd met experimentele gegevens. De docent reageert op de denkwijzen, oplossingen, en voorstellen van de leerlingen. Een consequentie is dat de les niet zo rigide gepland kan worden als wanneer hij deze zelf leidt.

Resultaten

Twee klassen (27 leerlingen) gebruiken STELLA-software bij het mechanicaonderwijs, twee controleklassen (35 leerlingen) niet. De leerlingen die STELLA gebruiken, waren al vertrouwd met de software. Voor het onderwijs was slechts 1 computer beschikbaar, zodat de leerlingen afwisselend een computermodel moesten opbouwen. De docent heeft in een voorbereidende bijeenkomst van 3 uur de basisbeginselen van STELLA geleerd.

Schecker vond geen verbeterd vakinhoudelijk begrip. De leerlingen die met STELLA gemodelleerd hebben, ontwikkelden geen beter krachtbegrip dan de controleleerlingen. Ook konden ze niet beter overweg met kwantitatieve opgaven en vergelijkingen. Wat wel verbeterde, was de (semi-kwantitatieve) vaardigheid om het bewegingsverloop te voorspellen. Ook werden complexere causale redeneringen gebruikt door leerlingen uit de experimentele groep, bijvoorbeeld door systeemgedrag te verklaren met het effect van terugkoppeling in het systeem. Er is geen merkbare ontwikkeling van een competentie in systeemdynamica.

Al met al matigt Schecker de verwachtingen over de opbrengsten van STELLA:

Die Befunde bestätigen somit den in früheren Felduntersuchungen der Autoren gewonnenen Eindruck, dass der weitreichende Anspruch, mit dem Einsatz von Modellbildungssystemen im Unterricht das systemische Denken Fördern zu wollen, nicht eingelöst werden kann. Modellbildungssysteme bewähren sich im gewählten Unterrichtskonzept als Methoden im engeren Bereich der Förderung physikalischen Verständnisses, nicht jedoch als Mittel zur Förderung übergreifender Kompetenzen. (Schecker et al., 1999, p. 26)

Discussie

Net als bij Hestenes zijn bij Schecker de ontwikkeling van domeinkennis en een modelleercompetentie aan elkaar gekoppeld, maar anders dan Hestenes krijgt Schecker twee keer een negatief resultaat. Een verklaring hiervoor moeten we misschien zoeken in de manier waarop het modelleren en het mechanicaonderwijs zijn vormgegeven.

Schecker besteedt ongeveer een kwart van de onderwijstijd aan computermodelleeropdrachten. De besteding van de overige tijd is niet gespecificeerd, en daarmee lijkt het computermodelleren vooral een verwerkingsprogramma te zijn bij verder regulier mechanicaonderwijs – waarvan bekend is dat dit niet typisch leidt tot de gewenste inzichten in het domein. Anders dan bij Hestenes lijkt het modelleren niet gericht op het ontwikkelen van basismodellen, maar alleen op het toepassen van reeds aanwezige kennis in complexere situaties.

Het ‘valide gebruik’ van de ontwikkelde modellen, domeingrenzen en inperkingen aan de gemodelleerde situaties worden waarschijnlijk niet ter discussie gesteld; Schecker noemt dit althans niet expliciet. Net als bij Hestenes zijn de probleemsituaties zo gekozen dat deze niet meer vereenvoudigd hoeven te worden.⁴ Wel lijkt het voor de min of meer ‘realistische’ situaties duidelijk, meer dan bij Hestenes, dat het makkelijker is om met het model een antwoord te vinden op de vraagstelling dan om onderzoek te doen aan de situatie zelf. De modellen worden alleen toegepast voor de concrete situaties waarvoor ze ontwikkeld zijn. Er worden geen nieuwe situaties mee verkend (nog een reden waarom ze voor leerlingen niet eenvoudig als ‘paradigmatisch’ te herkennen zijn), en ze worden ook niet verder ontwikkeld om eenzelfde vraag beter te beantwoorden (nieuwe situaties vragen om nieuwe modellen).

De meest opvallende ontwerpkeuze van Schecker is zijn keuze voor de software STELLA omwille van het verband tussen de systeemdynamische concepten en de wiskundige noties die de fysische veranderingen beschrijven. De tegenvallende resultaten van het gebruik van STELLA relateert Schecker dan ook aan “der didaktischen Konzeption dieser Softwarewerkzeuge”: de systeemdynamische conceptualisering van voorraden en stromen en de grafische representatie hiervan functioneren niet als een didactisch hulpmiddel voor het aanleren van de mechanica.

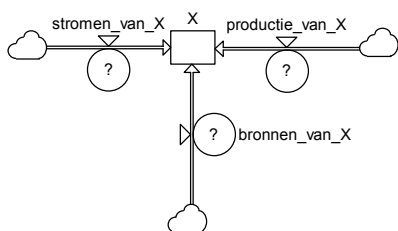
2.3.6 Fuchs: het systeemdynamisch reconceptualiseren van de natuurkunde

Het probleem dat Schecker signaleert voor het gebruik van STELLA in het mechanica-domein is het uitgangspunt van Fuchs’ onderwijs. Fuchs verweeft de systeemdynamica met een *continuum physics paradigm* (Fuchs, 1997). Het laatstgenoemde vormde oorspronkelijk het uitgangspunt; systeemdynamische inzichten en de STELLA-software sluiten hierop naadloos aan. Het basisidee van *continuum physics* is dat in fysische processen behouden grootheden beschreven kunnen worden op basis van een stroming-analogie (cf. de Karlsruhe Physics Course, zie bijvoorbeeld Hermann, 2000). Fuchs formuleerde een STELLA-specifieke didactiek voor het onderwijzen van systeemdynamisch modelleren (Fuchs, 1997, 1999). Om optimaal gebruik te maken van systeemdynamische concepten herformuleert hij (delen van) de natuurkundige theorie, zodat deze aansluit bij de gehanteerde metafoor.

⁴ Dat wil zeggen: er is wél sprake van vereenvoudigen in de zin dat voorwerpen en personen als puntmassa’s gemodelleerd worden. Dit kan echter onopgemerkt gebeuren; het maken van vereenvoudigingen is dan geen aandachtsgebied.

Interventie

Fuchs structureert de natuurkundestof aan de hand van grootheden waarvoor de stromingsmetafoor toepasselijk te gebruiken is, zoals materie, energie, lading en impuls. Het modellerenproces betreft het identificeren van deze fundamentele grootheden in een verschijnsel, deze weergeven in een stroomdiagram, en ten slotte het kwantificeren van de relaties in het stroomdiagram. Voor de laatste twee stappen kan STELLA worden gebruikt.



$$X_{t+\Delta t} = X_t + \frac{dX}{dt} \Delta t$$

$$\frac{dX}{dt} = I_{\text{netto}}^x + \Sigma_{\text{netto}}^x + \Pi_{\text{netto}}^x$$

Figuur 3. Balansvergelijking voor X. I is een stroom, Σ een bron, Π de productie. Elk kan ook negatief zijn. Σ is dan een 'afvoer', Π een conversie.

Voor de ontwikkeling van systeemdynamische modellen focust Fuchs in het onderwijs op het blootleggen van de structuur van een verschijnsel in termen van deze grootheden. De eerste stap in het modelleren is om voor de relevante grootheid een balansvergelijking (*law of balance*) op te stellen. Een balansvergelijking van X bevat de voorraad van X en stromen als resultaat van de verplaatsing van X (*currents*), bronnen (*sources*) en door vorming (*production rates*) van X. Een STELLA-diagram leent zich natuurlijkerwijs voor zo'n weergave (Figuur 3). Het stroomdiagram functioneert als een kapstok voor de verdere modelontwikkeling: de eerste stap is het bepalen van de stroomgroottes, daarna

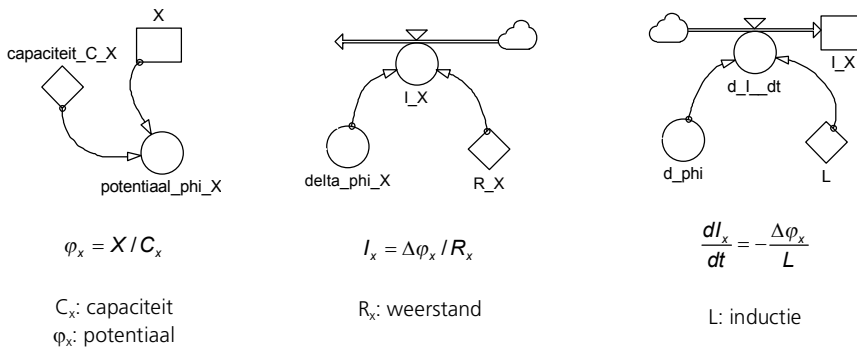
worden overige wiskundige relaties bepaald.

De 'grammatica' voor de stroomgroottes kent een aantal basisstructuren. Anders dan de *curricula-rich models* betreffen dit geen kant-en-klare modeldiagrammen (dat is immers het algemene stroomdiagram), maar delen van een modeldiagram (Figuur 4):

- *Capacitive laws*: de aandrijving van een stroom wordt veroorzaakt door een potentiaalverschil. Vaak bepaalt een verandering van de voorraadgrootheid een verandering van de potentiaal. De evenredigheidsconstante tussen beide is een capaciteit.
- *Resistance laws*: de grootte van een stroom wordt tegengewerkt door een weerstand. De evenredigheidsconstante tussen beide is een weerstand.
- *Inductive laws*: een inductie beïnvloedt de grootte van de stroom van X.

De balansvergelijking en de drie basisstructuren vormen de conceptuele structuur voor het natuurkundeonderwijs.

In totaal neemt het natuurkundeonderwijs 34 weken in beslag. Geheel in lijn met de systeemdynamische stromingsmetafoor start het onderwijs met een module over waterstroming, die zó is opgezet dat de benodigde elementen van de systeemdynamica geïntroduceerd worden. Analoog hieraan worden vervolgens elektriciteit, energie en impuls(moment) behandeld.



Figuur 4. Drie veelvoorkomende structuren: de capaciteitswet (links), de weerstandswet (midden) en de inductiewet (rechts). In de laatste integreert de ‘voorraad’ I_x de stroomverandering, maar geeft geen nieuwe balansvergelijking.

Resultaten

Fuchs integreerde het systeemdynamisch modelleren in het eerstejaars natuurkundecollege aan de Zurich University of Applied Sciences in Winterthur. Het modelleren met STELLA zoals dit in deze cursus vorm krijgt, heeft navolging gekregen in een aantal vervolgvakken. Effecten van het onderwijs zijn echter niet onderzocht.

Discussie

Het resulterende onderwijs vertoont sterke overeenkomsten met het werk van Hestenes, nu in allerlei domeinen identieke modelstructuren zijn geïdentificeerd die als bouwstenen onderwezen worden, vergelijkbaar met Hestenes’ ‘basismodellen’. Helaas weten we niets van de effectiviteit ervan. Niettemin lijken we hier wel een op het eerste gezicht zinvolle invulling te hebben gevonden van het onderwijzen van dynamische systemen.

Een andere overeenkomst tussen Fuchs en Hestenes is dat er in het modelleringsproces zelf geen aandacht wordt besteed aan vereenvoudigingen, onzekerheden, etc. Ook hier concluderen we dat dit het resultaat is van het doel dat Fuchs heeft met het modelleren: op de eerste plaats gaat het om het aanleren van nieuwe vakinhoud.

2.3.7 Vollebregt: probleemstellend modelleren

Een mogelijke interpretatie van de problemen die we signaleerden in de begintoestand van de leerlingen is dat de leerlingen gebrekkig modelleren omdat de gepresenteerde modelleringsproblemen niet geschikt zijn om de gewenste activiteiten uit te lokken bij de leerlingen. Deze insteek vormt het uitgangspunt van een zogenaamde probleemstellende benadering (Klaassen, 1995). In probleemstellend onderwijs wordt er naar gestreefd dat leerlingen steeds een inhoudelijk motief

hebben voor het uitbreiden van hun kennis. Stappen om die kennis uit te breiden zijn afgestemd op wat voor de leerlingen te overzien is, hetgeen al snel betekent dat er meerdere stappen nodig zijn om uit te komen bij het beoogde onderwijsdoel. Als uit de evaluatie van een eerste kennisuitbreiding blijkt dat een startvraag niet voldoende is beantwoord, biedt dit een nieuw motief voor een volgende kennisuitbreiding. Het leerproces komt daardoor in een aantal opzichten sterk overeen met het modellerproces: het ligt voor de hand dat er meerdere iteraties optreden om tot een bevredigend antwoord te komen, en het proces is intrinsiek logisch voor degene die de rationale van de verschillende activiteiten kent.

Hoewel de probleemstellende aanpak geenszins voorschrijft dat leerlingen zelf elke processtap moeten kunnen maken (een docent kan de logica ook zelf expliciteren), is het uitgangspunt van de probleemstellende benadering toch om het proces zoveel mogelijk ‘bottom-up’ vorm te geven: “een onderwijsleerproces dat grotendeels (van onderaf) wordt geleid door de eigen motieven, kennis en vragen van de leerlingen op een probleemstellende manier, zodat zij bij voorkeur zelf de vragen formuleren die hun leerproces aandrijven” (Kortland, 2001, p. 214). Daartoe is het zo belangrijk om productief gebruik te maken van de voorkennis van leerlingen. Reflectie speelt dan ook een grote rol in probleemstellend onderwijs om er voor te zorgen dat leerlingen zicht houden op de bijdrage van de onderwijsactiviteiten aan de grote lijn van het onderwijsproces, en om domeinoverstijgende vaardigheden te abstraheren van een contextspecifieke invulling (Lijnse & Klaassen, 2004).

In haar analyse van een probleemstellend lesontwerp beschouwt Westbroek (2005) niet alleen de inhoudelijke uitlijning en de context, maar ook de leerlingbijdragen. Ze noemt het onderwijs betekenisvol als alle drie elementen ‘functioneel zijn ingebed’. ‘Functioneel’ betreft zij dus niet alleen op de interne logica van het ontwerp, maar ook op de (mogelijke) bijdragen van de leerlingen. Dit streven stemt goed overeen met ons uitgangspunt om de leerlingen zelf het modellerproces uit te laten voeren, om hen zo een eigen modellerervaring te geven.

De probleemstellende benadering is uitgewerkt voor verschillende onderwerpen. We bespreken Vollebregt (1998) als voorbeeld, omdat ook in haar onderzoek het modellerproces centraal staat. Vollebregt beschrijft een probleemstellende aanpak voor het onderwijzen van het deeltjesmodel. Het belang van dit model is dat het allerhande eigenschappen van gassen verklaart, maar het is een bekend didactisch probleem dat, na het volgen van onderwijs hierover, leerlingen macro-eigenschappen van gassen, zoals temperatuur, toekennen aan individuele deeltjes. Ze kennen weliswaar een aantal eigenschappen van het deeltjesmodel, maar ze gebruiken deze eigenschappen niet om macro-eigenschappen van de materie te verklaren. Het deeltjesmodel wordt dus niet productief als verklaringmodel. Een probleemstellende aanpak moet juist dit inzicht bewerkstelligen. Bovendien is de gedachte dat, als leerlingen steeds het doel inzien van elke activiteit, zij beter in staat zijn om bij te dragen aan het modellerproces.

Vollebregt probeert het deeltjesmodel productief te maken door, voortbouwend op reeds aanwezige kennis van macro-eigenschappen, problemen te identificeren die een verklaring behoeven en het deeltjesmodel samen met de leerlingen te ontwikkelen ter oplossing van die problemen. Modelleren is in deze module dus, net als bij Hestenes, eerder een didactisch middel dan een doel op zich. Bovendien is de module meer gericht op theoretisch inzicht dan op toepassingsvaardigheid. Toch krijgen in deze module veel van de eerder besproken modelleerkenmerken vorm. In het bijzonder wordt in deze module een beroep gedaan op bestaande domeinkennis en wordt deze kritisch getoetst.

Interventie

Vollebregt ontwierp een serie van negen lessen van 65 minuten voor 4 HAVO/VWO. We concentreren ons op die stappen in de module die de introductie en het gebruik van het model voor de leerlingen moesten motiveren, en op de inbreng van de leerlingen in het modelleerproces.

Om een deeltjesmodel te introduceren was het de opzet van een eerste onderwijsontwerp om de leerlingen eerst te voorzien van een theoretische oriëntatie. Deze houdt in dat leerlingen een motief ontwikkelen om hun bekende eigenschappen van materie beter te begrijpen. Als motief was beoogd dat leerlingen gaan inzien dat een algemener kennisniveau mogelijk is, en dat deze kennis breed toepasbaar is voor het voorspellen en verklaren van verschijnselen. Echter, dit bleek onvoldoende om de leerlingen een richting te geven voor het uitbreiden van hun kennis:

One can doubt whether [the students] are really challenged to find solutions, for they do not know how a search for answers should be conducted, nor do they have an idea of the kind of knowledge that they will arrive at. In the above activities, they may begin to suspect that the new knowledge which is to be developed will be of an even more general nature, but this in itself cannot direct their search. (...)

We did not succeed in improving the approach in such a way that, before the model was introduced, pupils would already have a better idea of the kind of knowledge that they were to construct. (Vollebregt, 1998, pp. 49, 50)

In een herziening van het ontwerp wordt in een vroeg stadium een voorlopig deeltjesmodel geïntroduceerd om richting te geven aan het zoeken naar een verklaring voor de eigenschappen van een gas. In dat deeltjesmodel bestaat een gas uit identieke, onveranderlijke deeltjes die ieder een vast volume innemen. Dit voorlopige deeltjesmodel verklaart een aantal intuïtieve en onproblematische macroscopische eigenschappen van gassen, zoals een verband tussen de hoeveelheid gas en het aantal deeltjes en tussen het gasvolume en de ruimte waarin de deeltjes zich bewegen. Daardoor is er enige grond om de verdere bruikbaarheid ervan te onderzoeken. Leerlingen proberen met behulp van het model andere verschijnselen te verklaren waarvoor vervolgens aanvullende modeleigenschappen nodig blijken te zijn, bijvoorbeeld dat druk en temperatuur recht evenredig zijn (de wet van Gay-

Lussac), warmtegeleiding en faseovergangen. Bij het verklaren van deze verschijnselen worden die relaties gethematiseerd die typisch tot begripsproblemen leiden, zoals de relatie tussen temperatuur en snelheid van de deeltjes. Als test voor de bruikbaarheid wordt het model tenslotte toegepast voor het verklaren van het gedrag van vloeistoffen en vaste stoffen. De aard van het model wordt gethematiseerd door de leerlingen herhaaldelijk plenair te laten discussiëren over de vraag of de modeldeeltjes nu ‘echt bestaan’.

Resultaten

Het onderwijs is herhaaldelijk uitgevoerd en aangepast in het kader van een ontwikkelingsonderzoek. In de laatste onderzoeksrunde is de modelleermodule uitgevoerd in een klas met 11 leerlingen in 4 HAVO/VWO. Vollebregt heeft het verloop van de lessenserie kwalitatief geanalyseerd om te beoordelen in hoeverre het modelleerproces beantwoordde aan wat er mee beoogd werd. Na afloop is met de leerlingen individueel een interview gehouden over hun ideeën over het deeltjesmodel en de aard van het model.

In het uiteindelijke ontwerp is de introductie van het model voor de leerlingen niet logisch ingebed geweest. Niettemin hebben de leerlingen het model wel gaandeweg geaccepteerd als een bruikbaar instrument voor het verklaren van eigenschappen van gassen. Het uitbreiden van het model om de toepasbaarheid ervan te vergroten lijkt voor de leerlingen redelijk inzichtelijk te verlopen, want zij zijn actief betrokken in het modelleerproces. Leerlingen formuleren zelf hypothesen over het modelgedrag ter verklaring van macroscopische verschijnselen. Ook opperen zij mogelijk productieve modelaanpassingen, die vervolgens geëvalueerd worden. Deze evaluaties worden vooral gebaseerd op gedachte-experimenten; de intuïties van de leerlingen over het gedrag van macroscopische ballen zijn hiervoor voldoende. De intuïties van de leerlingen leidden het modelleerproces echter niet altijd in de beoogde richting. Een aantal leerlingen vond het verloop dan geforceerd.

Na afloop van de interventie passen de leerlingen het deeltjesmodel goed toe om de eigenschappen van gassen te verklaren. Modelkenmerken als onveranderlijke deeltjes en vacuüm tussen de deeltjes zijn goed begrepen, maar het verklaren van de temperatuur uit de snelheid van de deeltjes slechts ten dele, net als de elastische botsingen tussen de deeltjes. De veronderstelling van veel leerlingen dat de temperatuur van een gas gerelateerd is aan de temperatuur van de gasdeeltjes wordt geëxpliciteerd, onderzocht en vergeleken met concurrerende hypothesen. De meeste leerlingen gebruiken na het onderwijs de snelheid van de deeltjes om de temperatuur van een gas te verklaren, maar zijn niet in staat te verwoorden hoe opwarming tot een hogere snelheid leidt. De relatie tussen snelheid en temperatuur is niet inzichtelijk geworden.

Uit de interviews die zij met de leerlingen heeft gehouden na afloop van de lessenserie blijkt dat het modelbegrip dat de leerlingen hebben ontwikkeld goed correspondeert met de manier waarop de leerlingen het deeltjesmodel zelf toepassen. Leerlingen zien modelontwikkeling als een doelgericht proces, namelijk voor het

verklaren van verschijnselen. Zij herkennen het iteratief verloop van modelontwikkeling voor het verbeteren van hun model. Leerlingen hebben ook geleerd om hun model zo eenvoudig mogelijk te houden, en in de voortgang van het modelleerproces zoveel mogelijk de eerder ontwikkelde modelkenmerken te handhaven.

Discussie

Het onderwijs van Vollebregt onderscheidt zich van de andere besproken projecten in een tweetal opzichten. Ten eerste wordt er productief gebruik gemaakt van wat leerlingen al weten om hun kennis uit te breiden. Maaß maakt weliswaar ook productief gebruik van leerlinginbreng, maar ze beoogt niet dat leerlingen nieuwe vakkennis leren. In de projecten van bijvoorbeeld Schwarz & White en Hestenes worden leerlingintuïties opgeroepen om ze te contrasteren met de aan te leren concepten: zij streven er naar om een ‘cognitief conflict’ uit te lokken. Het doel van zo’n conflict is om de leerlingen er toe te brengen hun oude inzichten op te geven. Vollebregts insteek is om productief gebruik te maken van hun bestaande inzichten, en hen te motiveren om deze uit te breiden. Het vormgeven van dit onderwijs vereist een zorgvuldige afweging welke activiteiten door leerlingen zelfstandig zijn uit te voeren en welke niet. Hoewel Vollebregt er binnen het bestek van haar onderzoek niet in is geslaagd om het gehele modelleerproces probleemstellend te laten verlopen, laat ze op een aantal plaatsen zien hoe de leerlingen hun leerproces zelf sturen in de beoogde richting.

Een tweede onderscheidend kenmerk is dat het model een aantal herzieningen ondergaat voordat het voldoende kwaliteit heeft. In de voorgaande modelleercurricula betrof de ontwikkeling van modellen steeds het construeren en toepassen van een nieuw type model voor andersoortige situaties. In het modelleeronderwijs van Vollebregt daarentegen wordt een voorlopig model in een aantal stappen bijgeschaafd totdat het voldoende adequaat is om de hen bekende macroscopische gedragingen te verklaren. Vollebregt streeft er naar om de kennisuitbreiding voor de leerlingen inhoudelijk betekenisvol te maken, en het modelleerproces voor zover mogelijk te laten ontwikkelen door hun eigen bijdragen. Anders dan in de eerder besproken curriculumprojecten krijgen de modevaluaties daardoor een richtinggevende functie, net als in de onderzoekspraktijk.

De combinatie van deze beide kenmerken resulteert in onderwijs dat tot dusver leerlingen nog de meest authentieke invulling biedt van natuurwetenschappelijk modelleren als doelgericht proces van kennisontwikkeling en toepassing van die kennis.

2.4 Conclusies en discussie

In de voorgaande paragrafen hebben we zeven curriculumstudies besproken, om daaruit ontwerprichtlijnen af te leiden voor het vormgeven van een modelleerproces als basis voor competentieontwikkeling in het voortgezet onderwijs. Vanuit dat gezichtspunt zetten we hierna de belangrijkste ontwerpkenmerken en de resterende

ontwerp vragen op een rij. Het is relevant om vooraf op te merken dat de informatie over de manier waarop de interventies zijn vormgegeven en hebben gefunctioneerd in de klas in de meeste rapportages vrij beperkt blijft, net als wat er precies getest is. Dit maakt het enerzijds moeilijk te beoordelen wat effectmetingen nu uitwijzen, en anderzijds hoe effecten (of het ontbreken daarvan) het resultaat zijn van de geboden interventie.

2.4.1 Natuurwetenschappelijke modelontwikkeling

In alle besproken curriculumstudies wordt benadrukt dat leerlingen zelf moeten modelleren. De activiteiten die worden voorgesteld verschillen echter nogal, wat gedeeltelijk te verklaren is uit verschillen in de nagestreefde doelen:

- vakinhoudelijke kennis en heuristieken (zoals mechanica);
- inzicht in modelstructuren (in een systeemdynamisch kader);
- inzicht in het proces van wetenschappelijke kennisvorming en de rol van modelle(re)n daarin;
- vaardigheid in het aanpakken van realistische (slechtgedefinieerde) problemen.

De vakinhoud en het modelleringsproces staan bij de verschillende doelen in steeds een andere verhouding tot elkaar. Bij het eerste doel is het zelf modelleren vooral een middel om inhoudelijke inzichten en vaardigheden te ontwikkelen. Met name Hestenes en Fuchs focussen op modellen, patronen en gedragingen die als bouwstenen dienen voor het modelleren in het betreffende domein. In een systeemdynamisch kader zijn er ook basisstructuren te identificeren die niet specifiek zijn voor een enkel domein. De mechaniekennis die de leerlingen verwerven volgens Hestenes' methode lijkt te resulteren in de meest systematische en volledige weergave van een domein, bestaande uit een 'basisbibliotheek' van veelgebruikte modellen. Bovendien krijgen leerlingen geëxpliciteerd welke informatie er in die basisstructuren moet en hoe deze gerepresenteerd dient te worden.

In ons onderzoek, waar het gaat om de ontwikkeling van een ervaringsbasis voor competentieontwikkeling, is het verwerven van vakinhoudelijke kennis daaraan ondergeschikt. Om natuurwetenschappelijke modelontwikkeling vorm te geven in het onderwijs moeten met name de twee aspecten gerealiseerd worden die in paragraaf 2.1 zijn benoemd, namelijk (1) modelontwikkeling als een doelgericht probleemoplosproces, en (2) het voorspellen van gedragingen van een complex systeem op basis van een causaal model.

In de besproken projecten krijgt het doelgerichte karakter van het natuurwetenschappelijk modelleren vooral vorm in het onderwijs van Maaß en Vollebregt, omdat daarin de modelleeractiviteiten gestuurd worden door de vraagstelling waaraan de leerlingen werken. Wat betreft voorspellen en evalueren werken de leerlingen bij Schwarz & White en Hestenes volgens een empirische cyclus waarin modelresultaten getoetst worden aan meetgegevens. Epistemologische waarden functioneren in de modevaluatie, waardoor de aard van wetenschappelijke kennis serieus genomen wordt in een onderwijscontext.

Een aspect dat weinig tot geen invulling krijgt, is het modelonderzoek. De basismodellen in het onderwijs van Hestenes worden wel wiskundig geëxploreerd, maar – inherent aan de modellen die daar onderwezen worden – de uitkomsten zijn beperkt tot basale uitwerkingen voor eenvoudige situaties. In de meer complexe probleemsituaties die de leerlingen bij Maaß ontmoeten, is de uitwerking van het model rechttoe, rechtaan als het model er eenmaal ligt. Modelonderzoek vormt daar geen wezenlijk onderdeel van het proces.

2.4.2 Betekenisvol voor leerlingen

Een modelleerproces vormgegeven in een onderwijsontwerp is doelgericht als de leerlingen het proces als zodanig ervaren. In het vervolg duiden we dit aan als betekenisvol, hetgeen we definiëren als:

- leerlingen hebben inzicht in het doel;
- leerlingen zien in hoe de te ondernemen activiteiten bijdragen aan het bereiken van het gestelde doel;
- vakinhoudelijke noties op basis waarvan keuzes en beslissingen genomen worden, stemmen overeen met leerlingideeën.

In dit proefschrift wordt betekenisvol dus strikt inhoudelijk opgevat, in tegenstelling tot het meer alledaagse gebruik van ‘affectieve relevantie’. Niettemin zullen leerlingen meer betrokken zijn bij een doel dat zij de moeite waard vinden en is het te verwachten dat zij dan ook meer belang hechten aan de rationale van het proces om dat doel te bereiken.

De perceptie van de leerlingen zal sterk afhangen van de wijze waarop het onderwijs aansluit bij de leerlingideeën en de wijze waarop zij bij het modelleerproces betrokken worden. In de meeste curriculumstudies ontbreken veelal precieze data van het onderwijsverloop, zodat het vrijwel onmogelijk is om te beoordelen of het onderwijsverloop door leerlingen als doelgericht wordt ervaren. Sommige globale ontwerpkenmerken geven echter aanleiding om te veronderstellen dat dit niet zonder meer is gelukt. Een prominent kenmerk van een aantal curriculumprojecten is bijvoorbeeld het expliciteren van het modelleerproces. Een dergelijke ‘advance organiser’ laat de leerlingen vooral zien hoe het onderwijs procesmatig verdergaat, maar dit maakt de te ondernemen activiteiten niet per sé doelgericht. Een ander voorbeeld is het modelleeronderwijs van Hestenes, dat primair gericht is op het bestrijden van verkeerde leerlingideeën. Het is niet vanzelfsprekend dat de leerlingen vervolgens ook zelf inzien met welk doel de te leren natuurwetenschappelijke concepten geïntroduceerd en toegepast worden.

Vollebregt stelde zich expliciet ten doel om intuïtieve leerlingnoties op te roepen die productief zijn voor het identificeren van de te leren kennis en vaardigheden, en hen deze te laten toepassen. Vanuit het perspectief van een betekenisvolle uitlijning wordt een onderwijsontwerp dus gevormd door een keten van inhoudelijke motieven, zodanig dat een (ingeperkt) probleem aanleiding geeft tot kennisuitbreiding, op basis waarvan een volgend probleem geïdentificeerd wordt, enzovoorts, totdat alle beoogde

leerdoelen gerealiseerd zijn. Deze keten van motieven vormt een zogeheten didactische structuur van het ontwerp (Lijnse & Klaassen, 2004). Om een dergelijke betekenisvolle structuur te ontwerpen moet er in de keuze van het modelleerprobleem in ieder geval rekening gehouden worden met de voorkennis van de leerlingen: in hoeverre zij over relevante noties en verwachtingen beschikken waar vervolgens constructief op kan worden voortgebouwd.

Hoewel het bijzonder moeilijk bleek om het onderwijs zo te ontwerpen en in te richten, lijkt dit wel de moeite van het proberen waard omdat de leerlingen zo steeds zicht hebben op de logische samenhang van het modelleerproces. Leerlingen kunnen dan het modelleren ervaren als een doelgericht proces.

2.4.3 Productieve constructieruimte

Modelleerervaring opdoen vereist niet alleen toekijken en toehoren, maar ook zelf aan de slag gaan. Om leerlingen zelf ervaring te laten opdoen in het maken van doelgerichte besluiten en evaluaties moet het zelf aan de slag gaan niet beperkt blijven tot voorgeschreven taken maar moeten zij de gelegenheid krijgen om zelf modelkeuzes te maken en evaluatiebeslissingen te nemen.

Het ligt voor de hand dat een in de klas vorm te geven modelleerproces niet alleen maar door leerlingen uitgevoerd kan worden. De docent zal daarin ook een belangrijke taak hebben, om waar nodig, als ‘voorbeeld-modelleerder’ een rolmodel te vervullen. Zijn aandeel in het modelleerproces zal dus afwisselend zijn: nu eens de leerlingen verantwoordelijkheid geven om eigen constructies en keuzes te maken, dan weer zelf de leiding nemen. Bovendien kan de verantwoordelijkheid van de docent gedurende het proces minder worden als leerlingen taken gaan overnemen die hij in een eerder stadium voorgedaan heeft. Dit is voor hen niet eenvoudig. De praktijk wijst uit dat er geregeld spanningen ontstaan tussen ‘freedom from below’ enerzijds (namelijk: de richting die leerlingen zelf identificeren) en de ‘guidance from above’ anderzijds: de richting die de docent en het lesmateriaal gaan (Lijnse, 1995; Schoenfeld, 1994).

Constructieruimte voor leerlingen moet dus begrensd worden. De aard van deze begrenzing wordt bijvoorbeeld duidelijk uit de evaluatiefase. Natuurwetenschappelijk modelleren is gericht op kennisconstructie. Het kritisch evalueren van vermeende kennis is daarvoor een noodzakelijke stap. Het spreekt vanzelf dat er, om een evaluatiefase vorm te geven, aan basale randvoorwaarden moet zijn voldaan: een goed antwoord ligt niet op voorhand vast, er zijn criteria om antwoorden te beoordelen, en evaluatiecriteria hoeven niet uit te sluiten of er maar één goed antwoord is. Om bij te kunnen dragen aan de evaluatie moeten de leerlingen kunnen beargumenteren dat een keuze tot de beste (of: een goede) beschrijving van de werkelijkheid leidt. Een tweede reden voor begrenzing van de leerlingvrijheid is om een klassikaal proces voor de docent hanteerbaar te houden en de leeropbrengsten en ervaringen van de leerlingen vergelijkbaar.

We definiëren productieve constructieruimte als de situatie waarin

- een keuze, aanname, beslissing of evaluatie gemaakt wordt op basis van leerlingbijdragen;
- leerlingen hun bijdragen onderbouwen (dat is: zij nemen er verantwoordelijkheid voor) omdat de uitkomst consequenties heeft voor het vervolg (dat is: de leerlingen hebben een reden om er verantwoordelijkheid voor te nemen).

Constructieruimte krijgt op verschillende manieren inhoud in de besproken curriculumprojecten.

In een aantal projecten is geprobeerd de complexiteit van het modelleerproces voor de leerlingen te verminderen met behulp van modelleersoftware. In het METT-curriculum boden Schwarz en White de leerlingen zo keuzevrijheid, maar gaven hen geen aandeel in de modelvorming. Dat staat erg ver af van wat ons voor ogen staat. Anderen gebruikten grafische, systeemdynamische tools, waarvan twee voordelen werden verwacht: (1) het modeldiagram verduidelijkt voor leerlingen de conceptuele structuur van een model, en (2) de stromingmetafoor ondersteunt hun inzicht in dynamische verschijnselen. Inderdaad zijn er systeemstructuren te identificeren die als bouwstenen in verschillende modellen toepasbaar zijn, hoewel een overzicht van de relaties niet zonder meer bijdraagt aan inzicht in het systeemgedrag. Als de beeldtaal van een grafische modelleertool niet overeenkomt met de terminologie van de vakinhoud draagt zo'n tool niet bij aan een beter begrip van de vakinhoud. Zo bleek uit Scheckers onderzoek dat de grafische modelstructuren uit STELLA geen vanzelfsprekende ondersteuning bieden voor het onderwijzen van mechanica. Wanneer de stroommetafoor niet natuurlijk toepasbaar is, moet de *matching* geëxpliciteerd worden of, zoals Fuchs deed, het vakgebied zelf gereconceptualiseerd.

Bij Hestenes wordt nadere sturing en controle ontleend aan de domeinspecifieke heuristieken die hij voor de leerlingen expliciteerde, terwijl Maaß de richting steeds ontleent aan de vraagstelling waaraan de leerlingen werken. Bij beiden komen metacognities van leerlingen effectief tot uiting. Hestenes en Maaß verklaren dit in ieder geval deels door te wijzen op het voor de leerlingen uitgewerkte en gepresenteerde modelleerproces als een stapsgewijs proces. Dit maakt het in ieder geval mogelijk dat leerlingen in groepjes hun eigen oplossingen genereren die vervolgens vergeleken en geëvalueerd kunnen worden. Bij beiden werken de leerlingen aan problemen waarvoor zij alleen beroep hoeven te doen op eerder verworven kennis (hetzij net nieuw, hetzij reeds lang bekend), om hen niet te belemmeren in hun vrijheid gedurende het modelleerproces. Vollebregt daarentegen beoogt de leerlingen ook inbreng te geven in de uitbreiding van hun kennis. Zij verantwoordt dan ook van elke modelleeractiviteit wat er verwacht mag worden van de bijdragen van de leerlingen. De kennisontwikkeling stuurt ze niet volgens geëxpliciteerde proces- en productingrediënten maar volgens de aanwezige intuïties van de leerlingen. In een nieuwe context is het dan de vraag op welke leerlingideeën voortgebouwd kan worden.

2.4.4 Onderzoeksvraag

In paragraaf 2.2 hebben we geconcludeerd dat het voor de ontwikkeling van een modellercompetentie op het terrein van complexe dynamische systemen nodig is dat leerlingen modellerervaring opdoen. In voorgaande paragrafen is betoogd dat een onderwijsleertraject dan aan ten minste drie voorwaarden moet voldoen: kenmerken van natuurwetenschappelijke modelontwikkeling moeten aanwezig zijn, het proces van modelontwikkeling moet betekenisvol zijn voor de leerlingen en leerlingen hebben productieve constructieruimte nodig. De ontwerpvoorwaarden en de leerdoelen staan in onderlinge wisselwerking tot elkaar: hoe de beoogde modellercompetentie invulling zal krijgen hangt mede af van de vraag welke aspecten betekenisvol gemaakt kunnen worden en of daarvoor productieruimte gerealiseerd kan worden.

In dit proefschrift richten we ons op het identificeren van ontwerprichtlijnen voor modelleronderwijs van voldoende didactische kwaliteit, dat is: een onderwijsleertraject waarin leerlingen modellerervaring opdoen die als basis kan dienen voor competentieontwikkeling. De onderzoeksvraag voor dit onderzoek luidt:

Hoe is voor leerlingen in het voortgezet onderwijs modellerervaring vorm te geven, dat wil zeggen: hoe krijgen *natuurwetenschappelijke modelontwikkeling*, *betekenisvol voor leerlingen* en *productieve constructieruimte* adequaat vorm in een concreet modelleerproces?

2.5 Methodologisch kader

In het voorafgaande hebben we onze uitgangspunten en doelstellingen voor ‘goed modelleronderwijs’ gedefinieerd. De vraag hoe, en of, die uitgangspunten concreet vorm kunnen krijgen binnen de randvoorwaarden van het bestaande voortgezet onderwijs is daarmee echter nog niet beantwoord. Het in de voorgaande paragrafen besproken onderzoek levert weliswaar bruikbare aanwijzingen, maar geeft onvoldoende richting om het onderwijzen van natuurkundig leren modelleren concreet vorm te kunnen geven. Ons onderzoek is er op gericht zulke richtlijnen te ontwikkelen en te valideren, om zodoende bij te dragen aan een bruikbare vakdidactische theorie voor dit onderwerp.

2.5.1 Een bruikbare vakdidactische theorie

Een vakdidactische theorie, ook wel aangeduid als domeinspecifieke leertheorie, geeft richtlijnen voor de na te streven onderwijsdoelen op basis van vakinhoudelijke, pedagogische, leerpsychologische en praktische overwegingen. McKenney, Nieveen, & Van den Akker (2006) stellen voor dat zo’n theorie de vorm heeft van beargumenteerde ontwerpaanwijzingen (p. 73):

if you want to design intervention X [for purpose/function Y in context Z]; then you are best advised to give that intervention the characteristics C, C, ..., C [substantive emphasis]; and do that via procedures P, P, ..., P [procedural emphasis]; because of theoretical arguments T, T, ..., T; and empirical arguments E, E, ... E.

McKenney en collega's zijn niet erg specifiek over de inhoud van de verzamelingen van ontwerpkenmerken en procedures. Hun formulering laat ruimte voor een invulling met discrete elementen op een hoog abstractieniveau, zoals bijvoorbeeld de algemene onderwijskundige ontwerpprincipes van Merrill (2002). Daartegenover staat een meer gesitueerde benadering, waarin de nadruk ligt op "a greater understanding of a *learning ecology* – a complex, interacting system involving multiple elements of different types and levels" (Cobb, Confrey, diSessa, Lehrer, & Schauble, 2003, p. 9). In lijn daarmee benadrukt Lijnse vooral het belang van een didactische structuur voor het onderwerp als geheel, dat wil zeggen: een empirisch (*i.e.* in de praktijk werkbaar) en theoretisch (*i.e.* begrijpelijk) onderbouwde didactische ordening om een zeker onderwerp te onderwijzen (Lijnse, 1995, 2002).

Hoewel er dus verschillende opvattingen zijn over de precieze inhoud van de theorie heeft bij alle aangehaalde auteurs de vakdidactische theorie zowel een beschrijvende als een voorschrijvende pretentie: enerzijds leidt de theorie tot verwachtingen over het verloop van het leerproces in een gegeven onderwijssituatie, anderzijds biedt de theorie een voorschrift voor het inrichten van die onderwijssituatie. Of een didactische theorie bruikbaar gevonden wordt, hangt voor een deel af van de beschrijvende geldigheid: de theorie moet in ieder geval leiden tot geldige verwachtingen over het verloop van het leerproces in een gegeven onderwijssituatie. Dat wil niet zeggen dat de theorie alles correct moet voorspellen:

whether a didactical theory is 'good enough', whether it serves as a valuable guideline for understanding and guiding what goes on in actual classes. In each of these classes, however, the teaching/learning process, will without doubt meander in a somewhat different way around the main path predicted by the didactical theory. (Klaassen, 1995; p. 128)

Voor een bruikbare didactische theorie is beschrijvende geldigheid echter niet voldoende: de theorie moet ook tot navolgenswaardige voorschriften leiden. Of iemand de voorschriften uit de theorie navolgenswaardig vindt, hangt voor een deel af van zijn of haar (normatieve) visie op onderwijs, maar die visie is voor een deel ook weer gebaseerd op ideeën over wat werkt en wat haalbaar is. De juistheid van die ideeën kan alleen getoetst worden aan de hand van concreet onderwijs.

2.5.2 Het ontwikkelen en toetsen van een vakdidactische theorie

Om te kunnen beoordelen of een vakdidactische theorie juist en bruikbaar is, is het dus nodig onderwijs te ontwikkelen dat een valide uitwerking biedt van de voorgestelde aanpak, dit onderwijs in de praktijk uit te proberen en hierover inzichtelijk te rapporteren:

The intent is not to “prove” anything, but to make it possible for others to judge what has been done and to enable them to “reconstruct” for themselves the processes described”. (Lijnse, 1995, p. 196; in navolging van Freudenthal)

In de rapportage van veel onderwijsonderzoek wordt aan dit vereiste niet voldaan en wordt het ontwerp alleen op globaal niveau besproken, waardoor onduidelijk blijft hoe het ontwerp een uitwerking biedt van de voorgestelde aanpak. Ook blijft vaak onduidelijk welke elementen van het ontwerp cruciaal zijn voor het welslagen van de interventie. Hestenes’ onderzoek naar de effecten van zijn *Modeling Approach to Physics Teaching* is hiervan een goed voorbeeld: op de FCI scoren leerlingen die het vernieuwde mechanicaonderwijs volgden veel beter dan controlegroepen uit het reguliere onderwijs. Het resultaat is robuust: de meeste docenten die het programma toepassen, zien betere leerlingresultaten op de FCI (Wells, et al., 1995). Desondanks is dit onderzoek maar beperkt bruikbaar als vakdidactische theorie: Hestenes’ interventie bestaat uit een groot aantal ingrediënten, die hij slechts globaal beschrijft. Bovendien onderzoekt hij vrijwel alleen het leerresultaat, zonder aandacht voor het onderwijsproces. Het blijft dan ook onduidelijk hoe de verschillende ingrediënten een rol spelen bij het bereiken van het resultaat. Daardoor zijn de bevindingen van Hestenes niet eenvoudig naar een andere setting te vertalen. Dat blijkt bijvoorbeeld als we het verschil willen verklaren met de tegenvallende resultaten van Scheckers mechanicaonderwijs, dat met (o.a.) dezelfde FCI-toets werd geëvalueerd.

Om een bruikbare vakdidactische theorie te ontwikkelen bieden vergelijkende experimenten, surveys en correlatieve analyses dus onvoldoende aanknopingspunt (cf. Van den Akker, 1999). Van meerdere kanten is beargumenteerd dat dit een oorzaak is van de door zowel docenten als onderzoekers ervaren kloof tussen de onderwijspraktijk en de onderwijstheorie (Broekkamp & Van Hout-Wolters, 2006), onder andere verwoord door het Design-Based Research Collective (2003, p. 5):

[E]ducational design is often divorced from the problems and issues of everyday practice – a split that creates a need for new research approaches that speak directly to problems of practice and that lead to the development of usable knowledge.

Een mogelijkheid ter overbrugging van die kloof is actie-onderzoek, waarin docenten hun eigen onderwijs onderzoeken. In dergelijk onderzoek start men bottom-up vanuit de persoonsgebonden kennis, ervaring en intuïties die in de praktijk aanwezig zijn, die men vervolgens ontsluit, systematiseert en toetst (Cochran-Smith & Lytle, 1999; Stevens, 2004). Door de onderwijspraktijk van de docent als uitgangspunt te nemen wordt enerzijds wel de aansluiting bij het bestaande onderwijs gewaarborgd, maar wordt anderzijds de mogelijkheid tot inhoudelijke en didactische vernieuwingen die ver buiten deze praktijk staan drastisch ingeperkt.

2.5.3 Ontwikkelingsonderzoek: het ontwerp als onderzoeksinstrument

Om wel tot een bruikbare vakdidactische theorie te komen is allereerst een visie nodig op de te bereiken doelen, een visie die, zoals beschreven in het voorgaande, onderbouwd kan zijn vanuit vakinhoudelijke, pedagogische, leerpsychologische en praktische overwegingen. Vervolgens zijn verwachtingen nodig over wat een geschikte aanpak zou kunnen zijn om de gewenste doelen te bereiken. Om deze verwachtingen te toetsen is het nodig concreet onderwijs te ontwerpen dat een valide uitwerking biedt van de bedoelde aanpak.

In zijn algemeenheid zijn daarvoor meerdere ontwerp pogingen nodig. Het iteratieve onderzoeks- en ontwerpproces dat hierop is gericht staat bekend als ontwikkelingsonderzoek of design research. Deze onderzoeksmethode komt meer en meer in de belangstelling te staan van het onderwijsonderzoek, blijkens bijvoorbeeld enkele *special issues* uit de vakdidactische en onderwijskundige literatuur (Barab & Squire, 2004; Kelly, 2003; Méheut & Psillos, 2004). Hoewel er in ontwikkelingsonderzoek veel aandacht uitgaat naar het maken van een functionerend onderwijsontwerp is dit niet de belangrijkste opbrengst. Het onderwijsontwerp dient als instrument om de didactische aanpak en de uitwerking ervan te kunnen toetsen. De opbrengst van verschillende onderzoeksrondes is dus niet in de eerste plaats een ontwerp dat meer of minder goed werkt. Ook staan in het empirisch onderzoek niet de uitgangspunten ervan ter discussie. In het onderzoek gaat het om de uitwerking van die uitgangspunten: de kwaliteit van het ontwerp en van de uitvoering in de schoolpraktijk. Het onderzoek is veelal kleinschalig – het vindt typisch plaats in één of enkele klassen – omdat het ontwerpen en aanpassen van onderwijs deel uitmaakt van de methode. Door deze kleinschaligheid is het ook mogelijk de focus te leggen op het onderwijsproces in plaats van (enkel) op de onderwijseffecten.

Uiteraard is er geen eenduidige manier om tot een goed ontwerp te komen; richtlijnen voor de inrichting van het onderwijs maken deel uit van de nog te formuleren didactische theorie. Het proces om tot een ontwerp te komen noemt Gravemeijer dan ook niet voor niets theorie-geleide bricolage (Gravemeijer, 1994): het ineenvlechten van beschikbare onderwijskundige theorie, vakdidactische inzichten, praktijkkennis en intuïties van docenten tot een ontwerp dat zo goed mogelijk vorm geeft aan de uitgangspunten. Wellicht nog meer dan door het ontwerp zelf wordt de kwaliteit van de uitvoering bepaald door de docenten, die tegelijkertijd nog slechts beperkt over de vakdidactische know-how zullen beschikken om een innovatief ontwerp succesvol te implementeren. Het leerproces van de docenten maakt dus integraal deel uit van de onderzoeks aanpak en afwijkingen van wat er beoogd is, zijn in meer of mindere mate te verwachten. Daarom is het belangrijk om docenten al vroeg in het ontwerpproces te betrekken en intensief voor te bereiden op de implementatie van het ontwerp, zodat zij de te volgen aanpak onderschrijven en in voorkomende gevallen met vertrouwen hun eigen lesbeslissingen kunnen nemen.

2.5.4 Scenario-gebaseerd ontwikkelingsonderzoek

Als het onderwijsontwerp dient om een didactische aanpak in de praktijk te toetsen, is een eerste vereiste dat het ontwerp een goede uitwerking is van de bedoelde aanpak. Vervolgens is het nodig dat het gerealiseerde onderwijsproces vorm geeft aan de kenmerken die in het ontwerp bedoeld waren. Het is natuurlijk onmogelijk – en ook niet nodig – om alles wat in de lessituatie zal gebeuren in het onderwijsontwerp te voorzien. De cruciale vraag voor het evalueren van het ontwerp is of de beoogde aanpak gerealiseerd wordt in de onderwijsuitvoering (Dede, 2004), hetgeen impliceert dat er onderscheid gemaakt moet worden tussen wat willekeurig is en wat essentieel is voor het ontwerp (Kelly, 2004: *the contingent and the necessary*). Veel ontwikkelingsonderzoeken blijven, net als het eerder besproken onderzoek van Hestenes, in dit opzicht in gebreke doordat de verantwoording van het ontwerp veelal beperkt blijft tot algemene principes (Dede, 2004; Westbroek, 2005).

Om te kunnen beoordelen of het onderwijs in een concrete lessituatie vormgeeft aan de bedoelde aanpak is een beargumenteerde specificatie nodig van de functie, de beoogde opbrengst en het verloop van iedere episode. Deze specificatie kan de vorm krijgen van een scenario (Klaassen, 1995; Lijnse, 1995). Zo'n scenario is breder dan alleen een *hypothetical learning trajectory* (Simon, 1995) omdat het niet alleen het beoogde leerproces beschrijft maar ook het docenthandelen. In feite is dit scenario de didactische theorie in zijn meest concrete uitwerking: het geeft een beschrijving van het onderwijsleerproces zoals verwacht wordt dat het zal plaatsvinden, met een theoretische rechtvaardiging van waarom dat zo verwacht wordt (Lijnse, 1995). De praktijkevaluatie kan zich dan toespitsen op de in het scenario geëxpliciteerde verwachtingen en de houdbaarheid van de onderliggende theorie.

Het scenario zoals hier beschreven is in de eerste plaats een onderzoeksinstrument en moet onderscheiden worden van een docentenhandleiding: ten eerste zal een docentenhandleiding meer 'regie-aanwijzingen' voor de docent moeten bieden en ten tweede zal de rechtvaardiging van de verwachtingen beknopter moeten zijn om de handleiding hanteerbaar te houden (cf. Westra, 2006).

2.5.5 Generaliseerbaarheid, theoretische opbrengst en vervolg

Als het daadwerkelijke onderwijsverloop door niet-triviale oorzaken substantieel afwijkt van het scenario, dan geeft dit aanleiding tot heroverweging en bijstelling van de didactische theorie en daarmee tot "a greater understanding of a *learning ecology*" (Cobb, et al., 2003, p. 9). Op basis van de nieuwe inzichten kan een herzien onderwijsontwerp (incl. scenario en onderwijsmaterialen) ontwikkeld worden dat opnieuw in de klas wordt uitgetoetst. Als na één of meerdere testronden het scenario en de bijbehorende onderwijsuitvoering 'goed genoeg' zijn, dat wil zeggen dat gebleken is dat in normale omstandigheden het onderwijsleerproces grotendeels zal verlopen zoals gepland en verwacht, kan het scenario aanvaard worden als bruikbare – lokale – theorie. Op basis van deze lokale theorie is een beperkte

generalisatie mogelijk, bijvoorbeeld in de vorm van een didactische structuur. De geldigheid van deze generalisatie is echter niet gegarandeerd. Opnieuw in de woorden van Cobb: “a design theory explains why designs work and suggests how they may be adapted to new circumstances”.

Als het ontwerp een valide uitwerking gebleken is van de beoogde aanpak heeft het zin vervolgvragen te stellen naar de effectiviteit en de efficiëntie van de voorgestelde aanpak. Deze vragen vallen buiten het bestek van dit proefschrift. Om deze vragen te beantwoorden is effectonderzoek nodig met behulp van een valide meetinstrument, alsmede een onderzoekspopulatie van voldoende omvang. Door vergelijking van pre- en posttest kan getoetst worden in hoeverre de voorgestelde aanpak effectief is om de gestelde leerdoelen te bereiken. Als een onderwijsaanpak effectief is gebleken resteert nog steeds de vraag welke kenmerken van de aanpak cruciaal zijn voor het succes. Bovendien staat nog niet vast dat de ontwikkelde aanpak ook de meest efficiënte is. Zolang de doelen van het onderwijs gelijk blijven, kunnen dergelijke vragen beantwoord worden door middel van vergelijkend effectonderzoek.

3. Eerste onderzoeksrunde

Dit hoofdstuk beschrijft het ontwerp en de evaluatie van een onderwijsmodule die vorm moet geven aan een modelleringsproces zoals beschreven in hoofdstuk 2. In paragraaf 3.1 worden de doelen en randvoorwaarden voor het ontwerp gepresenteerd. In paragraaf 3.2 beschrijven we het ontwerp en verantwoorden we de gemaakte keuzes. Paragraaf 3.3 betreft de empirische evaluatie van het ontwerp. In paragraaf 3.4 concluderen we dat het ontwerp nog niet aan de beoogde doelen voldoet, maar wel aanleiding geeft tot aanscherping en bijstelling van de uitgangspunten. Ten slotte identificeren we vijf verbeterpunten voor uitwerking in een tweede ontwerprunde.

3.1 Doelen en randvoorwaarden voor het onderwijsontwerp

In hoofdstuk 2 zijn drie kenmerken geïdentificeerd waaraan het onderwijsproces moet voldoen om bij te dragen aan de beoogde inzichten en vaardigheden in modelleren, die we aanduiden met natuurwetenschappelijke modelontwikkeling, betekenisvol voor leerlingen en productieve constructieruimte. Het doel van het onderwijsontwerp is om hieraan een adequate invulling te geven.

Natuurwetenschappelijke modelontwikkeling

We hebben betoogd dat de eigen ervaring van leerlingen in het modelleren van complexe dynamische systemen essentieel is voor het verwerven van inzicht en vaardigheid in dat proces. In hoofdstuk 2 is een globale modelleringscompetentie geformuleerd om het modelleringsproces succesvol te kunnen doorlopen.

Om natuurwetenschappelijke modelontwikkeling in het onderwijs aan bod te laten komen, moeten in elk geval de volgende twee kenmerken vorm krijgen:

1. Modelontwikkeling als een doelgericht probleemoplosproces.
2. Het voorspellen van systeemgedragingen van een complex systeem op basis van een causaal mechanisme.

Voor het inzicht in complexe gedragingen is het belangrijk dat leerlingen het effect van positieve en negatieve terugkoppelingen leren kennen, in het bijzonder in situaties waarin deze er toe leiden dat het modelgedrag moeilijk te voorspellen is. Een ander relevant leerdoel is het leren gebruiken van de computer voor het modelleren van systeemgedrag; niet zozeer specifieke modelleringssoftware als wel het begrijpen van numerieke integratie voor het doorrekenen van dynamische situaties.

Betekenisvol voor leerlingen

Om het modelleringsproces als doelgericht te ervaren dient het voor de leerlingen betekenisvol te zijn. Het proces is voor leerlingen betekenisvol als:

- leerlingen inzicht hebben in het doel;

- leerlingen inzien hoe de te ondernemen activiteiten bijdragen aan het bereiken van het gestelde doel;
- vakinhoudelijke noties op basis waarvan keuzes en beslissingen genomen worden, stemmen overeen met leerlingideeën.

We verwachten dat deze inzichten herkenbaar zullen zijn in de inbreng van de leerlingen en zullen in de analyse van het lesverloop het ontwerp vooral op basis daarvan beoordelen.

Productieve constructieruimte

Ten slotte dienen leerlingen ruimte te krijgen om aan het modellerenproces bij te dragen. Dit vereist vrijheid om eigen keuzes te maken, maar keuzevrijheid is pas productief als leerlingen ook in staat zijn om eigen keuzes te maken. Dit zou moeten blijken uit het feit dat leerlingen verantwoordelijkheid nemen voor de consequenties van hun keuze. Daarom is productieve constructieruimte gedefinieerd als de situatie waarin

- een keuze, aanname, beslissing of evaluatie gemaakt wordt op basis van leerlingbijdragen;
- leerlingen hun bijdragen onderbouwen omdat de uitkomst consequenties heeft voor het vervolg.

Van het ontwerp moet beargumenteerd worden hoe de bovenstaande doelen gerealiseerd worden. Om leerlingen productieve constructieruimte te bieden moeten in het ontwerp niet alleen de verwachte bijdragen van de leerlingen maar ook de rol van de docent benoemd worden. Een van de terugkerende analysevragen voor het onderwijsontwerp zal zijn of de beoogde inbreng van de leerlingen ook daadwerkelijk productief is geworden.

Leerlingdoelgroep en onderwijsomvang

Twee belangrijke randvoorwaarden om in het ontwerp rekening mee te houden zijn de leerlingdoelgroep en de beschikbare onderwijstijd.

Voor het kiezen van een geschikte leerlingdoelgroep is het uitgangspunt om zoveel mogelijk aan te sluiten bij de normale programmering. Computermodelleren maakt alleen deel uit van het examenprogramma voor natuurkunde 1, 2. Een wiskundig concept als de afgeleide, belangrijk voor integratie, komt aan bod in de bovenbouw van het vwo. Het onderwijs wordt daarom ontwikkeld voor leerlingen met een NT-profiel in de vijfde klas van het vwo.

Een lessenreeks waarin leerlingen actief betrokken zijn bij het construeren van modellen en waarin ruimte is voor meerdere modelleercycli behoeft enige omvang. Om het ontwerp in de klas te implementeren moet het passen in een reguliere jaarplanning van de docent. Daarin is weinig ruimte te verwachten voor een extra onderwerp, maar het onderwijs kan (deels) vervangend zijn voor een reguliere lessenreeks over computermodelleren. Beoogd wordt dat het onderwijsontwerp ongeveer twaalf lessen van 50 minuten in beslag neemt.

3.2 Verantwoording van het onderwijsontwerp

Op basis van de hiervoor beschreven doelen en uitgangspunten hebben we een eerste onderwijsontwerp gemaakt. We hebben ervoor gekozen om binnen de beschikbare onderwijstijd één doorlopende onderwijsmodule te maken over één samenhangend onderwerp. Daardoor was het mogelijk om meerdere modelrevisies uit te voeren in één doorlopend modelleerproces. Bovendien zullen leerlingen veel sturing nodig hebben als ze gaan modelleren in een nieuw domein. Naarmate ze meer vertrouwd raken met de vakinhoud verwachten we meer gelegenheid om productieve constructieruimte te realiseren.

Bij het verder vormgeven van deze module is een groot aantal ontwerpkeuzes gemaakt. De belangrijkste keuzes worden hierna beschreven en verantwoord: een geschikte context, een nadere vakinhoudelijke invulling van de te behandelen modelleerproblemen, de opbouw van het lesmateriaal en de keuze voor een modelleertool. Vervolgens wordt het ontwerp in detail besproken, leidend tot de verwachtingen over het functioneren ervan. Daartoe is de module onderverdeeld in zes episodes (afgeronde eenheden in het ontwerp): het formuleren van een globale vraagstelling, vier modelleercycli en een afronding.

3.2.1 Klimaatmodelleren als context

Om iets te kunnen modelleren betreft de eerste keus voor het onderwijsontwerp een context. Om tot een valide ontwerp te komen moeten daarin in ieder geval de benoemde kenmerken van een natuurwetenschappelijk modelleerproces herkenbaar zijn. Het is van belang dat een nastrevenswaardig modelleerdoel geformuleerd kan worden; het onderwerp moet daarom voor leerlingen de moeite waard zijn. Ook is het belangrijk dat de vakinhoud aansluit bij het niveau van de leerlingen. De mate waarin het onderwerp aansluit bij het reguliere natuurkundecurriculum geeft een idee van geschikte vakinhoud. Hieronder wordt beargumenteerd dat de praktijk van het klimaatonderzoek mogelijk een geschikt onderwerp is voor de ontwikkeling van onderwijs.

Schets van “klimaatmodelleren” in de onderzoekspraktijk

Het klimaat in een gebied wordt gedefinieerd door het meerjarig gemiddelde en de spreiding van weersgrootheden, zoals temperatuur, neerslag en windsnelheid. Ieder van die grootheden kan sterk variëren van uur tot uur en van jaar tot jaar, maar de lange-termijn gemiddelden en de variatie zijn redelijk stabiel en kenmerkend voor het klimaat in een gegeven regio.

Om het toekomstige klimaat te voorspellen kunnen lijnen uit het verleden niet zonder meer doorgetrokken worden naar de toekomst. Elk van de klimaatvariabelen wordt beïnvloed door een groot aantal mechanismen die ook onderling kunnen wisselwerken, bijvoorbeeld doordat de temperatuur van invloed is op de wolkvorming en wolken op hun beurt de temperatuur beïnvloeden. Soortgelijke relaties zijn er met wind, regenval, ijsbedekking, CO₂, vegetatie, etc. Het modelleren van het klimaat in een specifieke regio vereist een tamelijk ingewikkeld

model, waarin onder andere rekening gehouden wordt met het klimaat in omliggende gebieden en met transportverschijnselen zoals de wind.

Het klimaatsysteem is dus complex, en niet alle mechanismen kunnen in een keer onderzocht worden. Het is dan ook niet verwonderlijk dat klimaatwetenschappers zich specialiseren om afgebakende mechanismen in kaart te brengen. Het bij elkaar brengen van deze specialistische kennis gebeurt bijvoorbeeld door het klimaatpanel van de Verenigde Naties, het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), dat op basis van de deelonderzoeken een beeld probeert te schetsen van de (toekomstige) ontwikkeling van het mondiale klimaat (IPCC, 1990, 2001).

Het betrouwbaar voorspellen van het klimaat stelt de wetenschappers voor problemen. Om aan een hanteerbaar probleem te werken moet een klimaatwetenschapper ervoor kiezen om eerst een model op hoofdlijnen te ontwikkelen en details later in te vullen voor zover dit van belang is. Een model dat de karakteristieke gedragingen van het mechanisme weergeeft, heet een toy model. Vele herzieningen zijn nodig om van een toy model te komen tot een model dat historisch en actueel systeemgedrag nauwkeurig beschrijft. Het uiteindelijke klimaat hangt af van een groot aantal processen en mechanismen, die echter niet allemaal in detail bekend zijn. Het is niet eens zeker of alle mechanismen die een rol spelen wel bekend zijn. Het causaal mechanisme dat (deelsystemen in) het klimaat beschrijft, is dan ook niet alleen geformuleerd met de ‘eerste beginselen’ die in een wetenschappelijke theorie gegeven zijn, maar ook met benaderingen en parametrisaties. Het is niet uit te sluiten dat het klimaatsysteem zich ontwikkelt op een manier die in de huidige modellen niet voorzien wordt. De modellen die hedendaagse klimaatwetenschappers gebruiken, zijn dan ook, duidelijker dan bijvoorbeeld hedendaagse atoommodellen, een benadering van de werkelijkheid.

Hoewel deelaspecten van het klimaat in het laboratorium kunnen worden nagebootst, is het niet mogelijk om een klimaatmodel in zijn geheel experimenteel te toetsen. De enige empirische gegevens waarmee modelvoorspellingen getoetst kunnen worden, zijn die van het verleden. Het verzamelen van betrouwbare meetgegevens om modellen te kunnen evalueren gebeurt pas relatief kort. Door vele databronnen te combineren proberen klimaatwetenschappers een zo gedetailleerd mogelijk beeld te krijgen van de historische klimaatontwikkelingen. Zowel de huidige als elke gerealiseerde toestand van het klimaat in het verleden is uniek. Daardoor blijft het problematisch om modelvoorspellingen voor de lange termijn betrouwbaar te toetsen. Toch menen klimaatwetenschappers dat belangrijke mechanismen ondertussen goed begrepen worden, omdat met de huidige modellen veel van de historische klimaatveranderingen goed verklaard kunnen worden.

Relevantie voor de leerlingen

Over klimaatontwikkelingen is een actueel maatschappelijk debat gaande. Onder andere door het verschijnen van de documentaire ‘An inconvenient truth’ van Al Gore is er ook in het onderwijs belangstelling voor dit onderwerp (bijvoorbeeld Shallcross & Harrison, 2008). Leerlingen hebben veel belangstelling voor

onderwerpen over natuur en milieu die nationaal of mondiaal relevant zijn, zoals het broeikaseffect en de stijgende zeespiegel (Van Aarle & Verkerk, 2000). Meer in het algemeen is gevonden dat leerlingen veel belangstelling hebben voor onderwerpen die gerelateerd zijn aan het universum en aan het leven op aarde, zoals ecologie (Baram-Tsabari, Sethi, Bry, & Yarden, 2006; Osborne & Collins, 2001). We verwachten dan ook dat leerlingen klimaatvoorspellingen als een relevant onderwerp ervaren waarover zij ook ideeën hebben (hetzij met betrekking tot de waarde van voorspellingen, hetzij met betrekking tot het modellerenproces, hetzij met betrekking tot de vakinhoudelijke concepten die belangrijk zijn).

Een gefundeerde mening over klimaatvoorspellingen en de impact ervan op de samenleving vergt kennis van het proces op basis waarvan de voorspellingen gemaakt worden. Dat biedt mogelijkheden om een nastrevenswaardig modelleerdoel te formuleren, om zo een betekenisvol proces in gang te zetten.

Curriculuminpassing

Het onderwerp 'klimaat' past goed in het natuurwetenschappelijk domein en is in eerste benadering ook typisch natuurkundig. Een eerste didactisch relevante inperking is om het voorspellen van het klimaat te beperken tot het voorspellen van de temperatuur, in het bijzonder de globaal-gemiddelde temperatuur op aarde.

Temperatuur is een belangrijke grootheid in het natuurkundecurriculum. Basisbegrippen die gebruikt worden om temperatuur te modelleren, zoals energie, vermogen, warmte en warmtecapaciteit, behoren tot de normale schoolstof. De temperatuur van een voorwerp wordt gegeven door de hoeveelheid latente warmte die het voorwerp bevat gedeeld door de warmtecapaciteit. Een constante temperatuur betekent dus dat er geen netto energietransport is. Om de huidige globaal-gemiddelde temperatuur op aarde te begrijpen, zijn allereerst de energiestromen van en naar het aardoppervlak van belang; warmtetransport over het oppervlak kan buiten beschouwing blijven.

Omdat het modelleren van de globaal-gemiddelde temperatuur op aarde goed aansluit bij het reguliere onderwijsprogramma – althans wat de basisbegrippen betreft – is het te verwachten dat leerlingen op basis van eerder geleerde vakkennis productief kunnen bijdragen aan het 'in model zetten' van de temperatuur zonder noodzakelijkerwijs eerst veel nieuwe natuurkundekennis te moeten leren.

3.2.2 Vakinhoudelijk overzicht

Temperatuur is zonder twijfel de bekendste klimaatgerelateerde grootheid. Omdat het een scalaire grootheid is, heeft ook de globaal-gemiddelde waarde ervan een eenduidige betekenis. Regionale verschillen worden in eerste benadering verwaarloosd, net als periodieke variaties zoals de 24-uurscyclus, de seizoenen en de Milankovitsch-cyclus. De aarde wordt voorgesteld als een oppervlak met alleen globaal-gemiddelde eigenschappen. De temperatuur op zo'n oppervlak is op te vatten als de gemiddelde temperatuur op aarde.

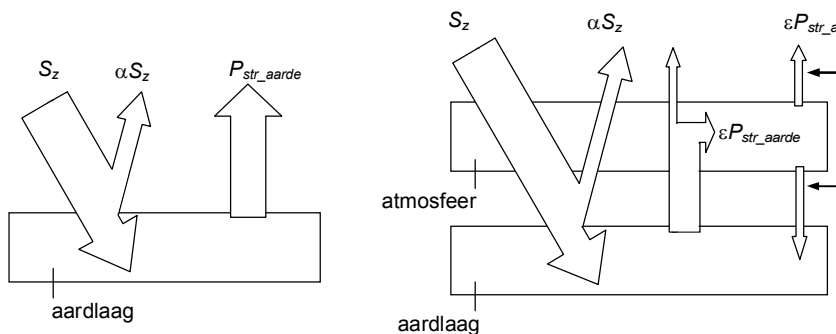
Een systematische verandering in één of meerdere grootheden die het klimaat bepalen impliceert een klimaatverandering. De huidige verandering van de globaal-gemiddelde temperatuur is (mede) het gevolg van de antropogene uitstoot van broeikasgassen. Hoewel de globaal-gemiddelde temperatuur beïnvloed wordt door de concentratie broeikasgassen is het verband niet lineair en zelfs niet één op één. Het extrapoleren van historische trends levert dus geen bruikbare voorspellingen op. Voor een betrouwbare voorspelling is het nodig om de mechanismen te beschrijven die de globaal-gemiddelde temperatuur bepalen.

Stralingevenwicht

Een eerste, zeer elementaire, eis is dat het model, gevoed met invoerparameters die de huidige situatie weergeven, een temperatuur moet voorspellen die overeenkomt met de huidige temperatuur. Als het model daartoe in staat is, kunnen we concluderen dat we de huidige temperatuur op aarde begrijpen. De volgende stap is dan het modelleren van temperatuurverandering. Ook daar zal het mogelijk blijken verifieerbare voorspellingen te doen, door niet de toekomstige veranderingen te voorspellen, maar door, op basis van historische data, veranderingen uit het verleden te ‘voorspellen’.

Allereerst dus een model voor de huidige globaal-gemiddelde temperatuur. De aarde warmt op als er een netto warmte-instroom is en koelt af als er een netto warmte-uitstroom is. De globaal-gemiddelde temperatuur is echter vrijwel constant, dus de in- en de uitstroom zijn in evenwicht. Er zijn meerdere warmtestromen, maar de grootste warmtestromen zijn de constante energietoevoer door de zon en een uitstraling die afhankelijk is van de temperatuur. Op een verder kale planeet legt deze combinatie van een vaste instraling en een temperatuurafhankelijke uitstraling de waarde van de evenwichtstemperatuur vast. Dit is het zogeheten 1-laagsmodel (zie Figuur 5, links). De zoninstraling S_z bedraagt, gemiddeld over het gehele aardoppervlak en over het gehele jaar, 341 W/m^2 . Een deel van die instraling wordt direct gereflecteerd, de rest wordt geabsorbeerd door het oppervlak. Het albedo α geeft weer welke fractie van de zoninstraling gereflecteerd wordt. Er circuleren verschillende waarden voor het globaal-gemiddelde albedo, allemaal rond $\alpha = 0.3$.

Figuur 5. Schematische weergave van het 1-laagsmodel (links) en 2-laagsmodel (rechts).



De uitstraling per vierkante meter aardoppervlak wordt gegeven door de wet van Stefan-Boltzmann ($P_{\text{str}} = \sigma T^4$). Het model is in stralingsevenwicht als het geabsorbeerde deel van de inkomende energiestroom even groot is als de geëmitteerde energie. Het model levert een evenwichtstemperatuur van slechts 255 K, zo'n 30 K onder de werkelijke waarde. Omdat het model uiteindelijk bedoeld is om klimaatverandering in de orde van enkele Kelvin te voorspellen, is dit een onacceptabele afwijking. De te lage temperatuur is niet te wijten aan fouten in de modelparameters: in dit model blijft zelfs bij een volledig zwart aardoppervlak ($\alpha = 0$), als de instraling dus volledig geabsorbeerd wordt, de berekende temperatuur steken op 277 K.

Het model moet daarom uitgebreid worden, en een voor de hand liggende kandidaat is de invloed van (de broeikasgassen in) de atmosfeer. De atmosfeer kan in eerste benadering beschouwd worden als een tweede laag die de zonnestraling en de warmtestraling van de aarde kan reflecteren, absorberen en doorlaten (Figuur 5, rechts). In goede benadering zal ook deze tweede laag in thermisch evenwicht zijn. Het aardoppervlak ontvangt een extra energie-instroom ten gevolge van warmtestraling door de atmosfeer. De atmosfeerlaag absorbeert warmtestraling afkomstig van de aarde. De absorptie- en emissiecoëfficiënt ε bepaalt de mate van absorptie en emissie van warmtestraling door de atmosfeer. De atmosfeerlaag straalt ook uit richting heelal. Zowel de absorptie van zonninstraling in de atmosfeerlaag als reflectie van atmosferische warmtestraling aan het aardoppervlak is klein en kan in eerste benadering verwaarloosd worden.

Als $\alpha = 0.3$ en $\varepsilon = 0.78$ is de evenwichtstemperatuur in dit 2-laagsmodel 287 K: de waarde voor de huidige globaal-gemiddelde temperatuur. Daarmee is aan de eerste toets voldaan. De volgende stap is dan het modelleren van een veranderende temperatuur.

Verandering in de CO₂-concentratie

Om de toekomstige temperatuur op aarde te voorspellen moet er rekening gehouden worden met veranderende modelparameters en met mechanismen in het klimaatsysteem die relevant zijn voor dergelijke veranderingen. Een bekende verandering is die in de CO₂-concentratie. Bij een variërende CO₂-concentratie verandert de absorptie- en emissiecoëfficiënt ε . In het geschetste 2-laagsmodel is een temperatuurverandering daarvan het resultaat. Een relatie tussen de CO₂-concentratie en ε is niet precies bekend, wel het verloop van de CO₂-concentratie en van de globaal-gemiddelde temperatuur sinds 1750 (het begin van de Industriële Revolutie, startpunt van een significante hoeveelheid menselijke CO₂-uitstoot). De CO₂-concentratie is sinds 1750 gestegen van 280 ppm naar 370 ppm. Op basis van dergelijke gegevens kan een relatie tussen de CO₂-concentratie en ε geparametriseerd worden die de historische temperatuurverandering goed weergeeft. Voor de toekomst moeten scenario's gemaakt worden van de verdere stijging van de CO₂-concentratie. Om zo'n toekomstscenario door te rekenen moet een verband gebaseerd op een fit van historische gegevens geëxtrapoleerd worden.

Veranderende omstandigheden kunnen een keten van reacties in gang zetten die de verandering versterken of tegenwerken. Dergelijke terugkoppelingen zijn belangrijk om rekening mee te houden bij het voorspellen van de temperatuur. Drie relevante (en voor het onderwijs haalbaar geachte) terugkoppelingen zijn de volgende.

Oplosbaarheid van CO₂ in de oceaan

CO₂ is oplosbaar in de oceaan. Een belangrijk deel van de uitgestoten CO₂ wordt opgenomen in het oceaanwater. Daardoor is de stijging van de CO₂-concentratie in de atmosfeer veel kleiner dan verwacht zou worden op basis van de netto uitstootgegevens. De uitwisseling van CO₂ met de atmosfeer wordt bepaald door het concentratieverschil in CO₂ tussen de atmosfeer en de oceaan. Omdat 99,5% van de CO₂ die de oceaan inkomt, wordt omgezet in HCO₃⁻ en CO₃²⁻, vormt de oceaan een groot reservoir van koolstof. Het concentratie-evenwicht is temperatuurafhankelijk: de oplosbaarheid van CO₂ neemt af als de temperatuur van het water toeneemt. Bij een stijgende temperatuur zal de oceaan dus minder CO₂ uit de atmosfeer opnemen, of zelfs CO₂ gaan uitstoten. Dit effect versterkt zichzelf: de temperatuurafhankelijke oplosbaarheid van CO₂ in de oceaan geeft een positieve terugkoppeling tussen de temperatuur en de absorptie- en emissiecoëfficiënt ϵ .

Sneeuwbedekking

De sneeuwbedekkingsgraad is het percentage van het aardoppervlak dat met sneeuw en ijs bedekt is. Deze oppervlakken hebben een hoog albedo. De sneeuwbedekkingsgraad neemt af als de temperatuur toeneemt. Dit effect versterkt zichzelf: de temperatuurafhankelijke sneeuwbedekkingsgraad geeft een positieve terugkoppeling tussen de temperatuur en het albedo α .

Wolkalbedo

Bijna de helft van het aardoppervlak is bedekt met wolken. Wolken hebben zowel een opwarmend effect doordat zij warmtestraling van de aarde absorberen als een afkoelend effect doordat zij zoninstraling reflecteren. Welk effect overheerst, hangt onder andere af van het woltype. De laaghangende stratocumulusbewolking die op onze breedtegraad veel voorkomt, is vooral koelend doordat deze het invallende zonlicht effectief tegenhoudt. De mate waarin wordt bepaald door de hoeveelheid water en de druppelgrootte. De druppelgrootte wordt bepaald door het aantal condensatiekernen. De temperatuur aan het aardoppervlak bepaalt de hoeveelheid water in de onderste luchtlag. Door de turbulentie in de onderste luchtlag is deze hoeveelheid overal in de laag gelijk. Op een zekere hoogte in de onderste luchtlag is de temperatuur zoveel lager dan aan de grond dat de waterdamp in de luchtlag condenseert tot een cumuluswolk. Als de temperatuur stijgt, neemt de hoeveelheid laaghangende bewolking toe. Dit mechanisme werkt verdere stijging dus tegen: een negatieve terugkoppeling.

3.2.3 Modellersoftware

Voor het bouwen van klimaatmodellen op de computer is geschikte software nodig. Voor het inleidende onderwijs zijn programmeertalen die in de onderzoekspraktijk gebruikt worden, zoals Fortran en C, te ingewikkeld. Er zijn verschillende tools beschikbaar om het bouwen van modellen eenvoudiger te maken doordat deze allerlei administratieve en programmeertechnische taken van de leerling overnemen. De keuze voor een bepaalde tool impliceert een keuze voor een zekere representatievorm om een systeem mee te beschrijven, en daarmee ook een bepaalde didactische aanpak. De belangrijkste keuzemogelijkheden bij het selecteren van een tool worden hieronder besproken, gebaseerd op een overzicht van Löhner (2005).

De meest fundamentele keuze die Löhner onderscheidt, is tussen ‘systems modeling tools’ en ‘emergence based modeling tools’. In de eerste worden variabelen gedefinieerd die het systeemgedrag beschrijven, zoals plaats, snelheid en versnelling of aantal radioactieve deeltjes en activiteit. In de tweede worden de interactiemogelijkheden vastgelegd voor de afzonderlijke objecten of eenheden waaruit het systeem is opgebouwd. Het gedrag van het systeem als geheel komt tevoorschijn (‘emergeert’) uit het samenspel van de afzonderlijke eenheden. Voorbeelden van de laatste zijn objectgebaseerde modelleertools (bijvoorbeeld StarLogo) en cellulaire automaten (Worldmaker, Stagecast). In tools voor systeemmodelleren zijn twee representatievormen te onderscheiden: tekstgebaseerde en grafische. In tekstgebaseerde tools worden alleen de wiskundige vergelijkingen die het systeemgedrag beschrijven ingevoerd (bijvoorbeeld DMS en Coach 5). In een grafische tool wordt op de eerste plaats de modelstructuur gevisualiseerd. In sommige grafische tools is dat voldoende om al kwalitatieve of semi-kwantitatieve uitkomsten te krijgen (IQON, ModelIt). Om dezelfde kwantitatieve resultaten te krijgen als met een tekstgeoriënteerde tool, is een kwantitatieve grafische omgeving nodig waarin uiteindelijk nog steeds alle relaties gedefinieerd worden (STELLA, Functional Blocks).

De nul-dimensionale klimaatmodellen waar het in deze module over gaat, beschrijven de relaties tussen continue variabelen in één punt. De gestelde vragen maken een kwantitatief antwoord noodzakelijk. Er is dus een kwantitatieve, variabelengebaseerde modelleertool nodig. Zowel in een tekstgeoriënteerde als een grafische tool worden alle relaties gespecificeerd, dus eventuele voor- en nadelen tussen beide tools zullen zich concentreren op de grafische weergave van de modelstructuur.

In de context van klimaatvoorspellen stemt de grafische representatie van systeemdynamische software goed overeen met de voorstelling van het klimaat als een systeem van energiestromen. Anders dan voor mechanica kan in deze specifieke context een programma als STELLA geschikt zijn om belangrijke processen in uit te drukken. Voorraadgrootheden en stroompijlen zijn goede hulpmiddelen om te spreken over de concepten uit het fysisch mechanisme dat aan de globaal-gemiddelde temperatuur ten grondslag ligt. Als de leerlingen een goed kwalitatief begrip hebben van een systeem, kan de softwarerepresentatie de leerlingen ondersteunen om het fysisch model ook te implementeren. Dit vergroot de

constructieruimte voor de leerlingen. Daarom is er in het onderwijsontwerp voor gekozen om te modelleren met systeemdynamische software. Het programma Powersim wordt gebruikt, dat nagenoeg identiek is aan STELLA maar gratis te gebruiken voor educatieve doeleinden.

3.2.4 Opbouw van het lesmateriaal

Het modellerenproces van de leerlingen krijgt vorm in zowel individuele bijdragen als in een gezamenlijk proces met de docent en medeleerlingen. Behalve de leerlingen en de docent bepaalt ook het lesmateriaal hoe het modellerenproces er uit zal zien. In deze paragraaf worden de keuzes toegelicht die de opbouw en vormgeving van het materiaal sterk hebben bepaald.

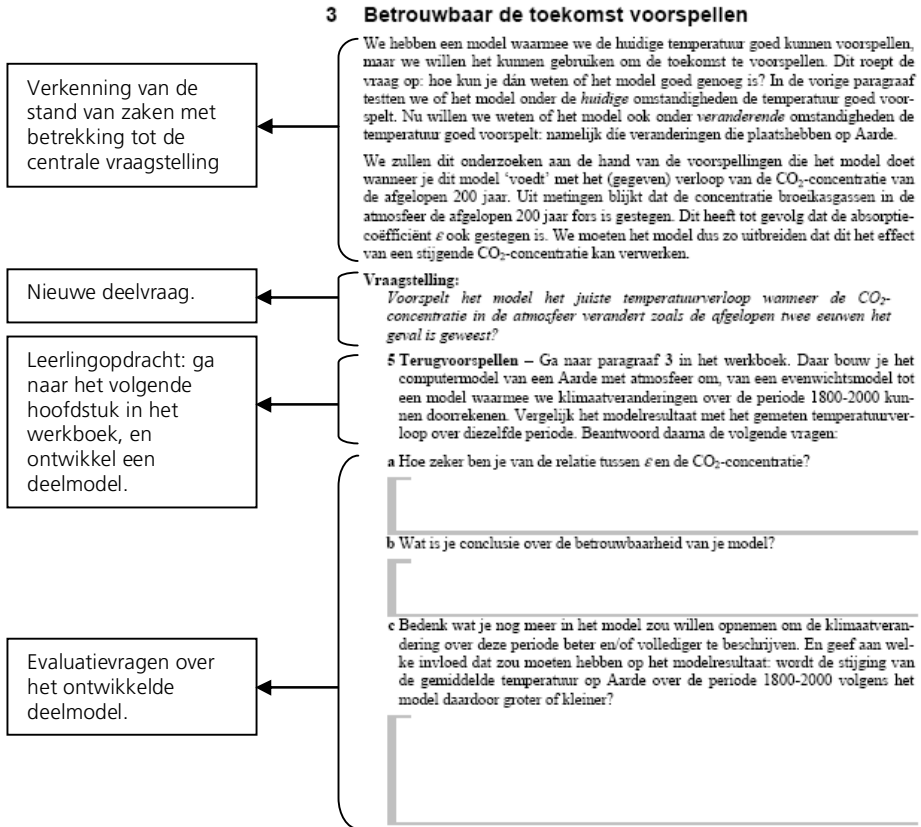
Opbouw en indeling van het modellerenproces in het lesmateriaal: één module, meerdere cycli

Het doel van het onderwijstraject is dat de leerlingen ervaring opdoen met activiteiten en afwegingen zoals deze ook in een authentiek modellerenproces plaatsvinden. Dat betekent dat leerlingen, gestuurd door een overkoepelende vraagstelling, inperkingen moeten maken, hun model moeten evalueren en hun model moeten bijstellen om vervolgens te zien of dit tot verbetering leidt. Om dit proces vorm te geven zijn meerdere modellerencycli nodig. De leerlingen werken daarom aan één onderwerp (het modelleren van de temperatuur) en niet aan verschillende thema's.

Behalve dat het doorlopen van meerdere cycli een getrouwe afspiegeling is van de natuurwetenschappelijke praktijk is hier ook een didactische reden voor. De leerlingen worden stap voor stap steeds verder ingevoerd in de materie, zodat de modellen ook qua complexiteit kunnen toenemen. Bovendien oefenen leerlingen zo vergelijkbare processtappen die in elke cyclus aan bod komen.

De focus van het modellerenproces – het oplossen van een globaal probleem – en het doelgerichte karakter van de modelontwikkeling – de bijdrage van elk model aan de oplossing – beogen we voor leerlingen te benadrukken in de indeling van het lesmateriaal. De tekst en opgaven die de rode draad vormen (de overkoepelende vraagstelling en de deelvragen die daaruit volgen) staan in het lesmateriaal in een eigen sectie, waarnaar verwezen wordt als de hoofdtekst. De modelontwikkeling gebeurt in aparte hoofdstukken in het werkboek (een hoofdstuk per model). Als een model is gebouwd en getest worden de evaluatievragen beantwoord in de hoofdtekst, waar eveneens de volgende deelvraag gesteld wordt. Om deze te beantwoorden gaan de leerlingen naar een volgend hoofdstuk in het werkboek (Figuur 6).

In elke cyclus zijn globale processtappen te identificeren die ook in andere cycli terugkomen. Uit de curriculumstudies in hoofdstuk 2 bleek dat veel ontwerpers grote waarde hechten aan het expliciteren van het modellerenproces. Ze verwijzen in hun onderwijs naar fasen in dit proces om structuur te bieden aan de leerlingactiviteiten.



Figuur 6. Bladzijde-overzicht uit de hoofdttekst van het lesmateriaal.

Er zijn echter weinig aanwijzingen dat deze structuur de leerlingen helpt inzien wat het doel van de te doorlopen fase is. In ons onderwijsontwerp wordt daarom niet zozeer de vaste fasering benadrukt, maar vooral de inhoudelijke reden voor elke activiteit. Niettemin kan een vaste fasering van elke cyclus de leerlingen wel zicht geven op de opbouw van de cyclus. Daarom worden, in elk hoofdstuk waarin een model ontwikkeld wordt, steeds dezelfde drie globale processtappen benadrukt in de kantlijn van het werkboek: 'ontwerpen', 'bouwen' en 'testen'. De terminologie is toegespitst op de constructie en het gebruik van een computermodel (in elke cyclus wordt er één gebouwd), omdat dit voor leerlingen de meest herkenbare verschijningsvorm van het model is. Een 'fysisch model' en een 'wiskundig model' worden voor de leerlingen niet apart benoemd. De probleemverkenning en de modevaluatie zijn niet weergegeven in het werkboek omdat deze besproken worden in de hoofdttekst.

Gebruik van informatie en opgaven: op 'safe' en functioneel

Een dilemma voor het ontwerpen van het onderwijsmateriaal is waar de verantwoordelijkheid ligt om de benodigde informatie te identificeren en te benoemen: bij de docent of bij het lesmateriaal. We hebben er naar gestreefd om het lesmateriaal zo te schrijven dat het modelleerproces voor een leerling in principe navolgbaar is zonder afhankelijk te zijn van het klassenproces. Daarom staan in de tekst de benodigde afwegingen en keuzes geëxpliciteerd op basis waarvan het modelleerproces zich ontplooft. Ook worden daarin de gegevens gepresenteerd die nodig zijn voor daarop volgende modelleeropdrachten. Daarin wijkt het niet af van regulier onderwijsmateriaal.

De belangrijkste reden om op deze 'behoudende' wijze te schrijven is om niet helemaal afhankelijk te zijn van het welslagen van het beoogde verloop in de klas. Het ontwerpen van de rol van de docent en het inschatten van de mogelijke interacties met de leerlingen resulteert in een verwacht lesverloop, maar onvoorziene problemen zoals inschattingfouten in het ontwerp kunnen makkelijk leiden tot een afwijkende uitvoering. Door het modelleerproces in het lesmateriaal in z'n geheel uit te werken, hebben de docent en de leerlingen altijd een back-up van de gewenste (c.q. benodigde) opbrengsten voorhanden. Het is echter goed mogelijk dat een docent in staat is om in een gezamenlijk proces met de leerlingen sommige aspecten van het modelleerproces te expliciteren die nu in het lesmateriaal gegeven zijn in de tekst. Het beschikbaar stellen van de benodigde informatie in de leerlingtekst heeft bovendien als nadeel dat de beoogde uitkomsten van een klassenproces al in het materiaal te vinden is, ook als het de opzet is om de eigen ideeën van leerlingen te exploreren.

Het lesmateriaal verschilt van regulier onderwijsmateriaal in dit opzicht dat de leerlingtekst één geheel vormt met de opgaven: de opgaven zijn geïntegreerd in de lopende tekst, zodat de antwoorden op de opgaven samen met de tekst een doorlopend verhaal vormen. Elke opgave vervult dus een functie in de opbouw van het modelleerproces, overeenkomstig de eis dat de modelleertaken doelgericht moeten zijn. Daarom zijn er ook geen aparte oefenopdrachten.

Gebruik van Powersim: 'just in time'

De modelleersoftware Powersim is nieuw voor de leerlingen, en zij moeten dus de gelegenheid krijgen om dit programma te leren kennen. We hebben er voor gekozen om dit niet in een aparte module te doen, maar te integreren in de ontwikkeling van de klimaatmodellen. Het woog voor ons namelijk zwaarder dat de leerlingen moesten inzien waarom zij een computerprogramma nodig hadden dan dat zij dit programma uitvoerig beheersen. In het onderwijsontwerp hebben we daarom geprobeerd de leerlingen een motief te geven om Powersim te gebruiken, en hebben we hen op dat moment voorzien van de informatie die zij nodig hadden om een computermodel te maken. Dit vergroot echter wel de belasting voor de leerlingen: zij leren dus zowel nieuwe vakinhoud als een nieuwe tool.

3.2.5 Eerste episode: introductie van de globale vraagstelling

In het onderwijsontwerp zijn zes eenheden (episodes) onderscheiden. De functie van de eerste episode is om met de leerlingen een motiverend en richtinggevend doel vast te stellen voor de hele lessenserie en om dit globale doel vervolgens in te perken tot een concrete doelstelling voor de eerste modelleercyclus.

Beoogd lesverloop

Allereerst moet het globale *leerdoel* voor de hele lessenserie worden vastgesteld, namelijk: door zelf te modelleren inzicht krijgen in de werking en de betrouwbaarheid van klimaatmodellen en de werkwijze van klimaatwetenschappers. We verwachten dat de leerlingen bekend zijn met allerlei klimaatdiscussies en met tegenstrijdige klimaatvoorspellingen, maar dat ze nauwelijks ideeën hebben over de factoren die van invloed zijn op de betrouwbaarheid van zulke voorspellingen en de manier waarop deze tot stand komen. Om dit kennisgat te thematiseren opent de les met een journaalfragment over een klimaatvoorspelling. In het fragment wordt ingezoomd op een supercomputer die maanden heeft gerekend om uit te vinden of het klimaat in Nederland zal veranderen. De *voice-over* zegt vervolgens: “...en het antwoord dat de computer gaf, is ‘ja’”. Hierna wordt het fragment afgebroken. We verwachten dat leerlingen naar aanleiding van dit fragment zullen opmerken dat ze niet weten (1) op welke gegevens de voorspelling gebaseerd is; (2) hoe de computer met die gegevens rekt; en (3) hoe betrouwbaar de gevonden uitkomst is. We verwachten dat de leerlingen, als ze zich bewust worden van dit kennisgat, het relevant en boeiend zullen vinden hier meer over te weten. De docent kondigt vervolgens aan dat de leerlingen in deze module zelf elementaire klimaatmodellen gaan ontwikkelen om meer inzicht te krijgen in de werking en de betrouwbaarheid van zulke modellen.

De ambitie voor het ‘zelf modelleren’ moet tot haalbare proporties worden teruggebracht. Het beoogde globale *modelleerdoel* voor de gehele lessenserie is om de globaal-gemiddelde temperatuur op aarde in 2200 te voorspellen. De docent legt uit dat de vraagstelling moet worden ingeperkt, en waarom het voorspellen van de globaal-gemiddelde temperatuur over 200 jaar een geschikte inperking is.

Om richting te geven aan de eerste stappen in dit modelleerproces moet worden vastgesteld dat het nodig is het mechanisme achter de temperatuurhuishouding van de aarde te begrijpen en dat het daartoe nuttig lijkt eerst de huidige globaal-gemiddelde temperatuur te modelleren. Tenslotte moet worden vastgesteld dat de temperatuurhuishouding van de aarde vooral gedreven wordt door warmte-instraling vanuit de zon en dat die factor dus als eerste gemodelleerd moet worden. Om dit in de klas te realiseren, verzamelt de docent in een woordweb ideeën van leerlingen over factoren die mogelijk relevant zijn voor het voorspellen van de temperatuur. We verwachten dat zij een groot aantal factoren kunnen benoemen, maar dat ze geen scherp onderscheid zullen maken tussen oorzaken en gevolgen en geen precieze ideeën hebben over werkingsmechanismen. Gegeven een groot aantal door de leerlingen genoemde relevante invloeden werpt de docent dan de vraag op hoe

het modelleren van de temperatuur het beste aangepakt kan worden. We verwachten dat leerlingen zelf voorstellen om de bijdrage van de belangrijkste factor het eerst te modelleren, en dat ze de zon als belangrijkste factor identificeren. De docent stelt op basis daarvan de ingeperkte vraagstelling voor de eerste cyclus vast: “kan een model waarin alleen rekening gehouden wordt met de bijdrage van de zon de huidige temperatuur op aarde verklaren?”

Natuurwetenschappelijke modelontwikkeling

In deze episode is er sprake van een probleemverkenning, want er wordt vanuit een slechtgedefinieerd probleem toegewerkt naar een goed gedefinieerd en hanteerbaar deelprobleem met een empirisch toetsbare uitkomst. Het modellerenproces is doelgericht, want op basis van het gestelde doel wordt beslist welke invloeden in het model beschreven moeten worden en welke in eerste instantie verwaarloosd mogen worden. Ook wordt er een eerste cyclus gepland waarin een causaal mechanisme geformuleerd moet worden om de huidige temperatuur te kunnen verklaren.

Betekenisvol voor leerlingen

De probleemverkenning verloopt betekenisvol voor de leerlingen als zij inzien dat:

- het voorspellen van de toekomstige temperatuur op aarde een nastrevenswaardig doel is;
- het beperken tot het voorspellen van de globaal-gemiddelde temperatuur en een afgebakende voorspelhorizon nodig is om een onderzoeksvraag te formuleren die voor hen mogelijk haalbaar is;
- het nodig is om eerst te begrijpen hoe de huidige temperatuur tot stand komt alvorens veranderingen te kunnen modelleren;
- daartoe eerst de belangrijkste invloeden in model gezet moeten worden;
- de zon de belangrijkste warmtebron is.

In het beoogde lesverloop wordt verwacht dat deze inzichten herkenbaar zullen zijn in de inbreng van de leerlingen.

Productieve constructieruimte

De beoogde opbrengst voor deze episode staat vast. Er is geen vrijheid voor leerlingen om daarin eigen keuzes te maken en het is niet te verwachten dat leerlingen zelfstandig de beoogde vraagstelling kunnen opwerpen. De episode is daarom sterk docentgestuurd.

Op verschillende punten in de episode worden wel leerlingideeën geïnventariseerd in de verwachting dat leerlingen met bruikbare ideeën komen. We verwachten dat leerlingen zelf zullen benoemen dat het verstandig is om de grootste invloed het eerst te modelleren en dat de zon de belangrijkste warmtebron is. De leerlingen zouden productieve constructieruimte moeten ervaren als de docent hen de ruimte geeft om met ideeën te komen, deze serieus op hun merites onderzoekt en bij het te volgen proces aansluit bij de voorstellen van leerlingen.

3.2.6 Tweede episode: het 1-laagsmodel

Voor de hoofdvraag van de module is de eerste te beantwoorden deelvraag hoe de huidige temperatuur op aarde tot stand komt. In deze episode wordt het 1-laagsmodel ontwikkeld als eerste poging om deze vraag te beantwoorden. Evaluatie van het model moet uitwijzen dat dit model geen toereikende beschrijving biedt van het mechanisme achter de huidige temperatuur.

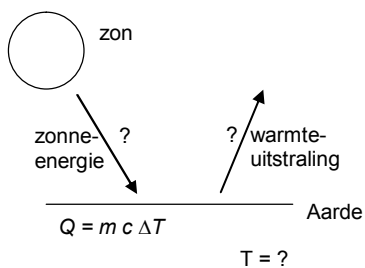
Beoogd lesverloop

Het fysisch mechanisme in het te ontwikkelen 1-laagsmodel veronderstelt de volgende noties:

- de temperatuur op aarde hangt samen met de hoeveelheid energie in de aarde;
- de zonne-instraling is de belangrijkste warmtebron;
- de aarde verliest energie door warmte-uitstraling;
- bij een gegeven instraling zal altijd een evenwichtstemperatuur ontstaan.

De voorstelling van zaken is in sterke mate een vereenvoudiging van de realiteit. Er wordt een globaal-gemiddeld planeetoppervlak beschouwd en de atmosfeer blijft achterwege.

Te verwachten is dat leerlingen bruikbare ideeën hebben voor de ontwikkeling van het kwalitatief model. Daarom verzamelt de docent deze in een klassengesprek, zodat de leerlingen op elkaar kunnen reageren en elkaar kunnen aanvullen. De benodigde fysische begrippen zijn in principe bekend uit eerdere natuurkundelessen, met uitzondering van de wet van Stefan-Boltzmann voor het uitgestraalde vermogen van een zwarte straler; deze is daarom gegeven.



Figuur 7. Schets van een eerste kwalitatief fysisch model.

De docent construeert, uitgaande van de leerlingreacties, een modeldiagram van het fysisch model zoals in Figuur 7. Het diagram kan richting geven aan het klassengesprek, in het bijzonder aan de kwalitatieve analyse van het modelgedrag en aan het kwantificeren van het model. De kwalitatieve analyse van het modelgedrag moet opleveren dat (1) de hoeveelheid inwendige energie, en dus ook de temperatuur, constant toe- of afneemt bij een (netto) constante in- resp. uitstroom; (2) de hoeveelheid energie constant blijft als in-

en uitstroom even groot zijn; (3) de hoeveelheid energie in de aarde naar een evenwichtswaarde gaat als de uitstroom evenredig is met de temperatuur.

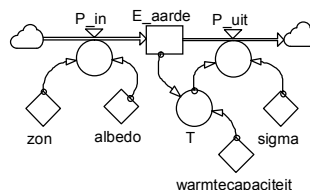
Het verklaren van de temperatuur is in het lesmateriaal geëxpliciteerd als het voorspellen van de juiste waarde en plausibel gedrag: een constante temperatuur van 14 °C, die stabiel is onder ten minste kleine verstoringen. Om sturing te geven aan het kwantificeren, identificeren de leerlingen zoveel mogelijk zelf alle te bepalen waarden en relaties; de docent markeert deze in het diagram met een vraagteken. In

het lesmateriaal kwantificeren leerlingen aan de hand van rekenopdrachten de zo geïdentificeerde gemiddelde zonninstraling, reflectie, warmtecapaciteit en warmte-uitstraling. We verwachten dat leerlingen voldoende kennis hebben van de samenstelling van het aardoppervlak om aannames te maken voor het schatten van een albedowaarde en de warmtecapaciteit. Als het model volledig gespecificeerd is, leidt de docent een klassengesprek waarin (1) geconcludeerd wordt dat het model bij de huidige waarde voor de temperatuur zal afkoelen, en (2) het doorrekenen van veranderingen in het model gethematiseerd wordt.

Het doorrekenen van veranderingen wordt gethematiseerd en vervolgens geproblematiseerd om de leerlingen een reden te geven het model met de computer door te rekenen. Dit heeft een didactische reden: de leerlingen zo vroeg mogelijk vertrouwd maken met Powersim, zodat ze verder in de lessenserie meer en meer zelfstandig met het programma kunnen werken. Voor het evalueren van het 1-laagsmodel is de computer echter niet nodig. De evenwichtstemperatuur kan analytisch bepaald worden door de in- en uitstroom aan elkaar gelijk te stellen. Om de leerlingen niettemin een inhoudelijk motief te geven wordt in het lesmateriaal gevraagd om de energie-inhoud in het model te kwantificeren bij de huidige globaal-gemiddelde temperatuur. Daardoor is de uitstraling groter dan de instraling, zodat het model zal afkoelen. In plaats van een evenwichtsvergelijking op te stellen gebruiken de leerlingen in eerste instantie een lineaire relatie om de verandering van de energie in de aardlaag te berekenen als functie van de tijd: $E(t) = E_{begin} + (P_{in} - P_{uit}) \cdot t$. Deze relatie wordt in het lesmateriaal aangereikt als een ‘intuïtief’ lineair verband. Door het resultaat van deze relatie te vergelijken met het gewenste modelgedrag (een van de testcriteria die de leerlingen formuleren in het lesmateriaal) kunnen de leerlingen concluderen dat de lineaire relatie het gewenste modelgedrag niet correct beschrijft en dat in een goede berekening de energie-uitstroom moet veranderen bij afname van de energievoorraad. Leerlingen rekenen in het lesmateriaal handmatig de verandering van de temperatuur een aantal tijdstappen door, zodat ze het rekenalgoritme leren kennen. Bovendien wordt dan duidelijk dat het handmatig doorrekenen van het hele afkoelproces ondoenlijk is.

Leerlingen construeren een Powersimmodel aan de hand van een handelingsvoorschrift in het lesmateriaal, zodat het 1-laagsmodel met de computer doorgerekend kan worden. Figuur 8 toont het beoogde modeldiagram. Gegeven het diagram van de fysische voorstelling van het model in termen van energiestromen (Figuur 7) is te verwachten dat de identificatie van de modelelementen met de grafische representatie op basis van stroompijlen (Figuur 8) vanzelfsprekend is. Bovendien verwachten we dat de leerlingen inzien hoe het computermodel rekt omdat al eerder is geëxpliciteerd hoe het proces stapsgewijs doorgerekend wordt.

De modelresultaten worden klassikaal geëvalueerd, zodat de docent kan waarborgen dat



Figuur 8. Powersimdiagram van het 1-laagsmodel.

de conclusies over het eerste model en de richting voor het vervolg voor alle leerlingen duidelijk zijn. Het model gedraagt zich zoals gewenst, maar voorspelt een te lage temperatuur. Er is dus een nieuwe cyclus nodig om het model te verbeteren. We verwachten dat leerlingen de atmosfeer benoemen als relevante modeluitbreiding.

Natuurwetenschappelijke modelontwikkeling

In deze cyclus komt natuurwetenschappelijke modelontwikkeling als volgt aan bod:

- er wordt een eerste causaal mechanisme voor de temperatuur geformuleerd in termen van energiestromen en absorptie van energie;
- om het model te specificeren en te implementeren worden schattingen gemaakt van het albedo en de warmtecapaciteit, worden de vergelijkingen voor grootteverandering van de energiestromen opgesteld en worden de modelvergelijkingen en –waarden in een Powersimdiagram gedefinieerd;
- het computermodel wordt onderzocht door het temperatuurverloop bij verschillende beginwaarden in een grafiek of tabel uit te zetten en de resultaten te vergelijken met de gespecificeerde verwachtingen;
- de modelevaluatie leidt tot het identificeren van de noodzaak voor modelrevisie.

Betekenisvol voor leerlingen

De ontwikkeling van het 1-laagsmodel is betekenisvol als de leerlingen inzien dat

- het begrijpen van het causaal mechanisme nodig is om de toekomstige temperatuurontwikkeling betrouwbaar te kunnen voorspellen.

Het construeren van een computermodel is voor de leerlingen betekenisvol als zij inzien dat

- het gedrag van dit model in principe algoritmisch doorgerekend kan worden, gegeven een begintoestand en de formules voor het geabsorbeerd en geëmitteerd vermogen;
- het handmatig stapsgewijs doorrekenen van het afkoelen of opwarmen een ondoenlijke taak is, maar het model met de computer wel numeriek geïntegreerd kan worden.

We verwachten dat de genoemde inzichten herkenbaar zullen zijn in de leerlingeninbreng.

Productieve constructieruimte

We verwachten dat de leerlingen productieve constructieruimte ervaren als hun ideeën serieus worden genomen en het model gebaseerd is op hun voorstellen. Het modeldiagram kan helpen om die constructieruimte te realiseren. Leerlingen zouden in staat moeten zijn om bij de modelevaluatie te concluderen dat er een noodzaak is voor modelrevisie maar dat het beschreven mechanisme geldig blijft.

Als het fysisch mechanisme eenmaal vastligt, is er voor de leerlingen ruimte om eigen schattingen te maken voor de waarden van het albedo en de warmtecapaciteit.

Daartoe doen zij aannames over de gemiddelde samenstelling van het aardoppervlak. Hoewel onzekerheid in deze schattingen slechts beperkt effect heeft op de eindevaluatie, verwachten we dat leerlingen de vrijheid als productief ervaren omdat zij bij de evaluatie van het 1-laagsmodel verantwoordelijkheid krijgen voor de gemaakte keuzes.

Het construeren van een computermodel is noodzakelijkerwijs sterk geleid door het lesmateriaal omdat de leerlingen het programma Powersim nog niet kennen.

3.2.7 Derde episode: het 2-laagsmodel

Om de huidige temperatuur te kunnen verklaren is een tweede modelleercyclus nodig waarin het 1-laagsmodel uitgebreid wordt met een tweede laag: de atmosfeer.

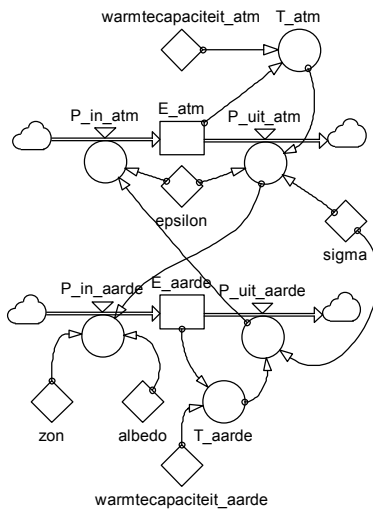
Beoogd lesverloop

Het te ontwikkelen 2-laagsmodel veronderstelt de volgende noties over de werking van de atmosfeer:

- de energiestromen uit het 1-laagsmodel passeren mogelijk niet ongehinderd de atmosfeer, maar kunnen (deels) tegengehouden worden door reflectie en absorptie;
- aan de atmosfeer wordt een energie-inhoud toegekend analoog aan de aardlaag in het 1-laagsmodel;
- de atmosfeer verliest, net als de aarde, warmte door uitstraling (zowel richting de aarde als richting het heelal);
- het aardoppervlak krijgt een hogere temperatuur door een grotere netto energie-instroom.

De atmosfeerlaag heeft globaal-gemiddelde karakteristieken voor reflectie, transmissie, absorptie en emissie van straling. Verwaarloosd worden de absorptie van zonne-energie door de atmosfeer en reflectie van aardse warmte-uitstraling.

We verwachten dat leerlingen na de ontwikkeling van het 1-laagsmodel in staat zijn om de atmosfeer op analoge wijze te beschrijven. Daarom is in het lesmateriaal een modeldiagram zoals in Figuur 5 gegeven. Op basis van het diagram is daarbij geëxpliciteerd welke relaties en parameterwaarden gespecificeerd moeten worden. De leerlingen bepalen deze aan de hand van opgaven in het lesmateriaal. We verwachten dat zij hierbij minder ondersteuning nodig hebben dan bij het ontwerpen van het eerste model. Er zijn daarom minder stappen voorgeschreven en de leerlingen bepalen nu zelf de benodigde aannames voor het schatten van de warmtecapaciteit van de atmosfeer. De absorptie- en emissiecoëfficiënt voor de atmosfeer als geheel is gegeven, omdat er geen gegevens bekend waren waarmee leerlingen deze zelf konden bepalen. De leerlingen ontwerpen, analoog aan het 1-laags Powersimmodel, zelf een modeldiagram voor de atmosfeerlaag en de verbindingen met de eerste laag (zie Figuur 9 voor een beoogd modeldiagram). In een plenaire bespreking reageren leerlingen op elkaars ideeën, zodat de docent



Figuur 9. Powersimdiagram van het 2-laagsmodel.

ervoor kan zorgen dat alle benodigde inzichten benoemd worden voor het tekenen van een correct Powersimdiagram.

Leerlingen bouwen in koppels het Powersimmodel van hun ontwerp en rekenen dit door. Hiertoe moet aan de energievoorraad in de atmosfeer een startwaarde toegekend worden. We verwachten dat de leerlingen op basis van de bevindingen met het 1-laagsmodel inzien dat een willekeurige startwaarde voldoet, omdat de gezochte eindtemperatuur niet afhangt van de beginsituatie. Verder moet een waarde geschat worden voor de warmtecapaciteit van de atmosfeer. We verwachten dat leerlingen op basis van de schatervaring uit de eerste ronde in staat zijn om zelf de benodigde aannames te identificeren en te maken.

Het 2-laagsmodel is goed genoeg voor het gestelde doel: de waargenomen temperatuur valt ruimschoots binnen de onzekerheidsmarges die de geschatte albedowaarde introduceert. Hoewel het model dus goed voldoet aan de testcriteria die in de eerste cyclus zijn vastgesteld, moet voor een toekomstvoorspelling het model ook de temperatuur kunnen voorspellen als deze niet in evenwicht is. De modelresultaten worden klassikaal geëvalueerd, zodat de docent kan waarborgen dat de conclusies over het model en de richting voor het vervolg voor alle leerlingen duidelijk zijn.

Natuurwetenschappelijke modelontwikkeling

Natuurwetenschappelijke modelontwikkeling komt in deze cyclus als volgt aan bod:

- er is sprake van een voortgezette probleemverkenning als eerst wordt vastgesteld dat de vereenvoudigingen in het eerste model te grof zijn geweest en er vervolgens voor wordt gekozen om het model uit te breiden met de atmosfeer, die op vergelijkbare wijze wordt voorgesteld als de aardlaag in het 1-laagsmodel. In deze episode is dus sprake van een doelgerichte uitbreiding van het mechanisme.
- om het model te specificeren en te implementeren wordt een schatting gemaakt van de warmtecapaciteit, worden de vergelijkingen voor grootteverandering van de nieuwe energiestromen opgesteld en worden de modelvergelijkingen en –waarden in een Powersimdiagram gedefinieerd;
- het computermodel wordt onderzocht door het temperatuurverloop bij verschillende beginwaarden te plotten of in een tabel uit te zetten en de resultaten te vergelijken met de gespecificeerde verwachtingen;

- de modevaluatie leidt tot de conclusie dat de eerste deelvraag afdoende is beantwoord. In het licht van de globale vraagstelling is het niet relevant om het basismechanisme hierna nog verder te verfijnen, ondanks dat het model nog evidente versimpelingen kent. In een volgende cyclus kan dus gekeken worden naar invloeden die maken dat de temperatuur in het model verandert.

Betekenisvol voor leerlingen

Als de evaluatie van het 1-laagsmodel verloopt zoals beoogd, hebben de leerlingen bij aanvang van de tweede cyclus inzicht in het doel van de modeluitbreiding.

De ontwikkeling van het 2-laagsmodel is voor de leerlingen betekenisvol als zij inzien dat

- het fysisch mechanisme uit de eerste cyclus bruikbaar is voor het beschrijven van de atmosfeer;
- de werking van de atmosfeer leidt tot een grotere energie-instroom aan het aardoppervlak.

Productieve constructieruimte

De fysische beschrijving van de atmosfeer lijkt sterk op die van de aardlaag in het eerste model. De kennis van de warmteprocessen in het 1-laagsmodel en de inmiddels opgedane ervaring met Powersim die is opgedaan zijn voldoende om de werking van atmosfeer te modelleren. We verwachten daarom dat leerlingen zelfstandig een Powersimmodel kunnen ontwerpen en bouwen. Ook verwachten we dat leerlingen op basis van hun ervaringen met het specificeren van het 1-laagsmodel zelfstandig een eigen waarde voor de warmtecapaciteit van de atmosfeer kunnen schatten en ook zelf een geschikte startwaarde voor de energie-inhoud van de atmosfeerlaag kunnen bepalen. Om het beoogde zelfstandig werken mogelijk te maken, is het nodig dat de docent hen de ruimte laat om hun eigen modelconstructies te ontwerpen en uit te testen. Voor inhoudelijke vragen verwijst de docent hen in eerste instantie terug naar de analoge situatie van het 1-laagsmodel.

We verwachten dat leerlingen bij de modevaluatie kunnen concluderen dat

- het 2-laagsmodel de huidige temperatuur op aarde goed genoeg verklaart;
- in een goed model rekening wordt gehouden met veranderende omstandigheden om de globale vraagstelling te kunnen beantwoorden.

De docent kan eraan bijdragen dat de leerlingen mede het modelleerproces sturen door in een klassengesprek de leerlingen de gelegenheid te geven deze inzichten te expliciteren.

3.2.8 Vierde episode: toekomstvoorspellingen op basis van scenario's

Het beantwoorden van de hoofdvraag van de module is aanleiding tot een nadere probleemverkenning. Nu het 2-laagsmodel een evenwichtstemperatuur voorspelt die goed overeenkomt met de huidige temperatuur wordt het volgende doel om de temperatuur te kunnen voorspellen onder veranderende omstandigheden. Dit

globale probleem wordt ingeperkt tot de preciezere vraagstelling wat het effect van een veranderende CO_2 -concentratie is op de temperatuur. In deze vierde episode wordt een model ontwikkeld waarin verandering van de temperatuur afhankelijk is van verandering in de CO_2 -concentratie.

Beoogd lesverloop

Volgend op de evaluatie van het 2-laagsmodel voeren de leerlingen en de docent een klassengesprek over het maken van een toekomstvoorspelling. De docent verzamelt oorzaken die de leerlingen kunnen noemen voor het veranderen van de temperatuur op aarde. Op grond van de huidige maatschappelijke aandacht voor CO_2 -uitstoot mag verwacht worden dat leerlingen deze invloed als belangrijkste beschouwen en dus de moeite waard om in het model op te nemen.

In het te ontwikkelen model wordt als causaal verband tussen de CO_2 -concentratie en de temperatuur verondersteld dat, met de CO_2 -concentratie, ook de absorptie- en emissiecoëfficiënt varieert. Er wordt niet onderzocht of een hogere CO_2 -concentratie tot een hogere temperatuur leidt; dit effect wordt verondersteld. Er worden geen andere broeikasgassen dan CO_2 gemodelleerd. Het modelleren van de CO_2 -concentratie kan zowel dienen als een voorbeeld voor andere broeikasgassen als beschouwd worden als een benadering voor alle uitgestoten broeikasgassen. Effecten van een temperatuurverandering op andere modelparameters blijven buiten beschouwing.

We verwachten dat de leerlingen kunnen uitleggen dat in de voorstelling van het 2-laagsmodel de CO_2 -concentratie de absorptie- en emissiecoëfficiënt beïnvloedt en daardoor de temperatuur. De docent formuleert als vraagstelling voor deze cyclus wat de temperatuur zal worden als rekening gehouden wordt met een veranderende CO_2 -concentratie. De docent problematiseert dan het testen van modelvoorspellingen en, als dit niet uit de leerlingen zelf komt, hij introduceert het 'terugvoorspellen' als maat voor betrouwbaarheid: het voorspellen van een bekende temperatuur op basis van een bekende verandering in de CO_2 -concentratie.

Een precieze relatie tussen de absorptie- en emissiecoëfficiënt ε en de CO_2 -concentratie is niet bekend. In deze cyclus wordt het verband daarom zo geparametriseerd dat deze de temperatuur uit het verleden goed weergeeft. Met behulp van aanwijzingen uit het lesmateriaal breiden de leerlingen hun 2-laags Powersimmodel uit met een historisch verloop van de CO_2 -concentratie en een relatie tussen CO_2 -concentratie en ε . Het is niet te verwachten dat de leerlingen zelfstandig een relatie kunnen formuleren die tot resultaten leidt die met de historische gegevens overeenstemmen. Zo'n verband wordt daarom gegeven. In het lesmateriaal worden hiervoor verschillende mogelijkheden gepresenteerd, waarvan elke leerling één kiest om mee te werken.

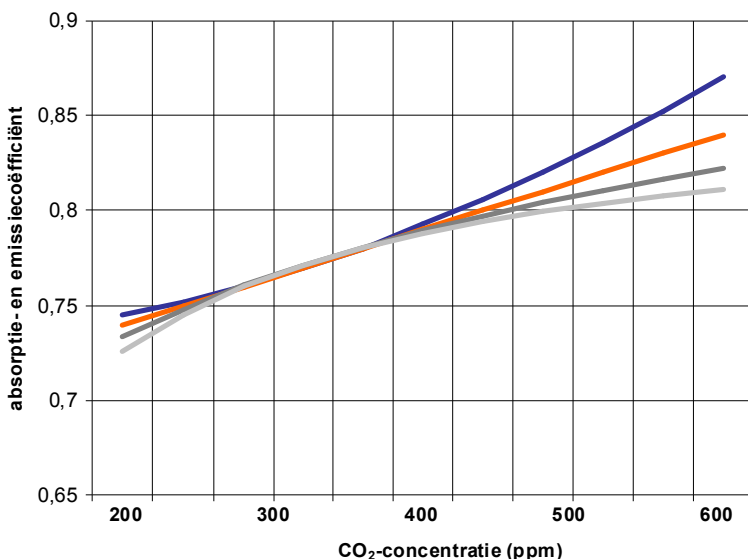
Vervolgens thematiseert de docent het probleem dat de toekomstige CO_2 -concentratie onbekend is, waarna in dialoog met de leerlingen het idee van de toekomstscenario's wordt benoemd: een beargumenteerde inschatting van het toekomstig verloop van de CO_2 -concentratie. De leerlingen construeren eigen scenario's waarmee zij hun Powersimmodellen doorrekenen.

De resultaten worden plenair besproken, waarbij de docent er voor zorgt dat bij elk modelresultaat ook duidelijk is op welk scenario het is gebaseerd en met welke relatie is gewerkt. Elk van de vier gepresenteerde relaties is geschikt voor het voorspellen van historische veranderingen, maar samen geven deze een range aan uitkomsten als ze buiten het CO₂-domein gebruikt worden waarvoor ze zijn opgesteld – hetgeen het geval is in de scenariostudies die de leerlingen uitvoeren (Figuur 10). Zo beogen we dat leerlingen inzien dat het voorspellen van het verleden als maat voor de betrouwbaarheid wel een noodzakelijke, maar geen voldoende voorwaarde is voor een betrouwbare modelvoorspelling.

Afwegingen met betrekking tot een keuze voor een van de relaties worden door de docent plenair geïnventariseerd, net als aannames die aan een zeker scenario ten grondslag liggen. Bij de evaluatie van de modelresultaten kunnen de docent en de leerlingen daarna de volgende bronnen van onzekerheid identificeren: geschatte parameterwaarden zoals het albedo, geparametriseerde relaties zoals tussen de CO₂-concentratie en ε , en verschillende inschattingen van de toekomstige omstandigheden zoals de CO₂-uitstootscenario's.

Ondanks het feit dat er in de modelvoorspellingen evidente onzekerheden te identificeren zijn, stemt het modelgedrag goed overeen met wat van het mechanisme verwacht mag worden. Op grond van de vraagstelling voor dit model is er daarom geen reden om het mechanisme in meer detail te modelleren.

Figuur 10. Vier mogelijke relaties tussen de CO₂-concentratie en ε . Elk leidt tot ongeveer dezelfde temperatuur voor de historische concentratieverandering sinds de Industriële Revolutie (280-380 ppm).



Natuurwetenschappelijke modelontwikkeling

In deze cyclus komt natuurwetenschappelijke modelontwikkeling als volgt aan bod:

- De cyclus start met een probleemverkenning waarin het globale doel voor de verdere module wordt ingeperkt tot een vraagstelling waarin alleen rekening gehouden wordt met het effect van een enkele invloed. De werking ervan wordt gezocht binnen het mechanisme van het 2-laagsmodel en verloopt slechts in één richting. Om de invloed te kunnen modelleren, worden enkele vereenvoudigingen en aannames gemaakt die in de modelevaluatie geïdentificeerd worden als bronnen van onzekerheid in de voorspellingen.
- De nieuwe relaties die zijn gedefinieerd voor het verband tussen de CO₂-concentratie en ϵ worden geïmplementeerd in het reeds ontwikkelde 2-laags computermodel.
- In het modelonderzoek wordt de spreiding in verkregen modeluitkomsten gerelateerd aan de gemaakte modelkeuzes.

Betekenisvol

De probleemverkenning is voor de leerlingen betekenisvol als zij

- een toekomstvoorspelling baseren op een verwachting over het verloop van relevante processen op aarde (zoals de CO₂-uitstoot);
- op basis van alledaagse kennis over klimaatvoorspellingen de stijgende CO₂-concentratie als een relevante invloed kennen voor de toekomstige temperatuur;
- de CO₂-concentratie de temperatuur in het 2-laagsmodel kan beïnvloeden middels de absorptie- en emissiecoëfficiënt.

Het modelonderzoek verloopt betekenisvol als de leerlingen inzien dat

- historische gegevens gebruikt kunnen worden om historische veranderingen te evalueren;
- de toekomstige CO₂-concentratie het resultaat is van mondiale politieke, economische, sociologische en technische ontwikkelingen, die onbekend zijn maar waarvoor wel verschillende trends geschetst kunnen worden.

Productieve constructieruimte

We verwachten dat leerlingen relevante inbreng hebben op basis waarvan besloten kan worden om de verandering van de CO₂-concentratie te modelleren. Door deze inbreng te vragen, kan de docent er aan bijdragen dat de leerlingen verantwoordelijkheid ervaren voor het modelleerproces.

Data van het historische verloop van de temperatuur en de CO₂-concentratie zijn gegeven, zodat alle leerlingen met dezelfde data hun model kunnen testen. Leerlingen maken en onderbouwen een eigen toekomstscenario dat zij doorrekenen en evalueren. We verwachten dat zij hierdoor ervaren dat hun eigen afwegingen over toekomstige mondiale ontwikkelingen er toe doen in hun temperatuurvoorspellingen als de voorspellingen van de leerlingen plenair worden vergeleken. Het is de rol van de docent om bij de klassikale inventarisatie en

evaluatie van de modeluitkomsten ervoor te zorgen dat de aannames en keuzes die aan elke voorspelling ten grondslag liggen, geëxpliciteerd worden.

Het is niet te verwachten dat de leerlingen zelfstandig relaties opstellen die de gewenste spreiding geven. Daarom zijn vier verschillende relaties tussen de CO_2 -concentratie en de absorptie- en emissiecoëfficiënt ε gegeven. Het staat elke leerling vrij om met een relatie naar keuze te werken. De docent moet de leerlingen ook deze vrijheid laten, als een van de bronnen voor een spreiding in uitkomsten. Hoewel de leerlingen daardoor de ruimte hebben om hun eigen afwegingen te maken bij het kiezen van een relatie, is het op voorhand moeilijk in te schatten of leerlingen hiervoor relevante argumenten kunnen aandragen.

3.2.9 Vijfde episode: terugkoppelingen

Verandering van de temperatuur ten gevolge van veranderende omstandigheden kan tot een terugkoppeling leiden waardoor de verandering versterkt wordt of juist uitdooft. Voor een voorspelling van de temperatuur is het relevant om dergelijke terugkoppelingen te kennen en in het model op te nemen. In deze cyclus kiest elke leerling uit drie mogelijkheden één terugkoppeling en maakt hiervoor een deelmodel (hun 'specialisatie'): de oplosbaarheid van CO_2 in de oceanen, de sneeuwbedekkingsgraad of het wolkalbedo.

Beoogd lesverloop

De onderzoeksvraag en de evaluatie van het voorgaande model bieden de leerlingen geen concrete aanwijzingen voor verdere modelontwikkeling. De laatste modelleercyclus wordt daarom door de docent geïntroduceerd. Hij wijst er op dat de invloed in het derde model slechts één kant op werkt. Hij benoemt dat er ook mechanismen zijn waarin een veranderende temperatuur van invloed is op de omstandigheden. We verwachten dat leerlingen in staat zijn om zelf te beredeneren dat het consequenties heeft voor de voorspelde temperatuur als er rekening gehouden wordt met terugkoppeling. Op basis daarvan concludeert de docent dat dergelijke terugkoppelingen dus relevant zijn voor een goede voorspelling, maar ook nieuwe onzekerheden kunnen opleveren. Daarmee motiveert hij de laatste modeluitbreiding voor de leerlingen, waarin het effect van terugkoppeling op de modelvoorspellingen onderzocht wordt: hoe beïnvloedt een terugkoppeling het modelgedrag en welke nieuwe bronnen van onzekerheid geeft dit?

De docent presenteert kort de drie terugkoppelingen en benoemt hoe het modelleerproces is georganiseerd in deze en de volgende episode. In deze episode kiest elke leerling een van de drie terugkoppelingen om zich in te specialiseren, waarbij de docent er voor zorgt dat alle drie onderwerpen in de klas aan bod komen. De leerlingen werken in koppels zelfstandig aan een modeluitbreiding gedurende meerdere lessen. Het integreren van de verschillende terugkoppelingen in één model is het doel van de volgende episode.

Op grond van de ervaringen die de leerlingen met Powersim hebben opgedaan verwachten we dat zij in staat zijn om zelfstandig (deel)modellen voor een terugkoppeling te ontwerpen en te bouwen als het mechanisme geëxpliciteerd is.

Oplosbaarheid van CO₂ in de oceaan

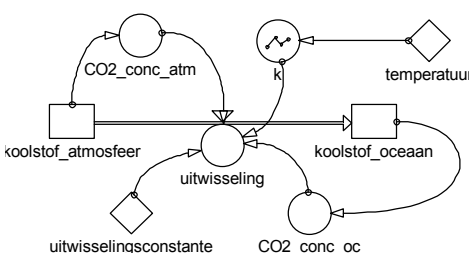
Om het belang van de oceanen voor de atmosferische CO₂-concentratie in te zien maken de leerlingen (geleid door opgaven) een benadering van de hoeveelheid CO₂ die daarin is opgenomen sinds de Industriële Revolutie. Daartoe bepalen zij het verschil tussen de huidige CO₂-concentratie en de concentratie die verwacht mag worden als alle uitgestoten CO₂ in de atmosfeer zou zijn gebleven. Bekend is wat de jaarlijkse menselijke uitstoot van CO₂ sinds 1800 is geweest (bij benadering) en er wordt verondersteld dat tot die tijd een dynamisch evenwicht bestond voor de koolstofuitwisseling tussen atmosfeer en oceaan. Leerlingen berekenen de totale CO₂-uitstoot sinds 1800 en bepalen vervolgens de verwachte toename van de atmosferische CO₂-concentratie. Uit het verschil halen de leerlingen de opgenomen hoeveelheid CO₂ in de oceaan.

Het te modelleren mechanisme achter de uitwisseling van CO₂ tussen atmosfeer en oceaan omvat de volgende noties:

- de atmosfeer en de oceaan bevatten voorraden koolstof;
- de koolstof in de atmosfeer of oceaan kan toe- en afnemen ten gevolge van koolstofstromen;
- de grootte van een netto koolstofstroom tussen atmosfeer en oceaan is afhankelijk van het CO₂-concentratieverschil tussen de atmosfeer en de oceaan;
- in evenwicht is er geen netto uitwisseling van koolstof tussen atmosfeer en oceaan;
- de evenwichtstoestand wordt bepaald door de temperatuurafhankelijke oplosbaarheid van CO₂ in de oceaan.

Het (deel)model van de koolstofstromen beïnvloedt de absorptie- en emissiecoëfficiënt in het 2-laagsmodel en is zelf afhankelijk van de berekende modeltemperatuur. Andere CO₂-stromen dan die van de mens naar de atmosfeer of die tussen de atmosfeer en de oceaan worden niet beschouwd.

Om het model te specificeren zijn waarden nodig voor de grootte van de koolstofvoorraden in de atmosfeer en de oceaan, de grootte van het water-volume van



Figuur 11. Powersimrepresentatie voor de koolstofuitwisseling tussen atmosfeer en oceaan.

de oceaan, de uitwisselingsstroom en de menselijke uitstoot. Bij het bepalen van deze waarden schatten leerlingen zelf een orde van grootte voor het watervolume van de oceaan en voor de uitwisselingssnelheid tussen atmosfeer en oceaan. De temperatuurafhankelijke oplosbaarheid van CO₂ is terug te vinden in een tabellenboek zoals Binas.

De leerlingen maken een eigen ontwerp voor het Powersimmodel van hun terugkoppeling. Zie Figuur 11 voor een voorbeeldweergave. Geïmplementeerd in Powersim stijgt, bij een gegeven uitstootscenario, de CO₂-concentratie in de atmosfeer iets sterker dan zonder de terugkoppeling.

Sneeuwbedekking

Het conceptueel model van de terugkoppeling tussen sneeuwbedekking en temperatuur vereist de inzichten dat

- het globaal-gemiddelde albedo een functie is van de hoeveelheid sneeuw en ijs op aarde;
- de sneeuwbedekkingsgraad een functie is van de temperatuur.

Met de beschikbare empirische gegevens is een globale relatie tussen het albedo en de sneeuwbedekkingsgraad te parametriseren, waardoor er geen onderliggend mechanisme voor sneeuw- en ijsvorming nodig is. De terugkoppeling grijpt aan op het albedo en de temperatuur in het 2-laagsmodel.

Om het effect van positieve terugkoppeling in te zien maken de leerlingen, geleid door opgaven, een terugkoppeling in het 2-laags Powersimmodel tussen de gemiddelde temperatuur, de gemiddelde mate van sneeuwbedekking en het albedo. Hiertoe definiëren leerlingen zelf het globaal-gemiddelde albedo als functie van de globaal-gemiddelde bedekkingsgraad. Een empirische relatie tussen de gemiddelde hoeveelheid sneeuwbedekking op een plek en de gemiddelde temperatuur op die plek is gegeven.

Met de globale terugkoppeling is het aardoppervlak in het Powersimmodel in enkele tijdstappen totaal sneeuwbedekt of sneeuwvrij, afhankelijk van de precieze waarden voor de modelparameters. Het verdere modelonderzoek wordt door opgaven gestuurd. De leerlingen wordt gevraagd om het modelgedrag van het sneeuwmodel nader te onderzoeken door de modeltemperatuur te forceren middels de absorptie- en emissiecoëfficiënt. Daardoor springt de sneeuwbedekking in het model van de ene in de andere extreme toestand: volledig sneeuwvrij of volledig sneeuwbedekt. Echter, de drempelwaarde voor de sprong de ene kant op is niet gelijk aan de drempelwaarde voor de sprong de andere kant op. Hoewel het model geen waarde heeft voor het voorspellen van toekomstige temperaturen, toont het kwalitatieve gedrag ervan wel wat positieve terugkoppeling in principe vermag.

De leerlingen wordt gevraagd om klimaatzones te construeren met elk een eigen temperatuur (afhankelijk van de globaal-gemiddelde temperatuur), een sneeuwbedekkingsgraad en een gewogen bijdrage aan het globaal-gemiddelde albedo. Daardoor is een gedetailleerder model mogelijk zonder warmtetransport tussen de zones. De plotselinge sprongen naar extreme toestanden verdwijnen in dit model. De leerlingen ontwerpen de benodigde Powersimstructuur zelfstandig, en maken ook eigen schattingen voor de gemiddelde temperatuur in elke zone.

Wolkalbedo

Om een hanteerbaar mechanisme te kunnen formuleren voor de wolkvorming is de fysica ervan sterk vereenvoudigd. Het conceptueel model van het wolkalbedo is gebaseerd op de volgende noties:

- de temperatuur aan het aardoppervlak bepaalt de hoeveelheid water in de onderste luchtlaag;
- door de turbulentie in de onderste luchtlaag bevat de lucht in deze laag overal dezelfde hoeveelheid water;
- op een zekere hoogte in de onderste luchtlaag is de temperatuur zoveel lager dan aan de grond, dat de waterdamp in de luchtlaag condenseert (wolkvorming);
- hoe meer (vloeibaar) water in de wolk, hoe hoger het wolkalbedo;
- hoe kleiner de druppels in de wolk, hoe hoger het wolkalbedo.

Om met deze terugkoppeling te kunnen rekenen moet bekend zijn hoeveel water zich in de lucht aan het oppervlak bevindt als functie van de temperatuur en hoe de temperatuur afneemt met de hoogte. Dan is de hoogte waarop een wolk zich vormt te berekenen (gegeven de maximale hoeveelheid waterdamp als functie van de temperatuur) en, door integratie, ook de totale hoeveelheid (vloeibaar) water. Bij een gegeven aantal druppels is dan het albedo van de wolk te bepalen als functie van de temperatuur aan het oppervlak; hiervoor is een empirische relatie bekend.

De relatie tussen de hoeveelheid vloeibaar water in een wolk en de grootte van de druppels is in het lesmateriaal gegeven, net als de gemiddelde luchtvochtigheid aan het aardoppervlak en hoe de temperatuur afneemt met de hoogte. De leerlingen stellen zelf een relatie op voor de maximale hoeveelheid waterdamp als functie van de hoogte en berekenen de hoogte waarop de wolk ontstaat (de wolkgrens). Als zij hebben leren integreren, kunnen zij vervolgens een uitdrukking bepalen voor de hoeveelheid vloeibaar water tussen de wolkgrens en de temperatuurinversie (de wolktop). Verder is het gemiddeld aantal druppels per cm^3 boven zee en boven land gegeven. Bij een gegeven temperatuur (en dus een hoeveelheid vloeibaar water) berekenen de leerlingen de gemiddelde druppelgrootte.

Leerlingen breiden zelf hun Powersimmodel uit met een temperatuurafhankelijk wolkalbedo. Daarmee onderzoeken zij de invloed van de terugkoppeling op de scenariovoorspellingen en de invloed van vervuiling. Geïmplementeerd in Powersim stijgt de temperatuur, bij een gegeven uitstootscenario, minder sterk dan zonder de terugkoppeling. De temperatuur blijft nog verder achter als verondersteld wordt dat de vervuiling, en dus het aantal condensatiekernen, ook toeneemt met de toename van CO_2 . Het ontwerp voor het benodigde Powersimmodel maken zij zelf. Het modelonderzoek wordt door opgaven gestuurd.

Natuurwetenschappelijke modelontwikkeling

Natuurwetenschappelijke modelontwikkeling krijgt als volgt invulling in deze cyclus:

- Gedurende de probleemverkenning worden meerdere mogelijke modeluitbreidingen geïdentificeerd waarvan op voorhand niet één duidelijk sterker is dan de andere. Daarom zijn ze even relevant om in model te zetten. Het is typisch voor het verder verfijnen van een model dat er meerdere modeluitbreidingen mogelijk zijn van vergelijkbare importantie. Om dit in de beperkte beschikbare tijd te doen worden deelmodellen parallel ontwikkeld en vervolgens gecombineerd tot een totaalmodel (dit laatste gebeurt in de volgende en laatste episode).
- Voor elk deelmodel moeten enige waarden en relaties gespecificeerd en geïmplementeerd worden. In het CO₂-model ligt de nadruk op het specificeren van een groot aantal modelparameters, en is het benodigde modeldiagram een geheel nieuwe structuur van voorraden en stromen. Om de benodigde relaties op te stellen ligt in het wolkmodel de nadruk op de wiskundige bewerkingen van verbanden. Het sneeuwmodel vereist de minste specificaties. De implementatie van zowel het wolkmodel als het sneeuwmodel zijn een kleine uitbreiding van het eerder ontwikkelde 2-laagsmodel.
- In elk van de drie specialisaties heeft het modelonderzoek een prominente plek. Verschillen in modeluitkomsten en modelgedrag ten opzichte van het voorgaande model worden geïdentificeerd en verklaard. In het bijzonder in het sneeuwmodel worden twee verschillende klassen van gedragingen onderzocht.

Betekenisvol

De probleemverkenning in deze cyclus verloopt betekenisvol als de leerlingen inzien dat:

- het versterkend of tegenwerkend effect van terugkoppeling van de temperatuur op een voor de temperatuur relevante invloed kwalitatief ander gedrag is dan dat in het voorgaande model;
- het voor het voorspellen van de toekomstige temperatuur relevant is om rekening te houden met het effect van terugkoppeling;
- elk van de gepresenteerde terugkoppelingen even relevant lijkt;
- door de verdeling van modelleertaken mogelijk wordt om alle mechanismen te modelleren in kortere tijd.

De globale vraagstelling en de evaluatie van het laatste model geven geen inhoudelijke aanwijzingen voor de nieuwe modelinhoud; die keuze is een didactische.

Productieve constructieruimte

Leerlingen kunnen niet op voorhand inzien welke terugkoppelingsmechanismen aan bod komen. De modelinhoud van de verschillende specialisaties wordt daarom door de docent globaal verteld, op basis waarvan elke leerling een keuze maakt voor een

van de drie mogelijkheden. Aan de hand van opdrachten in het lesmateriaal ontwikkelen de leerlingen in koppels een deelmodel van de gekozen terugkoppeling.

Wat er met het model wordt onderzocht is in de opgaven benoemd. De leerlingen hebben nog niet eerder het dynamisch gedrag van een model verkend. Daarom is het niet te verwachten dat leerlingen dit modelonderzoek zelfstandig kunnen plannen.

Gedurende de ontwikkeling van elk deelmodel krijgen de leerlingen op een aantal plekken de vrijheid om eigen keuzes te maken.

Oplosbaarheid van CO₂ in de oceaan

Op grond van de ervaring die de leerlingen in de eerste drie modelleercycli hebben opgedaan verwachten we dat zij zelfstandig een Powersimmodel voor het nettotransport van CO₂ tussen atmosfeer en oceaan kunnen ontwerpen en bouwen. Als de leerlingen inderdaad inzien dat een terugkoppeling de voorspellingen van het voorgaande model zal beïnvloeden, zijn zij ook in staat om zelf testcriteria voor het modelgedrag te formuleren en hun model hierop te testen.

De leerlingen bepalen de benodigde waarden aan de hand van opgaven uit het lesmateriaal: de hoeveelheid koolstof in de atmosfeer en in de oceaan, de uitwisselingssnelheid en, om de CO₂-concentraties te berekenen, de hoeveelheid luchtdeeltjes in de atmosfeer en het watervolume van de oceaan. Bij het bepalen van de benodigde waarden maken leerlingen zelf schattingen van de hoeveelheid water in de oceanen en van de uitwisselingssnelheid.

Sneeuwbedekking

We verwachten dat het model met terugkoppeling door sneeuwbedekking voor de leerlingen een eenvoudige uitbreiding is van het 2-laags Powersimmodel. De benodigde definitie van de sneeuwbedekkingsgraad als functie van de temperatuur is gegeven. Leerlingen stellen zelf wel de definitie op van het globaal-gemiddelde albedo als functie van de sneeuwbedekking.

Om het modelgedrag nader te onderzoeken moet de temperatuur in het model geforceerd worden met een van de andere modelparameters. Dit hebben de leerlingen nog niet eerder gedaan. Daarom wordt het modelonderzoek van de leerlingen geleid door opgaven. Middels de absorptie- en emissiecoëfficiënt wordt de modelwereld van de ene in de andere extreme toestand gebracht.

Om het kwalitatieve gedrag van het model meer in overeenstemming te brengen met de werkelijkheid wordt de leerlingen gevraagd om klimaatzones te construeren. Op basis van temperatuurkaarten van de wereld schatten leerlingen per klimaatgordel een gemiddelde temperatuur. Zij bepalen een gewogen gemiddelde voor de globaal-gemiddelde temperatuur en het albedo. Uitgaande van de ervaring die zij met de eerdere modellen hebben opgedaan verwachten we dat zij zelfstandig een Powersimmodel met klimaatgordels kunnen ontwerpen en bouwen. Ze formuleren zelf testcriteria voor het modelgedrag en testen hierop hun model.

Wolkalbedo

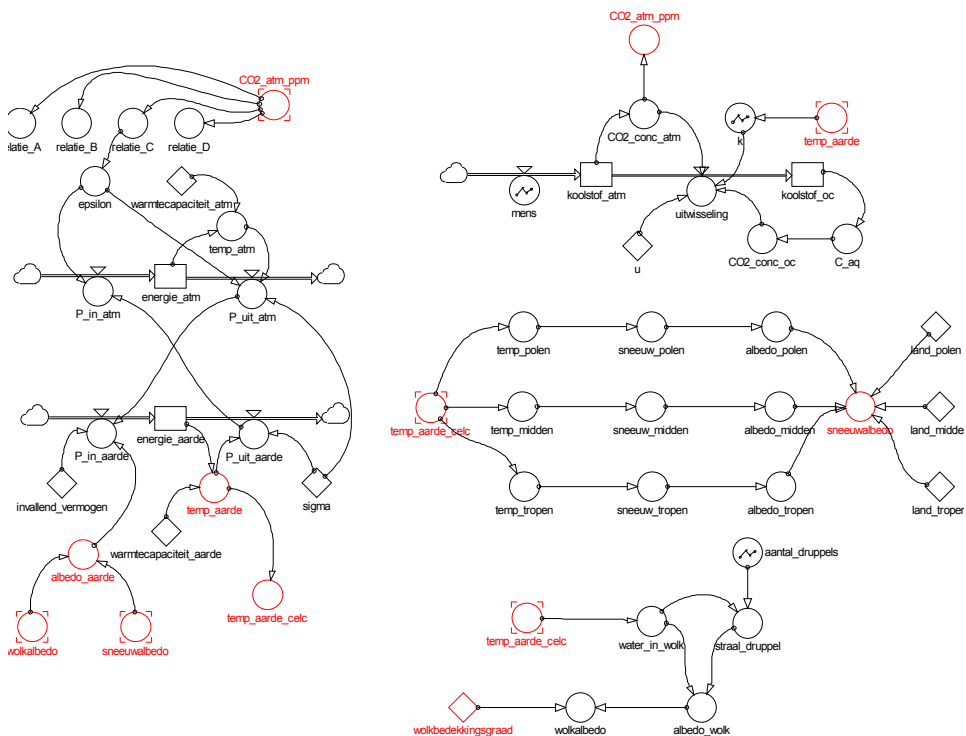
Geleid door opgaven formuleren de leerlingen zelf een aantal van de benodigde wiskundige relaties waarmee het wolkalbedo berekend wordt. Voor elke relatie is een inschatting gemaakt of leerlingen dit zelfstandig konden opstellen.

Leerlingen breiden hun Powersimmodel zelfstandig uit met een temperatuurafhankelijk wolkalbedo, onderzoeken de invloed van de terugkoppeling op de scenariovoorspellingen en de invloed van vervuiling (druppelgrootte).

3.2.10 Zesde episode: synthese

De functie van de laatste episode is om de leerlingen te laten reflecteren op hun deelmodellen, door elkaar de inhoud van hun specialisatie te laten presenteren ten behoeve van een totaalmodel waarin de drie deelmodellen zijn samengevoegd (Figuur 12).

Figuur 12. Overzicht van het beoogde totaalmodel. Links het 2-laagsmodel, met bovenaan een verbinding tussen ε en een van vier mogelijke relaties met de CO₂-concentratie. Rechts de drie specialisatiemodellen, met van boven naar beneden: oplosbaarheid van CO₂, sneeuwbedekking in zones, en het wolkalbedo. Omwille van de duidelijkheid zijn er geen relatiepijlen getekend tussen de specialisatiemodellen en het 2-laagsmodel, hoewel het 2-laagsmodel en elk deelmodel wel modelelementen delen.



Beoogd lesverloop

De leerlingen presenteren elkaar de inhoud en de bevindingen van het mechanisme waarin zij zich hebben gespecialiseerd. Zo wordt de inhoud en het effect van elk deelmodel gedeeld ten behoeve van de synthese van deelmodellen. Het doel van het samenvoegen is om na te gaan wat het effect is van de gecombineerde terugkoppelingen op de modeluitkomsten.

Om de deelmodellen, die afzonderlijk van elkaar zijn ingesteld, concreet samen te voegen moeten ze in het totaalmodel op elkaar worden afgestemd. Daartoe moet de ‘specialist’ zijn kennis van de modelinhoud, de werking en de onzekerheden in het model delen met anderen die aan het totaalmodel werken. Er worden leerlinggroepjes gevormd met uit elke specialisatie een leerling. Elke groep combineert de verschillende modellen tot een totaalmodel, dat zij vergelijken met de bevindingen van het terugvoorspellen, de scenariostudies en de resultaten van de afzonderlijke deelmodellen.

Op basis van de bevindingen vraagt de docent naar problemen die de leerlingen signaleren met hun totaalmodel. Te verwachten is dat leerlingen in staat zijn om de volgende problemen te benoemen: het op elkaar inwerken van de drie verschillende terugkoppelingen leidt tot een onvoorspelbaar resultaat en het resulterende model levert geen betrouwbare modelvoorspelling op.

In een klassikale afronding van de module kan de docent dus opmerken dat:

- het inzicht in het tot stand komen van de toekomstige temperatuur niet zomaar verbetert door het samenvoegen van de deelmodellen;
- binnen de randvoorwaarden van het proces (onderwijstijd en vakinhoudelijk niveau) het niet mogelijk is om de globale vraagstelling wat de temperatuur op aarde wordt verder te beantwoorden;
- het modelleerproces dat de leerlingen hebben doorlopen wel beter inzicht geeft in de aard van de beperkingen en onzekerheden van de voorspellingen.

Natuurwetenschappelijke modelontwikkeling

In deze cyclus is als volgt sprake van natuurwetenschappelijke modelontwikkeling:

- wat betreft modelspecificatie en implementatie worden de afzonderlijk ontwikkelde deelmodellen gecombineerd in een totaalmodel;
- wat betreft modelonderzoek worden de gevolgen nagegaan van de gemaakte modelkeuzes in de afzonderlijke deelmodellen voor het functioneren van het model als geheel;
- wat betreft modevaluatie wordt geconcludeerd dat de centrale vraagstelling niet verder beantwoord kan worden, maar dat er wel beter zicht is op de aard van de problemen die geïdentificeerd zijn.

Betekenisvol

Het samenvoegen van de parallel ontwikkelde deelmodellen is voor de leerlingen betekenisvol als zij inzien dat de wisselwerking tussen de verschillende

terugkoppelingen onderzocht moet worden om zicht te houden op de mogelijke onzekerheden in de modelvoorspelling.

Productieve constructieruimte

Alle leerlingen leveren een bijdrage aan de presentatie van de terugkoppelingen. Van elke specialisatie worden de inhoud en de bevindingen gepresenteerd en de gemaakte keuzes verantwoord. Bij vragen en reacties van medeleerlingen en de docent geven de leerlingen zelf toelichting op de werking van het mechanisme en de gemaakte keuzes.

Om het totaalmodel in de gewenste begintoestand te laten beginnen is afstemming nodig van de modelparameters. Leerlingen nemen verantwoordelijkheid voor eerder gemaakte keuzes uit hun eigen specialisatiemodel om tot een geschikte set parameterwaarden te komen.

3.3 Empirische evaluatie van het onderwijsontwerp

3.3.1 Procedure en databronnen

Voor de vakinhoudelijke ontwikkeling van het onderwijsmateriaal zijn vier klimaatonderzoekers van de Universiteit Utrecht individueel geraadpleegd: één voor de module als geheel en één specialist voor ieder van de drie specialisatieopdrachten. In overleg met deze experts is bepaald welke elementen uit elke cyclus noodzakelijk zijn voor het te modelleren mechanisme en welke vereenvoudigingen met het oog op de doelgroep acceptabel zijn. De resulterende vakinhoud is zowel tot hun als onze tevredenheid. Van deze consultaties zijn geen data verzameld.

Uit het scholennetwerk van het Freudenthal Instituut en het IVLOS, de lerarenopleiding van de Universiteit Utrecht, zijn docenten geworven om in het onderzoeksproject te participeren. De zes docenten die interesse toonden om aan het project deel te nemen zijn bezocht in een van hun lessen om een indruk te krijgen van hun onderwijsstijl; deze lessen zijn opgenomen op video. Uit de lesbezoeken bleek een diversiteit aan stijlen, maar dit vormde op dat moment geen aanleiding voor verdere selectie.

Met de docenten is een voorbereidingstraject doorlopen, waarna vier docenten het onderwijs in een van hun klassen hebben uitgevoerd (periode: januari tot juni 2005). Het voorbereidingstraject omvatte drie elementen: panelbijeenkomsten, trainingsbijeenkomsten en voorbesprekingen van elke les. Na afloop van de uitgevoerde lessenreeksen is er een afsluitende evaluatiebijeenkomst geweest met de uitvoerende docenten.

Het docentenpanel met de zes docenten kwam drie keer bijeen gedurende de ontwikkeling van het onderwijsontwerp. Met de panelbijeenkomsten beoogden we ten eerste te waarborgen dat de module voor leerlingen voldoende begrijpelijk zou zijn. Voorafgaand aan elke bijeenkomst kregen de docenten een nieuw deel van het ontwikkelde onderwijs toegestuurd om te lezen. Tijdens de bijeenkomsten gaven de

docenten hierop feedback. Ten tweede hadden de panelbijeenkomsten tot doel om de docenten die het materiaal zouden gaan uitvoeren, vertrouwd te maken met het onderwerp. Als derde doel streefden we naar een gedeeld begrip van het modelleringsproces. De uitvoerende docenten maakten daarom deel uit van het panel. Elke bijeenkomst kreeg een specifiek gesprekstema en duurde ongeveer twee uur.

Na de panelbijeenkomsten zijn er vier trainingsbijeenkomsten geweest voor specifiek de uitvoerende docenten. Hiermee beoogden we hen niet alleen 'technisch' vertrouwd te maken met de bedoelde modellen, maar ook de didactische randvoorwaarden voor het modelleren onderwijs te bespreken. Ter voorbereiding op en tijdens de bijeenkomsten construeerden de docenten de beoogde Powersimmodellen. Eventuele moeilijkheden konden zo geïdentificeerd worden en besproken. Op de eerste trainingsbijeenkomst is in algemene zin de rol van de docenten in het modelleringsproces besproken. In alle bijeenkomsten werd dit vervolgens praktisch gemaakt tijdens het bespreken van de door de docenten geconstrueerde modellen. De vier trainingsbijeenkomsten duurden ongeveer twee uur.

Alle zeven gezamenlijke voorbereidingsbijeenkomsten zijn opgenomen op video en geanalyseerd ten behoeve van de evaluatie van het voorbereidingstraject.

In de periode waarin een docent het onderwijs uitvoerde, is elke les met hem individueel vooraf doorgesproken. Concreet kwam dit neer op een of twee besprekingen per week. Hiervan zijn video- of audio-opnamen gemaakt.

Het onderwijs is achtereenvolgens uitgevoerd door vier docenten, die verder aangeduid worden als Albert, Ben, Chris en Dirk. De beginletters van deze namen corresponderen met de volgorde in de uitvoering. De lessen van de eerste twee docenten, Albert en Ben, zijn gevolgd om kinderziektes in het ontwerp op te sporen en te verhelpen voor de laatste twee uitvoeringen. Voor de analyse van het ontwerp zijn alleen de laatste twee uitvoeringen gebruikt.

De onderwijsuitvoering van Chris duurde elf lessen van elk 50 minuten. De looptijd was acht weken. Er zaten twaalf leerlingen in de klas. Voor het werken met de computer verhuisden de leerlingen naar een aparte computerruimte. Alle lessen zijn opgenomen op video, met uitzondering van les tien (groepswerk). Van de plenaire gedeelten is een transcript gemaakt. Gesprekken tijdens groepswerk tussen de leerlingen met de docent of onderzoeker zijn opgenomen op cassette. Van vier leerlingen zijn de antwoordenboekjes na afloop gekopieerd. Na afloop van de lessen waarin de leerlingen aan een computermodel werkten, is van deze modellen een kopie gemaakt.

De uitvoering van Dirk nam dertien lessen in beslag van elk 50 minuten. De looptijd was vier weken. Ook hier namen twaalf leerlingen deel. Voor de activiteiten achter de computer waren er laptops in het klaslokaal. Alle lessen zijn opgenomen op video, met uitzondering van les twee (technisch defect). Tijdens groepswerk zijn de gesprekken tussen de leerlingen onderling en met de docent of onderzoeker opgenomen op cassette. Alle video- en audio-opnamen zijn getranscribeerd. Van negen leerlingen zijn de antwoordenboekjes gekopieerd. Van de computermodellen van de leerlingen en van de ingeleverde verslagen is een kopie gemaakt.

De docenten bepaalden zelf hoe ze de leerlingen beoordelen. Chris en Dirk gaven een cijfer voor een korte klassikale presentatie van de specialisatieopdracht. Daarnaast liet Dirk een van de modelleeropdrachten als een praktische opdracht meetellen en schreven zijn leerlingen een reflectieverslag over de betrouwbaarheid van de specialisatiemodellen. Van de verslagen is ook een exemplaar naar de onderzoeker gegaan.

De selectie en analyse van de verzamelde data werden gestuurd door de analysevragen die per episode zijn geformuleerd.

3.3.2 Schets van de deelnemende docenten en resultaten van het voorbereidingstraject

Docenten

De deelnemende docenten worden hieronder kort gekarakteriseerd. De twee docenten die alleen in het panel betrokken zijn geweest hebben de gefingeerde namen Lars en Lennart gekregen.

Albert heeft natuurkunde gestudeerd. Sinds twee jaar is hij eerstegraads natuurkundedocent. Zijn school staat in een nog nieuwe wijk van een snelgroeende stad in de Randstad. Hij doet mee als vervanger voor Lennart, die zich in eerste instantie aanmeldde om het onderwijs uit te voeren maar geen geschikte klas kreeg. Doordat hij pas na de eerste voorbereidingsbijeenkomst in het project stapte, is er geen informatie verzameld over zijn ervaring met en visie op modelleeronderwijs.

In de les die ter kennismaking is bezocht laat hij de ongeveer dertig leerlingen in tweetallen een elektrische schakeling bouwen. Hij houdt toezicht op de verdeling van de benodigde materialen, hetgeen enige tijd in beslag neemt. In die tijd kunnen leerlingen met vragen naar hem toe. In de tweede helft van de les maakt hij een systematische rondgang langs de leerlingen om vragen te beantwoorden. Ondanks de grootte van de klas probeert hij er voor te zorgen dat alle leerlingen zelfstandig aan het werk kunnen. Voor het beoogde modelleeronderwijs is dit een bruikbare instelling, hoewel het de vraag is of hij met zo'n groot aantal de leerlingen individueel kan begeleiden met het experimentele lesmateriaal.

Ben heeft technische natuurkunde gestudeerd aan een TU. Hij is begonnen aan een biofysisch promotieonderzoek, maar heeft dit niet afgemaakt. Hij heeft daarna de eerstegraads lerarenopleiding afgerond in Utrecht en geeft een aantal jaren les op een school in een stadje in het groene hart van de Randstad.

Hij doet niets met het onderwerp modelleren in zijn onderwijs omdat het in het examen niet aan bod komt, hoewel op zijn school wel een aantal computers is uitgerust met Coach en er in de natuurkundemethode Newton die hij gebruikt een hoofdstuk over computermodelleren gaat. Ben wil wel meer met modelleren doen, hetgeen voor hem de motivatie is om mee te doen aan het project.

Het concept 'model' hanteert hij enerzijds voor formules (formules voor de rolwrijving en luchtwrijving zijn het model ervan), anderzijds voor kwalitatieve fysische voorstellingen van een verschijnsel. Bij modelleren denkt hij voornamelijk aan de processtappen die helpen om een probleem oplosbaar te maken: het selecteren van

wat relevant en wat irrelevant is, het uitzoeken van wat de parameters en wat de variabelen zijn, en het bepalen van de in- en uitvoer. Hij vindt het belangrijk dat het modelleeronderwijs leerlingen betreft bij het analyseren van een verschijnsel.

Tijdens de kennismakingsles bespreekt hij een groot aantal opgaven uit het lesmateriaal. Hij is voornamelijk zelf aan het woord, maar laat zich wel sturen door vragen van leerlingen. Dit laatste is een gewenste kwaliteit voor het modelleeronderwijs. Hij behandelt alle vragen centraal, en maakt daarbij geen onderscheid tussen de vragen die breed gedeeld worden en de vragen van een enkeling. In dat laatste geval wordt het rumoerig in de klas, hetgeen geregeld gebeurt.

Chris heeft fysische geografie gestudeerd, en daarna tien jaar bodemverontreinigingsonderzoek gedaan. Sinds zes jaar geeft hij les, waarvan de laatste twee jaar op de huidige locatie, een school in een klein plaatsje bij Amersfoort. Hij is als zij-instromer begonnen en studeert nog voor zijn eerstegraads lesbevoegdheid.

Chris gebruikt *Scoop*. Op de schoolcomputers staat Coach, maar door de leerlingen wordt nauwelijks gemodelleerd. Computermodellen fungeren vooral als demonstratieproef; leerlingen hoeven hooguit iets te wijzigen aan een ingevoerde formule of waarde. Voor die situaties waarvoor een computermodel beschikbaar is, zijn naar Chris' smaak mooiere en handige *applets* op internet te vinden.

Hij bespreekt in zijn lessen niet waar hij het over natuurwetenschappelijke modellen heeft (zoals bijvoorbeeld het atoommodel), tenzij het gaat om de vraag of de werkelijkheid nu echt zo in elkaar steekt als in de les verteld wordt. Hij benadrukt dan het hypothetisch karakter van een model: dit is een denkhulp die een situatie werkbaar maakt, maar staat niet vast; het is slechts een model. Bij modelleren denkt hij met name aan het proces waarin leerlingen zelf uitzoeken wat een geschikt antwoord is op een gesteld probleem en welke informatie ze nodig hebben om het antwoord te kunnen geven; achtergrondinformatie die gegeven wordt, moeten leerlingen zelf maar beoordelen op bruikbaarheid.

In de kennismakingsles werkt hij toevallig een dergelijk modelleerprobleem uit met zijn leerlingen. Hij vraagt dan van de leerlingen om te beredeneren hoe het gezochte antwoord gevonden kan worden en hardop denkend neemt hij hierin zelf het voortouw. Dit patroon, het vragen om leerlingantwoorden en het zelf uitwerken van een antwoord, herhaalt zich op allerhande niveaus: van globale oplossingsrichting tot kleine details en schattingen. Leerlingen zijn niet altijd in staat om bij te dragen, maar doen hiervoor wel hun best. Het type vragen waarin de docent de leerlingen betreft, sluit goed aan bij het beoogde modelleeronderwijs.

Dirk heeft natuurkunde gestudeerd. Hij heeft zijn eerstegraads lesbevoegdheid, en werkt al enige jaren in een plaatsje aan de rand van de Veluwe.

Dirks leerlingen werken in V5 gedurende tien lessen redelijk zelfstandig aan het hoofdstuk modelleren uit Newton en doen vervolgens een praktische opdracht met modelleren. In Newton betreft het modelleren vooral het afmaken en aanpassen van gegeven modellen; de exameneisen gaan immers ook niet verder dan dit. In de praktische opdracht maken leerlingen een eigen model.

De gemodelleerde situaties zijn veel eenvoudiger dan de onderwerpen die in ANW aan bod komen, zoals weer en klimaat. Een reden om aan dit project mee te doen is dat het onderwerp klimaatmodelleren misschien deze kloof tussen de gebruikelijke natuurkundeonderwerpen en de ANW-stof kan overbruggen. Ook vindt Dirk het aantrekkelijk dat de nadruk blijft liggen op het modelleren, omdat modelleren in het huidige curriculum te veel een geïsoleerd onderwerp is.

Belangrijke aspecten van modelleeronderwijs vindt Dirk dat leerlingen hun modelresultaten kunnen fitten aan empirische gegevens en dat leerlingen inzien wat de grenzen zijn aan het model als een benadering van de werkelijkheid.

In de bezochte les bespreekt hij plenair een aantal opgaven over het systeembord. Hij is vooral zelf aan het woord, maar het lijkt Dirk geen moeite te kosten om daarbij de aandacht van de leerlingen vast te houden: zij luisteren aandachtig. In de tweede helft van de les gaan de leerlingen vervolgens zelfstandig aan het werk, waarbij de docent vooral daar aanwezig is waar leerlingen problemen hebben.

Lennart heeft jarenlange ervaring als natuurkundedocent. Hij heeft een eerstegraads bevoegdheid en geeft les op dezelfde school als Albert.

Voor zijn modelleeronderwijs gebruikt hij Newton. Leerlingen werken dan redelijk zelfstandig aan een aantal computermodellen in Coach, die ze moeten afbouwen of verbeteren. Lennart wil graag een onderwijsmodule waarmee de leerlingen een basisvaardigheid modelleren verwerven, zodat gedurende het curriculum hiervan gebruik gemaakt kan worden – in tegenstelling tot het huidige onderwijs waarin het een op zichzelf staand hoofdstuk is. Lennart kent ook de software Powersim. Het voordeel daarvan vindt hij dat de verbanden beter zichtbaar blijven voor de gebruiker, maar hij vermoedt dat een tekstomgeving zoals Coach tot een beter begrip leidt van de gebruikte formules.

Het creatief denken over fysische verklaringen voor een verschijnsel vindt hij een belangrijk aspect van modelleren, net als het spelen met een model om te kijken wat het modelgedrag is bij verschillende instellingen.

Lars heeft natuurkunde gestudeerd. Hij volgt op dat moment de lerarenopleiding voor zijn eerstegraads lesbevoegdheid en geeft voor het eerste jaar les, in een plaatsje bij Utrecht.

Hij behandelt het hoofdstuk modelleren uit Systematische Natuurkunde. Uitgaande van de situaties die daarin aan bod komen, maakt hij zelf opdrachten voor de leerlingen, waardoor zij, meer dan in het lesboek, verantwoordelijkheid krijgen over het modelleerproces.

Een gedeeld perspectief op modelleren

Met name Dirk en Lennart hebben ruime ervaring met het onderwerp computermodelleren, hoewel dit in hun lessen beperkt blijft tot het aanvullen en afbouwen van een gegeven computermodel. Modelleeropdrachten gaan typisch over mechanica-situaties met wrijving. De beide docenten geven aan dat ze het modelleerproces graag in een bredere zin in hun onderwijs willen laten terugkomen. Hoewel hun leerlingen vrij zelfstandig werken aan de modelleeropdrachten uit *Newton*, zijn deze opdrachten geen goed voorbeeld van een natuurwetenschappelijk modelleerproces. Als belangrijke

aspecten daarvan noemen ze het uitzoeken hoe een probleem opgelost moet worden, creatief bezig zijn om fysische verklaringen te bedenken en modelonderzoek naar het gedrag van een situatie onder verschillende omstandigheden. Modelleren in deze zin sluit goed aan bij het modelleren in het lesontwerp.

De docenten die normaal gesproken niet of nauwelijks aandacht besteden aan het onderwerp computermodelleren hebben geen moeite om aan te haken bij een brede opvatting van modelleren, met de nadruk op creativiteit, vrijheid en reflectie. De groepsgewijze besprekingen hebben dus bijgedragen aan een gedeeld perspectief op het modellerenproces.

Over het onderwerp, de opbouw en het niveau

De schetsen voor het onderwijs worden qua opbouw en uitlijning goed gewaardeerd. De docenten vinden het niveau van de opdrachten globaal genomen goed, hoewel ze denken dat de specialisatieopdrachten voor sommige leerlingen te moeilijk zullen zijn. Niettemin vinden ze deze ook uitdagend en fascinerend en ze denken dat het de leerlingen op hun niveau goed kan laten ervaren hoe moeilijk het modelleren van het klimaat wordt. Dit achten ze waardevol, omdat (aldus Dirk) “het bij ANW bij een mededeling moet blijven”.

Als knelpunt wordt gesignaleerd dat de scheidslijn tussen klimaatmodelleren en leren modelleren niet duidelijk is.

Over de modelleersoftware

De docenten vinden dat Powersim het de gebruiker makkelijk maakt om modellen te construeren en uit te breiden. Dit waarderen ze positief, omdat dit de vrijheid voor leerlingen ten gunste komt. Tegelijkertijd signaleren zij als een mogelijk probleem dat elke leerling met een andere versie van het beoogde model komt.

Over een modelleerdidactiek

Hoewel de rol van de docent in de plenaire bijeenkomsten niet heel gedetailleerd aan bod is gekomen, is herhaaldelijk gesproken over de spanning tussen vrijheid voor de leerlingen en sturing door het lesmateriaal en de docent.

De docenten vinden dat het materiaal de leerlingen sterk stuurt. Dit wordt verschillend gewaardeerd: sommige docenten vinden het prettig dat het de leerlingen in een nieuw en moeilijk onderwerp helpt, terwijl anderen weinig ruimte zien voor de vrijheid van leerlingen. Met name Chris en Dirk willen uiteindelijk steeds zelf kunnen beslissen hoe zij de vakinhoud aan bod laten komen: als hun leerlingen problemen met de stof hebben, zullen zij op hun eigen wijze de leerlingen uitleggen wat er bedoeld wordt. Albert realiseert zich dat het modelleeraspect van het onderwijs ondermijnd wordt als de vakinhoud op ‘klassieke’ wijze uitgelegd wordt en is steeds alert om de leerlingen modelleervrijheid te geven.

Powersim geeft de leerlingen veel vrijheid volgens de docenten. Om de diversiteit hanteerbaar te houden, stellen zij voor dat zij van elk beoogd model een exemplaar aan leerlingen beschikbaar kunnen stellen als deze vastlopen. Dit laat in principe de

mogelijkheid open dat leerlingen steeds verder kunnen werken met het model dat ze zelf geconstrueerd hebben, hetgeen recht doet aan hun eigen inspanningen.

Over de haalbaarheid

Het tijdspad voor de beoogde uitvoering achten Albert en Dirk te krap. Chris heeft geen moeite met de hoeveelheid geplande activiteiten, omdat hij zelf de verantwoordelijkheid wil nemen voor de manier waarop dat gerealiseerd wordt. Hij let met name op het eindpunt waar de leerlingen moeten komen en acht zich dan niet gebonden aan het ontwerp. Naar aanleiding van zijn inbreng is toegelicht dat er gedurende de voorbereiding ruimte is om het scenario (de verwachtingen, de volgorde van activiteiten, en de ideeën die daaraan ten grondslag liggen) ter discussie te stellen, maar dat de feitelijke uitvoering in principe de beoogde uitvoering moet volgen.

De docenten achten de vakinhoud wel navolgbaar voor leerlingen, maar oordelen verschillend of de leerlingen ook zelf het materiaal kunnen doorlopen. Ze vinden het lastig in te schatten wat de leerlingen zelf kunnen bijdragen, met name wat betreft de specialisatieopdrachten. Ze zijn er echter voldoende enthousiast over om het te willen proberen.

Individuele voorbesprekingen

Tijdens de individuele voorbesprekingen van de afzonderlijke lessen worden de geplande lesactiviteiten in detail doorgesproken: de gewenste opbrengst van elke activiteit, de keuze voor werkvormen en de beoogde inbreng van de leerlingen en van de docent. De voorbesprekingen beginnen veelal met een reflectie op de afgelopen les(sen). Eventuele moeilijkheden die door de onderzoeker of de docent zijn gesignaleerd worden dan betrokken in de planning van de komende les. De beschikbare tijd is niet voldoende om de opzet van de lessen ter discussie te stellen. Omdat in het plenaire voorbereidingstraject ook maar beperkt aandacht is besteed aan de onderwijsaanpak in de klas, hebben de docenten uiteindelijk weinig inbreng in het ontwerp van de activiteiten. Alle docenten leggen zich met meer of minder moeite toe op het uitvoeren van het lesplan. Zij ontnemen de meeste houvast aan de beoogde opbrengsten. De wijze waarop deze gerealiseerd moeten worden achten ze minder belangrijk. Enerzijds achten ze zichzelf goed in staat om er voor te zorgen dat de leerlingen de module kunnen doorwerken. Anderzijds wordt de lesplanning voor hen te gedetailleerd om deze te volgen zonder het overzicht kwijt te raken.

3.3.3 Eerste episode: introductie van de globale vraagstelling

Analysekader

De functie van de eerste episode is om eerst een motiverende vraag op te roepen en deze vervolgens in te perken tot een richtinggevend modelleerprobleem dat de leerlingen zelf gaan aanpakken. De leerlingen zien een journaalfragment over een klimaatvoorspelling. Het doel van dit fragment is om leerlingreacties op te roepen waarmee in een klassengesprek de vraagstelling voor de module gemotiveerd kan worden: hoe komt een klimaatvoorspelling tot stand? ‘Zelf modelleren’ wordt

voorgesteld als een manier om hier inzicht in te krijgen. Het probleem wordt ingeperkt tot de globale vraagstelling voor de module: “wat wordt de globaal-gemiddelde temperatuur op aarde in 2200?”. Als noodzakelijke eerste stap op weg naar de oplossing wordt dit probleem gereduceerd tot de vraag hoe de huidige temperatuur op aarde tot stand komt. De zon wordt als belangrijkste warmtebron geïdentificeerd.

Het beoogd lesverloop, besproken in 3.2.5, geeft aanleiding tot de volgende analysevragen:

1. Verloopt de probleemverkenning betekenisvol voor leerlingen? Dit zou moeten blijken uit relevante leerlingbijdragen, zoals dat
 - leerlingen zich n.a.v. het getoonde journaalfragment afvragen op welke kennis en inzichten een klimaatvoorspelling gebaseerd is (waar wordt rekening mee gehouden, en waarmee niet), hoe de computer daarmee rekent (hoe wordt die informatie ingevoerd en doorgerekend), en wat de betrouwbaarheid is van de voorspelling (welke onzekerheden kleven er aan de modelvoorspellingen);
 - het inperken tot de toekomstige globaal-gemiddelde temperatuur en een afgebakende voorspelhorizon het voorspellen tot een beter haalbaar doel maakt;
 - het nodig is om eerst te begrijpen hoe de huidige temperatuur tot stand komt alvorens veranderingen te kunnen modelleren;
 - daartoe eerst de belangrijkste invloeden in model gezet moeten worden;
 - de zon de belangrijkste warmtebron is.
2. Wordt er productieve constructieruimte gerealiseerd bij het expliciteren van de te volgen strategie ('begin simpel: grootste invloeden eerst')?
3. Wordt er productieve constructieruimte gerealiseerd bij het selecteren van de zon als belangrijkste warmtebron?

Uitvoering Chris

Chris vertoont het journaalfragment. Dit roept spontane reacties op van leerlingen.⁵

1. **D:** waarom moesten jullie lachen, bij die computer?
2. **lIn:** om die uitspraak 'dat was ja'. Daar mogen ze wel iets meer regeltjes aan besteden.
3. **D:** waarom is dat dan zo raar? Wat moet die computer dan nog meer zeggen?
4. **lI:** wat voor soort klimaat..

⁵ In protocolfragmenten zijn de volgende afkortingen gebruikt:

D = Docent

lI = leerling (niet geïdentificeerd)

lIn = leerlingen (door elkaar)

Als een individuele leerling geïdentificeerd is, is deze weergegeven met een eigen 'leerlingnummer'.

5. **II2:** zij interpreteren dat als..
6. **II3:** wat we kunnen verwachten.
7. **II4:** mate van details.

Fragment uit het klassengesprek volgend op het journaalitem. *Chris: les 1, 5'*

Chris' leerlingen verwachten dat de computer gedetailleerdere voorspellingen doet dan alleen nee of ja (r. 4, 6, 7) en dat de computeruitkomsten (door wetenschappers) geïnterpreteerd worden (r. 5). Er wordt dus gesignaleerd dat relevante informatie ontbreekt, namelijk dat de precieze bevindingen van het onderzoek niet gespecificeerd zijn. Het ontbreken van relevante informatie is echter een tekortkoming in de berichtgeving en wijst nog niet op een kennisgat bij de leerlingen zelf.

Chris vraagt de leerlingen te specificeren wat zo'n computer nu eigenlijk doet. De leerlingen benoemen dit als simuleren, (kans)berekeningen maken en informatie verwerken. Chris gebruikt de laatst genoemde om de keten 'invoer – verwerking – uitvoer' op het bord te zetten. Vervolgens benoemt hij bij elk van de drie stappen wat relevant is om te weten.

1. **D:** En jullie zeiden al: die man van het journaal die zou eigenlijk moeten zeggen dit [*output*] moet wat specifieker he. Wanneer het dan warmer wordt of wanneer het dan meer gaat regenen, en hoeveel.
2. **II:** dan moet je je gegevens specifieker maken.
3. **D:** ja, dit he.
4. **II:** ja, of het model uitgebreider.
5. **D:** ja, en liefst ook erbij zeggen: hoe die het doet. Wat je er in stopt, hoe dit het doet en wat er uit komt. En wat nog meer? Je moet weten wat hij er in stopt, hoe hij het uitrekent, en dan graag specifiek mooi gedetailleerde uitkomsten...?

Fragment uit het klassengesprek voor het thematiseren van het kennisgat. *Chris: les 1, 8'*

Duidelijker dan in het voorgaande fragment wordt het ontbreken van de benodigde informatie geweten aan het nieuwsitem (r. 1, 2). Van de kennisbehoefte die op basis van het fragment moest ontstaan worden twee aspecten door Chris benoemd (r. 5): wat gaat er in het model en hoe wordt het model doorgerekend?

Het derde aspect van de kennisbehoefte komt van de leerlingen zelf: zij benoemen dat ook de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de uitkomsten bekend moeten zijn. Chris brengt in herinnering dat, in de natuurkunde, betrouwbaar betekent dat een proef reproduceerbaar is. Vervolgens vraagt hij hoe dit van toepassing is op modellen.

1. **D:** en bij dit soort rekenmodellen, wat geeft bij jou een idee van de betrouwbaarheid van een model?
2. **II2:** een soort van gemiddelde.
3. **II7:** [als iedereen dat doet].
4. **II8:** veel herhalingen.
5. **D:** ja..

6. **II8:** van verschillende personen.
7. **D:** ja.. en als daar nou uitkomt dat de temperatuur van de aarde wordt 280 graden boven nul?
8. **II8:** ja, maar je moet ook naar het verleden kijken.
9. **D:** ah. Leg eens uit?
10. **II8:** nou ja, als het voor de laatste paar honderd jaar niet zo hoog de temperatuur niet zo hoog is geweest, dan ..
11. **D:** als het model niet klopt met dat wat je al weet, of wat je stiekem verwacht, dan lijkt het al onbetrouwbaar he?
12. **II1:** ja. Kan zijn dat je dat het net zo goed toch goed is.
13. **D:** wat zeg je?
14. **II1:** het kan zijn dat het dan net zo goed nog goed is, maar dat het iets is wat jij niet verwacht maar wat dan toch klopt.
15. **D:** maar wat moet het model in ieder geval goed doen?
16. **II1:** wat al geweest is.
17. **D:** wat al geweest is.
18. **II1:** ja.
19. **D:** en waar hebben ze het over, eigenlijk? Wat is de parameter die er uit komt? Ze hebben het over klimaat, maar niet.. maar het klimaat is groot he, dat is veel. Waar hebben zij het over?

Fragment uit het klassengesprek over de betrouwbaarheid van modeluitkomsten. *Chris: les 1, 10'*

Als maat voor de betrouwbaarheid noemen leerlingen de mate waarin de resultaten van herhaalde modelruns en van verschillende modellen met elkaar overeenstemmen (r. 2-6), en in hoeverre de resultaten vergelijkbaar zijn met het verleden (r. 8, 15-18). Beide ideeën zijn bruikbaar voor de lessenserie, omdat de wijze waarop betrouwbaarheid in het ontwerp aan bod komt precies aansluit op wat de leerlingen gaan doen: hun modelresultaten onderling vergelijken en het verleden voorspellen. Er wordt niet benoemd waaraan leerlingen verschillen in modeluitkomsten toeschrijven.

In de laatste regel van het fragment werkt de docent toe naar het inperken van klimaat tot temperatuur ('temperatuur' is het gewenste antwoord op de vraag in r. 19). Hierbij refereert hij aan het videofragment zelf, waardoor de overgang naar temperatuur wel logisch lijkt maar niet doelgericht gemaakt wordt.

Chris schrijft 'temperatuur' op het bord en vraagt de leerlingen relevante invloeden te benoemen. Deze verzamelt hij in een woordweb. Leerlingen komen met een diverse reeks: CO₂-uitstoot, zonnestralen, de stand van de aardas, uitlaatgassen, de dag-nachtcyclus, vegetatie, regen, gassen t.g.v. vulkaanuitbarstingen, de mens, de wind, en oceaanstromingen. Zij leggen niet uit door middel van welk mechanisme elke bijdrage van invloed zou zijn.

Chris vraagt de leerlingen welke drie factoren zij het meest belangrijk achten voor de temperatuur op aarde. Zij kiezen dan de zoninstraling, de stand van de aardas en de broeikasgassen in de atmosfeer. Chris kondigt vervolgens aan dat zij de

werking van deze factoren wat ‘natuurkundiger’ gaan behandelen. Een modeldoel is niet geëxpliciteerd. Onder verwijzing naar de titel van het eerste hoofdstuk in het lesmateriaal – “begin simpel” – kondigt Chris aan dat zij de temperatuur eerst in grote lijnen gaan bekijken en er dus nog verder ingeperkt moet worden. De leerlingen concluderen dat alleen de zon dan als relevante invloed overblijft.

Uitvoering Dirk

Dirk toont de video op een laptop. Het fragment leidt in zijn klas niet tot reacties.

1. **D:** verder heb ik die niet meer nodig, geloof ik [*zet laptop weg*]. Maar dat laatste opmerking ‘het antwoord dat de computer uitspuwde over klimaatverandering, was ‘ja’.
2. [*Vraagt middels gezichtsuitdrukking om reactie.*]
3. **D:** Hoe moeten we dat interpreteren?
4. **Il:** [*.. geen ANW cursus.?*]
5. **D:** Nou, jullie hebben het pas bij ANW over het klimaat gehad. Kwam daar ook uit die berekeningen.. reken reken reken, in een keer het antwoord ‘ja’?
6. **Il:** dat is.. wat eruit komt is..
7. **D:** Wat betekent dat? Natuurlijk komt er niet het antwoord ja uit rollen. Er komt een getal uit rollen, berekeningen, getallen. Maar: wát berekent men, hóe berekent men?
8. **Il:** Met het verleden. Ze kijken naar het verleden, wat er is gebeurd..
9. **D:** ja.. ja.
10. **Il:** en wat de invloed is van de mens daarop, ook, nu op dit moment, en wat het klimaat dus zou kunnen zijn.
11. **D:** ja, maar wat is klimaat dan? Hoe meet je klimaat? Waar meet je dan bijvoorbeeld aan?

Fragment uit het klassengesprek volgend op het journaalitem. *Dirk: les 1, 9'*

Dirk stelt zelf de vragen waaraan een model rekt en hoe met een model gerekend wordt (r. 5, 7). Een leerling antwoordt op deze vragen dat rekening gehouden moet worden met het verleden (r. 8), en dat natuurlijke processen onderscheiden moeten worden van menselijke invloeden (r. 10). Beide opmerkingen zijn bruikbaar. Het verleden komt terug in de cyclus over de CO₂-concentratie. Het onderscheiden van menselijke en natuurlijke invloeden is bruikbaar om het modelleren van terugkoppelingen mee te motiveren: er zijn mechanismen die bijdragen aan verandering van de temperatuur zonder dat de mens daarin (rechtstreeks) de hand heeft.

In het klassengesprek volgend op bovenstaand fragment stelt de docent ter discussie welke factoren gemeten kunnen worden en wat de beperkingen zijn van de beschikbare meetgegevens. Het benoemen van de verschillende factoren, zoals temperatuur, brengt het gesprek op het verschil tussen weer en klimaat. Dirk tematiseert de betrouwbaarheid van klimaatvoorspellingen door te wijzen op de

beperkte voorspelbaarheid van het weer. Hij concludeert dat er voor het voorspellen van het klimaat andere mechanismen relevant zijn dan voor het weer.

Dirk inventariseert welke factoren de leerlingen relevant achten voor het klimaat, ingeperkt tot de temperatuur. Leerlingen komen met bewolking, de zon, wind, neerslag, hoogte, plaats op aarde t.o.v. land en zee, en CO₂. De docent benoemt zelf nog de invloed van ijs, en vraagt de leerlingen deze invloed uit te leggen. Een leerling noemt de zeespiegelstijging, een andere dat het warmer wordt omdat er minder zonlicht weerkaatst wordt, een derde dat het kouder wordt omdat het smelten van ijs energie kost.

Van de verschillende genoemde invloeden gaat Dirk na of deze alleen de temperatuur beïnvloeden, of ook beïnvloed worden door de temperatuur. Hij wijst er op dat heen-en-weergaande invloeden tussen de temperatuur en CO₂, ijs en wolk op het einde van de module aan bod komen. Ook van de overige genoemde factoren benoemt Dirk waar deze in de module terugkomen, of waarom deze niet meedoen. Het weglaten van factoren beargumenteert hij door de temperatuur te beperken tot een langdurig en globaal-gemiddelde. Hij geeft aan te zullen beginnen met een heel eenvoudig model met alleen de invloed van de zon.

In het lesmateriaal zijn twee vragen opgenomen om na te gaan wat de ideeën zijn van leerlingen over het modelrekenen door de computer. In Dirks klas hebben zes van de negen leerlingen deze vragen beantwoord; zie Tabel 2. Twee leerlingen (2 en 6) merken op dat een computer het klimaat doorrekent. In de overige antwoorden zijn twee verschillende voorstellingen te onderscheiden. Twee leerlingen gebruiken in hun antwoord het idee dat het doorrekenen stapsgewijs gebeurt (leerlingen 3 en 4), zonder daarbij details te geven. De reacties van leerlingen 1 en 5 lijken te veronderstellen dat de computer een trend uit het verleden doorzet. Er ontbreekt echter een verwijzing dat er een zeker mechanisme

Tabel 2. Een computermodel volgens leerlingen uit de klas van Dirk.

#	<i>"leg zo nauwkeurig mogelijk uit hoe zo'n computermodel volgens jou werkt."</i>	<i>"Wat maakt zo'n model meer of minder betrouwbaar?"</i>
II1	Het gebruikt de metingen van vroeger om een voorspelling voor de toekomst te gaan doen. Daarbij houdt het rekening met heel veel factoren en hoe die zich door de tijd heen gedragen hebben.	De hoeveelheid gebruikte factoren
II2	berekent alle mogelijk factoren en gooit ze bij elkaar in zo'n model	veel verschillende factoren
II3	verleden, bepaalde verwachtingen (bijv. over CO ₂), constantes (uit berekeningen) die samen dan stapje voor stapje kijken wat er gebeurt.	aantal gegevens; over hoeveel tijd hij voorspelt
II4	het berekent de hele tijd nieuwe waarde van een bepaald iets uit bv temperatuur	gebruik maken van het verleden.
II5	De computer bekijkt eerst de veranderingen in de afgelopen jaren en trekt dit als het ware door richting de toekomst	meer betrouwbaar: veel gegevens van vroeger, nauwkeuriger.
II6	neemt veel verschillende factoren die het klimaat kunnen beïnvloeden. Berekent daarmee een bepaald klimaatsvoorzicht.	Wanneer je meerder factoren in je model stopt is het betrouwbaarder.

aan zo'n trend ten grondslag ligt. Vijf leerlingen benoemen het aantal gemodelleerde factoren als criterium voor de betrouwbaarheid. Eén leerling noemt gebruik maken van het verleden (leerling 4). Dit kan wijzen op het idee van het voorspellen van het verleden, dat in de derde cyclus gebruikt wordt, maar ook op de nauwkeurigheid van de gebruikte modelparameters (zoals bij leerling 5).

Evaluatie

De eerste analysevraag is of het verloop van de probleemverkenning betekenisvol verloopt. Daartoe zouden de leerlingen allereerst moeten inzien dat het doel om de temperatuur op aarde te voorspellen nastrevenswaardig is. In het bijzonder is beoogd dat leerlingen hun eigen kennis en inzichten hierover willen uitbreiden. Het doel van het getoonde journaalfragment is om hiervoor relevante leerlingreacties los te maken.

Uit Chris' uitvoering valt op te maken dat zijn leerlingen zoals beoogd problematiseren dat bepaalde kennis en inzichten over de klimaatvoorspelling in het journaalfragment ontbreken. De meeste benodigde noties (invoer, rekenwijze en betrouwbaarheid) benoemen Chris en Dirk echter zelf; alleen Chris' leerlingen thematiseren zelf de betrouwbaarheid van de voorspelling. Het kennisgat is bovendien niet duidelijk gerelateerd aan wat de leerlingen al wel en niet weten, maar aan de berichtgeving. Het is niet duidelijk of de episode de leerlingen nu echt gemotiveerd heeft om zelf de temperatuur te gaan modelleren.

Beoogd was dat de kennisbehoefte het voor de leerlingen de moeite waard maakt om zelf te gaan modelleren. Uit het verloop bij beide docenten is niet op te maken in hoeverre dit het geval is. Het inperken van klimaat tot temperatuur wordt wel benoemd, maar niet expliciet beargumenteerd. Het zelf voorspellen van de temperatuur wordt noch door de leerlingen, noch door de docenten expliciet benoemd als een manier om de genoemde thema's te exploreren. Dát de leerlingen de temperatuur op aarde gaan modelleren valt gedurende het lesverloop op te maken uit enkele uitspraken van de docenten. Er wordt echter geen globale vraagstelling geformuleerd voor de module.

De probleemverkenning zou leiden tot een concrete onderzoeksvraag voor de eerste modelleercyclus, hetgeen het inperken vereist tot de globaal-gemiddelde temperatuur en een afgebakende voorspelhorizon. De notie van een globaal-gemiddelde temperatuur komt alleen bij Dirk aan bod, tijdens het evalueren van de leerlingbijdragen aan het woordweb van mogelijke invloeden. De voorspelhorizon van 200 jaar wordt door geen van beide docenten benoemd.

Ten slotte moet gedurende de probleemverkenning de keus worden gemaakt om allereerst de bijdrage van de zon aan de huidige temperatuur te onderzoeken. De leerlingen komen met een groot aantal mogelijke factoren om in het model rekening mee te houden. Hoewel beide docenten wel spreken van vereenvoudigen, wordt niet de noodzaak geëxpliciteerd om een strategische keuze te maken hoe het modelleren van de grote verscheidenheid aan invloeden aangepakt moet worden. Alleen bij Chris identificeren de leerlingen zelf de zon als de grootste invloed; Dirk doet dit terloops zelf. Hoewel in beide uitvoeringen de zon wordt geselecteerd, wordt dit niet

gemotiveerd als een doelgerichte keuze. Zowel Chris als Dirk wijst er op dat vereenvoudigen hoort (in het lesmateriaal respectievelijk in de natuurkundeles), niet dat het nodig is. Dirk benoemt wel de inhoud van de laatste cycli, maar leidt het ontwikkelen van het eerste model in als ‘een eerste vereenvoudiging’. Ook Chris houdt het op de vage aanduiding ‘natuurkundig beschrijven’. In beide uitvoeringen wordt het specifieke doel van het eerste model niet benoemd.

Over het geheel genomen blijkt uit de beide uitvoeringen niet duidelijk dat het verloop betekenisvol is geweest voor leerlingen. De gewenste activiteiten zijn wel uitgevoerd, zoals een klassengesprek n.a.v. het videofragment en het inventariseren van relevante factoren, maar deze zijn niet logisch met elkaar verbonden. Bovendien zijn de benodigde inzichten slechts ten dele vastgesteld en is er geen precieze vraagstelling geformuleerd voor de eerste modelleercyclus. Blijkens Chris’ uitvoering heeft het gebruikte journaalfragment in ieder geval wel de potentie om een kennisgat te identificeren. Wellicht slaagt de docent er in om hiervan (deels) een leerlingprobleem te maken door gebruik te maken van de leerlingideeën hoe een computer werkt. In de antwoorden op de opgave hierover is onderscheid te maken tussen leerlingen die wel en geen causaal mechanisme veronderstellen. Dit kan verder gethematiseerd worden. In de huidige uitvoeringen kunnen we echter niet concluderen dat er sprake was van doelgerichte (en dus natuurwetenschappelijke) modelontwikkeling.

De tweede analysevraag betreft de constructieruimte voor leerlingen in de te volgen strategie. Dit zou moeten blijken uit de mogelijkheid voor leerlingen om eigen keuzes en beslissingen te maken die ook geëvalueerd worden. Zoals beoogd wordt in beide uitvoeringen een woordweb geconstrueerd met mogelijke invloeden waarmee, volgens de leerlingen, rekening gehouden moet worden in een model. Doordat een goedgedefinieerde vraagstelling ontbreekt, is een groot deel van de bijdragen niet ter zake en dus niet productief. Er is dus geen sprake van productieve constructieruimte.

De derde analysevraag betreft de constructieruimte voor leerlingen in de selectie van de zon als belangrijkste warmtebron. In Chris’ uitvoering maken de leerlingen zelf de keuze voor de zon als de belangrijkste invloed. De voortgang van het proces is dus in lijn met de (intuïtieve) leerlingkeuze om met de zon te beginnen. Voor zover het ontwerp het toelaat, is er bij Chris dus sprake van productieve constructieruimte. Bij Dirk ontbreekt deze.

Een opvallend verschil tussen beide uitvoeringen is de ruimte die de leerlingen hebben voor eigen inbreng. In Chris’ uitvoering is er ruime inbreng van leerlingen, terwijl de bijdragen van Dirks leerlingen nauwelijks van invloed zijn op het verloop van zijn betoog. Chris evalueert de inbreng veelal niet, maar bouwt wel voort op de bijdragen. De geboden constructieruimte is echter veelal niet productief: doordat een richtinggevend kennisgat en vraagstelling ontbreken, loopt zijn uitvoering over vele zijwegen. Dirk daarentegen krijgt weinig respons van zijn leerlingen, en probeert dan ook al snel niet meer om op basis daarvan een probleemstelling uit te werken; hij vertelt zelf het verhaal. De uitvoering van Dirk heeft veel meer structuur, maar laat weinig zien van de leerlingen.

3.3.4 Tweede episode: het 1-laagsmodel

Analysekader

In deze eerste modelleercyclus wordt het 1-laagsmodel ontwikkeld voor het verklaren van de huidige temperatuur op aarde. Dit model beschrijft de stralingshuishouding van een kaal planeetoppervlak, met de zonnestraling als enige bron van inkomende warmte-energie. De relevante energiestromen voor dit model zijn: instraling, reflectie, absorptie en (temperatuurafhankelijke) uitstraling. Een modelschets dient om de leerlingbijdragen aan het model te ‘fysicaliseren’ en om hen te ondersteunen de benodigde modelnoties te expliciteren. Bovendien kunnen de benodigde gegevens geïdentificeerd worden aan de hand van het modeldiagram. Om het model te specificeren, moeten leerlingen waarden schatten voor het albedo en de warmtecapaciteit. Het berekenen van de eindtemperatuur in het 1-laagsmodel moet een motief opleveren voor het construeren van een 1-laags computermodel (zie Figuur 8). Het model laat wel het gewenste gedrag zien, maar voorspelt een temperatuur die beduidend lager ligt dan de huidige globaal-gemiddelde temperatuur. Een volgende cyclus is dus nodig, waarin een verbeterd model een hogere temperatuur zal moeten opleveren.

Het beoogd verloop, besproken in 3.2.6, geeft aanleiding tot de volgende analysevragen:

1. Verloopt de ontwikkeling van het kwalitatieve model betekenisvol? Dit zou moeten blijken uit relevante leerlinginbreng, zoals dat het begrijpen van het causaal mechanisme nodig is om de toekomstige temperatuur te kunnen voorspellen.
2. Wordt er productieve constructieruimte gerealiseerd bij ontwikkelen van het fysisch model?
3. Wordt er productieve constructieruimte gerealiseerd als de leerlingen het albedo en de warmtecapaciteit schatten?
4. Verloopt de ontwikkeling van het computermodel betekenisvol? Dit zou moeten blijken uit relevante leerlinginbreng, zoals dat
 - veranderingen in principe algoritmisch doorgerekend kunnen worden;
 - het handmatig doorrekenen van het afkoelen of opwarmen een ondoenlijke taak is;
 - een computer het model snel en foutloos kan doorrekenen.

Uitvoering Chris

De gehele eerste cyclus duurt bij Chris tot halverwege les vier. Het ontwikkelen van een kwalitatief, fysisch model neemt ruim twintig minuten in beslag. Om simpel te beginnen – de titel van het eerste hoofdstuk in het lesmateriaal – hebben de leerlingen geconcludeerd dat de zon de meest relevante invloed is. De leerlingen bediscussiëren onderling de invloed van de zon op de temperatuur. Een aantal van de genoemde leerling-ideeën wijkt af van de gewenste inzichten voor het 1-laagsmodel.

1. **II2:** de zonnestraling geeft zijn energie aan eh nou ja.
2. **D:** de zonnestraling geeft zijn energie aan.. [*schrijft 'energie' bij zonnestralen*] zo? En die gaat hier naar toe? [*wijst naar de bordtekening*]
3. **II2:** ja, stralingsenergie en die wordt omgezet in warmte.
4. **II3:** ja.
5. **D:** dus wat van de zon komt is nog geen warmte?
6. **II1:** nee ja nee ja
7. **II:** nee die brengt de aarde in bew.. hoe heet het?
8. **II2:** jawel, warmte, want het is een vorm van energie.
9. **II3:** het is gewoon energie en die [...]
10. **II4:** de zon die stuurt volgens mij [zijn warmtestraling..]
11. **II5:** [...] in vacuüm.
12. **D:** de energie wordt warm?
13. **II:** is de warmte
14. **II2:** nee, wordt omgezet in warmte-energie
15. **II3:** het weerkaatst..
16. **D:** kaatst?
17. **II3:** het weerkaatst tegen de aarde, en dan houdt.. de broeikasgassen bepalen of het binnen blijft of niet.
18. **II4:** zie je, dus als er geen broeikasgassen zijn, dan zou het veel kouder zijn.
19. **II3:** en ozon dat breekt het wat af, en daardoor dat het wat minder wordt, maar ozon daar hebben we niet zo heel veel mee..

Fragment uit het klassengesprek m.b.t. de warmte van de zon. *Chris: les 1, 27'*

Als de leerlingen de afgifte van warmte door de zon in fysische termen duiden, geeft dit verwarring: is wat de zon uitstraalt al warmte, of moet dit nog warmte 'worden' (r. 1-5)? Twee leerlingen lijken zich op eerder verworven fysicakennis te baseren om het dilemma op te lossen. De bijdrage in r. 7 verwijst waarschijnlijk naar warmte als het bewegen van moleculen en atomen. Leerling 2 benoemt warmte als vorm van energie (r. 8, 14); door het begrip 'energie' te gebruiken verdwijnt het dilemma. Twee leerlingen hanteren een conceptueel model om de temperatuur op aarde te verklaren dat afwijkt van de fysische voorstelling. Zij menen dat de zonnestraling weerkaatst aan het oppervlak en ontsnapt, zodat broeikasgassen in het model noodzakelijk zijn om de warmte 'binnen' te houden (r. 15-19). Chris gaat hier niet op in.

De docent snijdt het onderwerp aan welke gegevens nodig zijn om met het model de temperatuur van de aarde uit te rekenen. Hij vraagt concreet naar de relevantie van het materiaal waaruit de aarde bestaat. De leerlingen relateren dit correct aan de mate van weerkaatsing en de mate van absorptie. Qua benodigde gegevens denken de leerlingen zelf aan de hoeveelheid broeikasgassen en de afstand tussen zon en aarde om de hoeveelheid ontvangen zonne-energie te bepalen. De docent reageert nu wel op de vermeende invloed van de broeikasgassen.

1. **Il3:** en dan de broeikasgassen in welke mate die tegenhouden of ook [...]
2. **D:** ja... [denkt na]
3. **Il3:** .. maakt het iets uit als ehm.. kijk die terugkaatsing, fijn, maar het gaat om wat er binnen blijft.
4. **D:** noem eens even een planeet zonder atmosfeer?
5. **Il:** Mercurius.
6. **Il2:** Pluto.
7. **Il3:** Maan.
8. **Il:** X.
9. **D:** X. en heeft planeet X ook een temperatuur?
10. **Il:** nee?
11. **Iln:** ja
12. **D:** ja, je kunt ook een temperatuur krijgen zonder broeikasgas, atmosfeer. Dus ik wil gewoon zon, aarde zonder ..

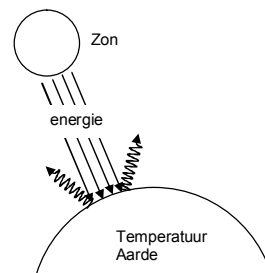
Fragment uit het klassengesprek m.b.t. relevante modelgegevens. *Chris: les 1, 29'*

Leerling 3 heeft het idee dat de temperatuur op een planeet afhangt van de energie die gevangen gehouden wordt door de atmosfeer van die planeet (r. 1, 3). De docent werpt tegen dat een planeet zonder atmosfeer toch een temperatuur heeft (r. 12), zonder in te gaan op de voorstelling van leerling 3. Hij houdt de atmosfeer en broeikasgassen buiten beschouwing, maar verwijst niet naar de eerder gemaakte afspraak over deze inperking.

De andere suggestie van de leerlingen, de afstand tussen zon en aarde, leidt tot een bespreking hoe berekend wordt welk deel van het uitgestraalde vermogen van de zon door de aarde ontvangen wordt. Eén leerling ziet dan in dat de temperatuur zal blijven stijgen als er alleen sprake zou zijn van absorptie van zonne-energie en concludeert dat de aarde ook warmte moet uitstralen. De docent tekent deze als 'golvende pijltjes' in het diagram op het bord. De bordschets is dan als in Figuur 13. In een aantal opzichten beantwoordt de tekening die Chris maakt niet aan de opzet. Hij presenteert het aardoppervlak half rond, en bij het tekenen van de aardbol markeert hij de ongelijke schaal waarop de zon en de aarde getekend zijn. Ondanks de eerder gemaakte inperkingen bespreekt hij toch de stand van de aardas.

De fysische voorstelling is nog niet voor alle leerlingen duidelijk en dat is onder andere het resultaat van de bordtekening.

1. **Il2:** hij straalt warmte uit.
2. **D:** dat zijn deze he [tekt golvende pijltjes *vanaf de aarde*]
3. **Il6:** die hebben we toch al getekend?
4. **D:** jullie waren een beetje onduidelijk over wat voor energie er binnen komt, dus teken ik een rechte pijl, en wat er uit gaat is in ieder geval warmtestraling. Dat doen we dan zo he, snappen we dat, die golfjes straling? Hehe.
5. **Il:** UV-straling, gamma-straling.



Figuur 13. Resulterende bordtekening voor 1-laags aarde.

6. **D:** gammastraling? Wat voor straling gaat er uit? In ieder geval?
7. **II:** warmte
8. **D:** warmtestraling, anders koelt hij niet af. Toch?
9. **II:** [maar een andere vorm van straling ...]
10. **D:** wat zeg je?
11. **II:** het zou kunnen zijn dat warmte wordt omgezet in een andere vorm van straling en dat dat dan zo uitgezonden wordt, maar..
12. **D:** ja, dat is waar.

Fragment uit het klassengesprek over warmte-uitstraling. *Chris: les 1, 35'*

Minstens één leerling begrijpt niet wat de docent bedoelt als hij de warmtestraling intekent (r. 3). Er is verwarring over de pijlen, omdat hier oorspronkelijk 'rechte pijlen' stonden om gereflecteerde zonnestraling weer te geven. Reflectie is nu uit de tekening verdwenen, de docent vervangt deze door de uitgestraalde warmte ('golvende' pijlen). De docent relateert dit aan verschillende soorten energie (r. 4), waarna een leerling denkt aan 'omzetting van straling' (r. 9, 11). De begrippen warmte, energie en straling worden nog niet op een heldere manier gebruikt.

Het klassengesprek vervolgt met de vraag wanneer in het model geldt dat de temperatuur gelijk blijft. Leerlingen komen met twee ideeën: of er moet gelden dat de in- en uitgaande stromen even groot zijn, of er is een constant verschil tussen de twee.

1. **II2:** ik denk al met al dat de temperatuur op aarde toch redelijk constant blijft.
2. [...]
3. **D:** wat betekent dat?
4. **II2:** dat de aarde bijna altijd evenveel uitzendt als die ontvangt.
5. **D:** ja.
6. **II1:** nee. Als die ontvangt? Nee..
7. **II2:** sst, hij knikte ja.
8. **D:** ja, ik knikte ja. Waarom niet?
9. **II1:** het is hetzelfde verschil, het verschil is hetzelfde.
10. **II2:** maar dat zeg ik toch
11. **II1:** nee het is niet 'hij zendt evenveel uit'.
12. [...]
13. **II8:** hoe zorgt hij dan voor warmte als hij evenveel energie uitgooit als dat er op komt?

Fragment uit het klassengesprek m.b.t. de modelsituatie bij een evenwichtstemperatuur.

Chris: les 1, 36'

Een constant verschil (r. 9, 13) suggereert het idee dat een deel van de inkomende energie 'nuttig gebruikt' moet worden om de temperatuur op aarde te realiseren. De docent gaat niet in op de verschillen met het eigenlijke fysische mechanisme, maar poneert dat voor evenwicht de in- en uitstraling aan elkaar gelijk moeten zijn.

Het model wordt gekwantificeerd aan de hand van de opgaven in het lesmateriaal. Deze worden ook klassikaal besproken. De opgaven waarin gevraagd wordt een waarde te schatten voor het gemiddeld albedo en de warmtecapaciteit zijn veelal alleen beantwoord met een uitkomst voor de schatting en in alle leerlingboekjes is steeds dezelfde waarde ingevuld. Aannames voor het maken van de schattingen zijn slechts een enkele maal benoemd en zijn ook dan weer identiek. Dit kan er op duiden dat de leerlingen de opgaven niet eerst voor zichzelf hebben gemaakt, maar ‘geprofiteerd’ hebben van de plenaire bespreking. Het kan echter ook het resultaat zijn van de wijze waarop de plenaire bespreking geleid wordt. Chris vraagt leerlingen wel naar suggesties voor de te maken aannames, maar het klassengesprek wordt vervolgens een ‘afvalrace’ om de beste over te houden. De leerlingsschattingen voor het albedo leveren een breed spectrum aan waarden, dat gedurende de klassikale bespreking echter wordt teruggebracht tot een door de docent gekozen waarde.

1. **D:** nee, je moet uitkomen op... ik dacht 0,30 of zoiets. 0,33. Wie heeft het geprobeerd te berekenen?
2. [een aantal leerlingen steekt de hand op]
3. **D:** de aarde is voor 2/3 water, en water zit tussen 0,07 en 0,20 dan wat zit er tussenin? 0,15. Dat is 2/3 van de aarde.
4. **Il:** en ik had 0,17.
5. **D:** hoeveel van de aarde is bewolkt? Dat moet je weten. Want wolken hebben een heel hoog albedo.
6. **Il:** 1/10? 20%? 30?
7. **D:** wie biedt er meer?
8. **Il:** 70?
9. **D:** 70%, wie biedt er minder?
10. **Il:** 50%.
11. **D:** 50%, pak en beet. Als 50% van de aarde al wolk is, dan hebben die dus al een albedo van...
12. **Il:** ja maar wolken kunnen toch ook boven de oceaan zitten? Dan is er geen 2/3 water meer.
13. **D:** dan is jouw huiswerk 2/3 oceaan 1/3 land, van die 2/3 oceaan is de helft is bewolkt, van het land is ook de helft bewolkt. Dan van het land doe je... 1/3 van het land is gras waarvan de helft bewolkt. Naaldbos, loofbos, een beetje woestijn. Allemaal voor de helft bewolkt, behalve die woestijn. En dan reken je het lekker uit en dan zorg je dat je uitkomt op 0,30. Zullen we dat afspreken, 0,30? Je moet niet te eigenwijs doen, he?
14. **Il:** meneer, de ene keer moet het heel precies en dan ga ik het eens heel precies doen en dan wordt het weer niet gewaardeerd.

Fragment voor het schatten van een globaal-gemiddeld albedo. *Chris: les 2, 16'*

De leerlingen zouden hier voldoende invulling kunnen geven aan de beoogde vrijheid om met een eigen albedowaarde te werken. Bij de aanvang van het fragment stelt de docent echter een waarde als norm (r. 1). Hij geeft wel een

indicatie van de wijze van berekening (r. 3, 5, 13), maar deze fungeert als een onderbouwing ‘achteraf’: het verandert niets aan de mogelijke uitkomst. Het vaststellen van de bijdrage door wolken aan het albedo krijgt geen onderbouwing, maar lijkt meer een koehandel (r. 5-11). Hoewel daardoor wel duidelijk is dat er een slag om de arm gehouden mag worden wat betreft de waarde van 0,3, doen de eigen schattingen van leerlingen er niet meer toe. Voor de leerling die protesteert (r. 14) is het niet duidelijk welke onzekerheidsmarge nu eigenlijk acceptabel is.

Voor het schatten van de warmtecapaciteit van de aarde is gegeven dat er aannames gemaakt moeten worden over de diepte en de samenstelling van de aardlaag. Onder verwijzing naar achtergrondinformatie in het lesmateriaal (over metingen van Minnaert) beargumenteert een leerling een diepte van 50 cm. Andere leerlingen vinden deze waarde te laag en suggereren enkele meters. Een leerling heeft al een waarde voor de warmtecapaciteit uitgerekend bij een diepte van 10 meter. De docent staat open voor de verschillende mogelijkheden, maar wil wel dat alle leerlingen dezelfde aannames gebruiken om geen verwarring te krijgen. Na elke leerlingsuggestie gaat de docent akkoord met de genoemde waarde, maar steeds komt hij daar op terug als een volgende leerling een andere waarde noemt. Uiteindelijk moet iedereen de waarde gebruiken waarmee al door een leerling is gerekend.

Op basis van de aanwijzingen uit het lesmateriaal construeren de leerlingen werkende Powersimmodellen. In les 3 zijn de leerlingen, na een demonstratie door de docent, begonnen met het bouwen van een Powersimmodel voordat zij de opgaven hebben gemaakt die hen daarvoor de reden moesten geven. De docent heeft hen dus te vroeg aan een computermodel laten werken. Het is dan ook niet vreemd dat er geen aanwijzingen zijn dat de leerlingen van tevoren een inhoudelijk motief hadden om een computermodel te maken. Ook in de data die het onderwijs tijdens en na het bouwen van het computermodel beslaan, zijn de benodigde inzichten niet allemaal herkenbaar.

Het gekopieerde leerlingmateriaal (vier exemplaren) geeft geen goed beeld van het functioneren van de opgaven in het lesmateriaal die moeten leiden tot het stapsgewijs doorrekenen van het afkoelen van de aarde, omdat de opgaven merendeels niet zijn beantwoord. Eén leerling komt tot een correcte evaluatie van het intuïtieve lineaire verband, $E(t) = E_{begin} + (P_{in} - P_{uit}) \cdot t$, terwijl een andere geen verschil ziet met het verwachte verloop voor afkoeling.

In de klassikale bespreking van de opgaven ná de constructie van het Powersimmodel is er in ieder geval één leerling die zich afvraagt hoe het verloop genoteerd moet worden.

1. **D:** Wat voor grafiek had je verwacht? Wat had er uit moeten komen?
Wat voor.. wat is vraag d. Wat voor soort grafiek had je verwacht?
1. **Il:** zo een als die je in Powersim simuleert?
2. **D:** ja, maar hoe heet zo'n ding?
3. **Il:** een hyperbool.
4. **D:** doe eens voor met je handen in de lucht, dat iedereen dat snapt?
5. [De leerling gebaart een temperatuurverloop.]

6. **D:** zo [gebaart een temperatuurverloop] als je begint met 'n koude aarde, en als je met een warme aarde begint? Zoiets ja, dat had er eigenlijk uit moeten komen.
7. **II1:** waarom doet die dat dan niet?
8. **II2:** omdat dit een lineair verband is.
9. **II1:** ja maar hoe moet het dan?

Fragment uit de bespreking van het doorrekenen van het modelgedrag. *Chris: les 3, 12'*

Voor de leerlingen is duidelijk hoe het proces van opwarmen zou moeten verlopen (r. 2, 6, 7) en ook welke grafiek het resultaat is van een lineaire afname (r. 9). Leerling 1 ziet duidelijk dat het lineair verband niet volstaat, maar begrijpt niet hoe het verloop wél genoteerd moet worden (r. 8, 10). In het vervolg op dit fragment leidt een opmerking over een eerdere rekenfout het gesprek van dit onderwerp af. De docent komt er ook niet meer op terug.

In een gesprek met de onderzoeker blijkt dat leerling 3 het rekenprobleem dat opgelost moet worden goed kan benoemen.

1. **II3:** in dit model [het intuïtieve lineaire verband] is er dus... Ik vind dat die P_abs... kijk, die [dat verband] gaat er vanuit dat de temperatuur als die meer wordt, dat heeft geen effect op de... lijkt het.
2. **O:** ..op de..?
3. **II3:** op de P_straling.
4. **O:** want? Wat zou er moeten gebeuren?
5. **II3:** die zou dus meer moeten worden naarmate de temperatuur meer wordt, en daardoor wordt die lijn constant.
6. **O:** oke.
7. **II3:** En dat zit wel hier in [het Powersimmodel]. Dus hoe komt het dat dat daar dan niet in zit? Want P_straling is wel gedefinieerd. Alleen...
8. **O:** maar hoe is P_straling gedefinieerd?
9. **II3:** dat gaat er vanuit dat de temperatuur constant is
10. **O:** juist.
11. **II3:** terwijl die moet veranderen.
12. **O:** Hoe verandert die in Powersim dan, waar gebeurt dat?
13. **II3:** ehm, door de energie. Deze heeft een [lijntje op, en deze...].

Fragment uit gesprek tussen leerling en onderzoeker. *Chris: les 3, 15'*

Leerling 3 begrijpt goed dat het intuïtieve lineaire verband niet werkt voor het berekenen van een af- of toenemende modeltemperatuur (r. 1-5). Het Powersim-schema toont haar de verbinding tussen energie en temperatuur (r. 13), waardoor (kennelijk) de temperatuur niet constant verondersteld hoeft te worden. Het stapsgewijs rekenen, zoals dit in Powersim gebeurt, wordt echter niet concreet benoemd.

Leerling 1, die zich in de plenaire bespreking afvroeg hoe het afkoelen wiskundig beschreven moest worden, heeft moeite om dit stapsgewijs doorrekenen van het Powersimmodel te herkennen omdat de tijdstappen in Powersim verborgen blijven. De leerling heeft ondertussen een werkend Powersimmodel van de 1-laagsaarde.

1. **O:** jij stelde daarstraks de vraag van.. die grafiek, dat is nou wel wat je wilt zien, in principe; je wilt iets wat zo loopt, maar dat kwam niet uit die formule.
2. **II1:** ja, precies, en dat vind ik een beetje wonderlijk.
3. **O:** want die formules staan wel in het model, ook.
4. **II1:** ja, maar ze spelen ook weer op elkaar in of zo, maar is dat dan niet in die formule daar?
5. **O:** waar zit het verschil nou in? Hoe kan het dat je daar een lineair verband krijgt en dat je hier [*in het Powersimmodel*] dus iets krijgt dat naar een evenwichtswaarde toegaat?
6. **II1:** maar in principe zou je deze formules toch... want je hebt hier de waarde en je hebt de formules. Die zou je daar in moeten kunnen vullen, maar dan krijg je niet hetzelfde als wat daar staat.
7. **O:** wat bedoel je met in elkaar invullen?
8. **II1:** nou kijk, je hebt deze waardes, je hebt [...hierin] zitten.
9. **O:** wat? Je hebt..?
10. **II1:** je hebt deze waardes. Je hebt de formules die hierin zitten. Dus als je die op de goede manier invult, bijvoorbeeld energie_aarde is..
11. **O:** ja? Wat is het?
12. **II1:** ehm.. is P_zon en dan.. en albedo samen in de formule, daar.
13. **O:** ja.
14. **II1:** en dan.. ho.
15. **O:** maar dat is toch wat er op het bord ook staat?
16. **II1:** ja, maar dat wil ik ook niet. Want welke [...] E_o plus T min... Waar staat de tijd? Waar hebben we de tijd verwerkt? Er staat geen tijd hierin. In het model zit hier geen tijd, en [toch beschouwen we] de tijd.
17. [De onderzoeker toont haar de Equations View in Powersim, waar te zien is dat de stroomgrootheden vermenigvuldigd worden met Δt . De leerling vraagt zich af in welk opzicht de formules voor de in- en uitstroom verschillen van het intuïtieve lineaire verband.]
18. **O:** waarom is die [*relatie*] lineair?
19. **II1:** ehm... omdat P_abs en P_str dat zijn vaste dingen. Maar wacht even, want ze zijn niet vast want ze hebben invloed op elkaar. De E, energie van de aarde, die heeft ook weer invloed op de P_uit.
20. **O:** ja.
21. **II1:** maar dat staat daar nu niet in.
22. **O:** nee. Als je nou.. stel dat je dit nou uitrekt..
23. **II1:** dus dus het is een soort van terugkoppeling! [...]
24. **O:** en dat gebeurt dus niet in deze formule. Die blijft met constante waarden...
25. **II1:** ja, want P_str die verandert in die formule niet, wat hij eigenlijk wel doet in.. Eigenlijk is die afhankelijk van T, maar [...] want de temperatuur is daar een getal, terwijl hier die temperatuur juist een

uitkomst is van E... Grappig! Maar kan je dus wat er hier... de grafiek die er hier [inbouwt, kan je die niet als een gewone manier] opschrijven, aangezien het hier een [...] formule is? Of kan je een recursieve formule opschrijven?

- 26. **O:** je kunt 'm opschrijven.
- 27. **II1:** hoe dan?
- 28. **O:** dan.. als je energie op tijdstip t wilt weten, dan moet je dus P_{straling} op $t-1$ weten. En wil je P_{straling} op $t-1$ weten, dan heb je dus weer de energie nodig van $t-1$. En die hangt weer af van..
- 29. **II1:** van $t-2$.
- 30. **O:** juist. En dat is in formulevorm te vangen, maar je kunt het niet in een keer uitrekenen. Je kunt het pas op een volgende tijdstap uitrekenen, als je de vorige wist.
- 31. **II1:** ja. Maar dus dan moet je er 1 ergens hebben... ja.

Fragment uit het gesprek tussen leerling en onderzoeker. *Chris: les 3, 45'*

De leerling ziet in dat, om de afkoeling te beschrijven, met de verandering zelf rekening gehouden moet worden (r. 4, 6, 22). Ook begrijpt ze dat dit in een lineair verband niet gebeurt, en dat dit dus geen correcte beschrijving is (r. 1-4, 11-16). Haar Powersimmodel geeft wel een correct verloop (r. 1). Hoewel de temperatuur en daarmee de uitstraling blijkbaar wel met de tijd veranderen, laat Powersim geen tijdafhankelijkheid zien (r. 16). Gegeven een startwaarde zou volgens de leerling een recursieve relatie het verloop moeten kunnen beschrijven (r. 25, 31).

Later, in een klassikale bespreking van de uitkomsten van de Powersimmodellen, leggen Chris' leerlingen wel uit waarom een temperatuurverloop beschreven moet worden met een veranderende temperatuur, maar er wordt niet gepreciseerd hoe dit gebeurt in Powersim.

Aan de evaluatie van het 1-laagsmodel besteedt Chris ongeveer 10 minuten. Hij bespreekt de opbrengsten van het 1-laags Powersimmodel. Op basis van de uitkomsten van verschillende leerlingmodellen concludeert Chris dat de evenwichtstemperatuur niet afhangt van de beginsituatie (een koude of een warme start). De leerlingen evalueren de evenwichtstemperatuur als te laag, omdat het model te eenvoudig is. Ze sommen alle beperkingen op die ze aan het begin gemaakt hebben. De docent benoemt dat "het idee" dat in het model geëxpliciteerd is, wél correct is.

Uit het lesmateriaal zelf maken de leerlingen op dat ze nu de atmosfeer gaan toevoegen om een beter model te krijgen; dat blijkt uit de titel voor de tweede cyclus. De docent expliciteert de modelleerstappen 'ontwerpen', 'bouwen' en 'testen' voor de tweede cyclus, en laat de leerlingen benoemen welke activiteiten bij elke stap uitgevoerd zijn gedurende deze eerste cyclus.

Uitvoering Dirk

De eerste cyclus wordt in les drie afgerond. De ontwikkeling van het kwalitatieve model duurt nog geen vijf minuten. In voorgaande episode had Dirk de mogelijk

relevante invloeden ingeperkt tot de zon. Hij maakt een situatieschets op het bord, zoals in Figuur 7, zonder hiervan het doel te verduidelijken. Het volgende fragment is illustratief voor de interactie tussen Dirk en zijn leerlingen.

1. **D:** we gaan het dus vereenvoudigen tot iets heel simpels, namelijk we willen iets natuurkundigs gaan doen met een eenvoudig model, [*tekent zon, aarde en pijl zon - aarde*] en dat mag zo eenvoudig zijn dat we gewoon even een platte aarde denken. Maakt niet uit, het gaat gewoon om die zon, om die aarde, .. oh, dit kan niet het totale model zijn. Waarom niet? Er moet nog een pijl bij. Waarom? [...] Als dit het totale model was, als we hier wat formules in gaan stoppen zo, dan gaat het fout.
2. **Il:** want dat zou betekenen dat de aarde.. dat het alleen maar warmer wordt.
3. **D:** precies, dus er moet ook energie uitgaan. En in welke vormen gaat het er uit?
4. **Il:** infrarood.
5. **D:** infraroodstraling. Maar wat hebben we zo bij sneeuw en ijs?
6. **Il:** weerkaatsing.
7. **D:** je hebt ook een deel weerkaatsing. Dus je hebt twee soorten er uit. En als er iets in gaat, dan gebeurt er iets met de aarde, en dan gaat er ook iets uit. Maar wat voor dingen gaan er in en uit?
8. **Il:** energie.

Fragment uit het klassengesprek m.b.t. het kwalitatief fysisch model. *Dirk: les 1, 26'*

De leerlingen wordt vooral gevraagd om de juiste bewoordingen te kiezen (r. 3, 5, 7). Alleen voor de analyse van het modelgedrag beargumenteert een leerling dat de aarde warmte moet kwijtraken om niet een steeds stijgende temperatuur te hebben (r. 2). Het initiatief in het gesprek ligt steeds bij de docent.

De ideeën van de leerlingen over het fysisch mechanisme voor het eerste model komen niet aan bod. Van de benodigde modelspecificaties noemt Dirk alleen de warmtecapaciteit.

Er is geen opname van de les waarin het model gekwantificeerd wordt. Er is ook geen lesopname van Dirks uitvoering waarin het rekenen met Powersim gethematiseerd wordt; wel is er het gekopieerde lesmateriaal. Van de negen leerlingen hebben acht een goede grafiek voor het afkoelen getekend, als een geëxpliciteerde verwachting over het modelgedrag. Na het berekenen van de energiestromen in het model concluderen vijf leerlingen correct dat de temperatuur in het ontwikkelde 1-laagsmodel moet dalen. Twee daarvan beschrijven de afname van de energie-inhoud met een intuïtief lineair verband zoals verwacht, namelijk $E(t) = E_{\text{begin}} + (P_{\text{in}} - P_{\text{uit}}) \cdot t$. Na het vergelijken van de verwachte grafiek met de grafiek die met dit verband wordt beschreven komt slechts een van de twee leerlingen tot de conclusie dat de uitstraling niet constant gehouden mag worden. Twee andere leerlingen, die geen lineair verband hebben geformuleerd en onderzocht, beantwoorden de vraag waarom het doorrekenen van het afkoelen problematisch is met “onnauwkeurigheden” en “toen hield je nog niet rekening met

andere factoren”. Zij relateren de evaluatie dus niet aan de rekenwijze, maar lijken op goed geluk een antwoord te wagen. Het handmatig doorrekenen van het afkoelen gedurende een aantal tijdstappen gebeurt door een leerling die de inleidende opgaven niet gemaakt heeft, terwijl nog weer een andere leerling de stapsgewijze rekenmethode evalueert. Een video-opname ontbreekt van de les waarin deze opgave besproken wordt, waardoor een beter beeld van het functioneren van deze opgave ontbreekt.

Dirk besteedt ongeveer 15 minuten aan de modevaluatie. Hij evalueert het 1-laagsmodel wanneer nog niet alle leerlingen een werkend Powersimmodel hebben. Aan de hand van een eigen Powersimmodel gaat Dirk na dat het gedrag van het model in overeenstemming is met de verwachtingen. Ook betreft hij het gebruik van geschatte parameterwaarden in de evaluatie. Hiertoe wijzigt hij de waarden van het albedo en de warmtecapaciteit. Zo laat hij zien dat het model zelfs een te lage temperatuur voorspelt als er geen reflectie is.

Een van Dirks leerlingen formuleert een genuanceerd oordeel over het 1-laagsmodel.

1. **D:** De vraag is natuurlijk: is dit model goed genoeg? Dat is de hoofdvraag voor vandaag, eigenlijk: is dit model goed genoeg? Of: is het goed, laat ik het zo zeggen, of het goed is. Is het model goed?
2. [leerlingen knikken van nee]
3. **Il:** hij is wel goed, maar..
4. **D:** moet er een streep door?
5. **Il:** nee.
6. **D:** er hoeft geen streep door? Waarom niet?
7. **Il:** nou, het klopt wel als je geen rekening wilt houden met de atmosfeer en dat soort dingen, dan klopt die.
8. **D:** precies, als je daar allemaal geen rekening mee wilt houden.

Fragment uit de klassikale evaluatie van het 1-laagsmodel. *Dirk: les 3, 10'*

De leerling waardeert het gemodelleerd mechanisme in principe positief (r. 4-7), hetgeen Dirk bevestigt (r. 8).

Vervolgens bespreekt hij met de leerlingen wat een voor de hand liggende modeluitbreiding zou zijn.

1. **D:** wat moet er bij in het model? Of hoeft er niets bij? Nou niet tevreden zijn! Oke, hij doet wel wat, maar.. Het albedo veranderen helpt niet voldoende, maar wat moet er bij? Ik heb het al laten zien [*verwijst naar het laten zien van het totaalmodel in de eerste les*], kom op!
2. **Il1:** iets met bewolking of zo
3. **D:** iets met bewolking er in...
4. **Il2:** de atmosfeer.
5. **D:** een atmosfeer. Dat lijkt mij verrekte handig. Toch maar iets met een atmosfeer doen, want die hadden we helemaal niet. Juist, dus.

Fragment uit de vooruitblik op de modeluitbreiding. *Dirk: les 3, 17'*

De suggestie van leerling 1 om bewolking te modelleren (r. 2), is verrassend. De docent bespreekt deze suggestie niet inhoudelijk. Als leerling 2 met de atmosfeer komt (r. 4), blijkt uit de reactie van de docent dat dit wel het gewenste antwoord is. Toch beargumenteert Dirk niet waarom de ene beter is dan de andere.

Evaluatie

De eerste analysevraag is of de ontwikkeling van het kwalitatieve model betekenisvol verloopt. Hiertoe zouden de leerlingen moeten inzien dat een causaal mechanisme nodig is voor een betrouwbare temperatuurvoorspelling. Deze notie was in de voorgaande cyclus bij een aantal leerlingen niet herkenbaar in hun antwoord op de vraag waarop een computervoorspelling van het klimaat gebaseerd is (Tabel 2). Om de huidige temperatuur te verklaren komen de leerlingen niettemin met ideeën waarin zo'n mechanisme herkenbaar is. In zoverre lijkt de ontwikkeling van het model betekenisvol voor de leerlingen. Er blijkt echter niet of de leerlingen ook inzien hoe op basis van een causaal model een temperatuur berekend kan worden.

De tweede analysevraag is of er productieve constructieruimte gerealiseerd wordt bij het ontwikkelen van het fysisch model. Dit zou moeten blijken uit de mogelijkheid voor leerlingen om eigen keuzes en beslissingen te maken die ook geëvalueerd worden.

Bij Chris krijgen de leerlingen de mogelijkheid om bij te dragen aan het formuleren van het model, maar daardoor blijkt ook dat er nog serieuze tekortkomingen zijn in het temperatuurbegrip van sommige leerlingen:

- energie moet 'gevangen' zijn in of onder de atmosfeer;
- er is geen temperatuur mogelijk als alle inkomende energie ook weer verdwijnt. Een constant verschil tussen in- en uitgaande energiestromen geeft een soort 'nuttige warmte' als basis van de temperatuur. Warmteverlies is dan niet temperatuurafhankelijk, maar een variant op onmiddellijke reflectie van inkomende zonnestraling.

Het is relevant om op deze denkbeelden te reageren; helaas doet Chris dit niet. Het blijft dan ook onduidelijk in hoeverre het kwalitatief fysisch model goed begrepen wordt door de leerlingen. Van de benodigde noties is niet duidelijk of leerlingen inzien dat de temperatuur op aarde samenhangt met de hoeveelheid warmte in de aarde. Leerlingen hebben geen problemen om de zon als belangrijkste warmtebron te identificeren en om vast te stellen dat de aarde warmte moet uitstralen. Dat een evenwichtstemperatuur mogelijk is, lijkt voor alle leerlingen wel duidelijk. Echter, anders dan verwacht relateren sommige leerlingen dit aan een constant verschil tussen in- en uitstroom. Het is niet duidelijk of de gehanteerde berekening van de temperatuur voor deze leerlingen betekenisvol is geworden.

Dirks uitvoering laat geen constructieruimte voor de leerlingen; hij construeert het model grotendeels zelf.

Beoogd was dat de bordtekening functioneel zou zijn om productieve constructieruimte te realiseren. De tekening die Chris maakt geeft echter meer fysische eigenschappen van het systeem weer dan beoogd: de aarde blijft bolvormig,

en de verschillende typen pijlen drukken verschillende soorten energie uit. De verschillende fysische eigenschappen van de ingaande en uitgaande straling doen eigenlijk niet ter zake, alleen de grootte van de energiestromen. Juist daarmee blijkt een aantal leerlingen moeite te hebben. De beoogde tekening is echter ook niet geheel adequaat om dat aspect te benadrukken: de grootte blijkt niet uit de weergave van de pijlen. In het lesmateriaal zelf is dit overigens anders; daar heeft de breedte van de pijl deze functie. Een belangrijke inperking van het beoogde model is dat de aarde globaal-gemiddeld beschouwd wordt. Dit wordt in Chris' uitvoering nergens met zoveel woorden benoemd en dit blijkt ook niet uit de tekening.

In beide uitvoeringen blijkt uit de evaluatie van het Powersimmodel voldoende duidelijk wat de beperkingen zijn van het 1-laagsmodel. Alleen Dirk neemt in de evaluatie ook de modelschattingen mee. Leerlingen maken goed onderscheid tussen het modelgedrag (dat goed is, zodat het basismechanisme ook wel goed zal zijn) en de eindtemperatuur (die te laag is). Hoewel er geen echte keuzevrijheid was in de modelontwikkeling, nemen de leerlingen zo toch verantwoordelijkheid voor het mechanisme.

De derde analysevraag betreft de constructieruimte voor de leerlingen bij het schatten van het albedo en de warmtecapaciteit.

Beoogd was dat leerlingen ruimte zouden hebben om hun eigen waarden te vinden en te gebruiken. Om alle benodigde gegevens te kunnen specificeren is het klassikaal bespreken van de opgaven voor leerlingen nodig. In het ingenomen leerlingmateriaal zijn de meeste leerlingantwoorden voor de specificatie-opgaven (inclusief die waarin om een schatting gevraagd wordt) identiek, hetgeen er op wijst dat die leerlingen de opgaven hebben beantwoord op basis van de plenaire bespreking in plaats van als voorbereiding op de bespreking. Leerlingen hebben de opgaven vaak niet zelfstandig gemaakt, vermoedelijk omdat zij sommige opgaven te moeilijk vonden, maar ook omdat ze er onvoldoende of geen tijd aan hebben besteed.

De wijze van bespreken laat echter ook geen ruimte om leerlingwerk 'kwalitatief' na te kijken. De docenten doen de gevraagde berekeningen voor: ze geven zowel de berekeningen als de uitkomsten. Deze uitkomsten fungeren niet als antwoordmogelijkheid (immers, de precieze waarde is afhankelijk van de gehanteerde aannames) maar als het beste antwoord. Zij vragen de leerlingen niet om alleen de wijze van berekening te vergelijken met de eigen berekening.

Beide uitvoeringen focuseren op een enkele waarde als uitkomst, waardoor er dus geen spreiding overblijft in de uitkomsten. Het is begrijpelijk dat dit voor zowel leerlingen als docent een aantrekkelijk verloop is. De leerlingen zijn tevreden omdat hun antwoord gegarandeerd goed is en voor de docent is het praktisch dat leerlingen met gelijke waarden werken. Er is echter geen sprake van productieve constructieruimte.

De vierde analysevraag is of de ontwikkeling van het computermodel betekenisvol verloopt.

De leerlingen construeren werkende Powersimmodellen als ze de aanwijzingen uit het lesmateriaal volgen. In het lesmateriaal was een opgave opgenomen die het motief moest oproepen voor het gebruik van Powersim. In de concrete uitvoering

heeft Chris echter Powersim al geïntroduceerd voordat de leerlingen het beoogde motief hebben kunnen ontwikkelen.

De vraag resteert of een inhoudelijk motief opgeroepen had kunnen worden. Zowel het klassengesprek bij Chris over het doorrekenen van het afkoelproces als de gesprekken tussen de onderzoeker en de individuele leerlingen wijzen er op dat het doorrekenen voor de leerlingen een betekenisvol probleem kan worden. Een aantal leerlingen geeft er blijk van dat hen wel duidelijk is waarom het rekenen met een lineair verband als $E(t) = E_{\text{begin}} + (P_{\text{in}} - P_{\text{uit}}) \cdot t$ het afkoelen niet goed beschrijft. In de gesprekken met de leerlingen blijkt echter niet overtuigend dat ze ook begrijpen hoe in een Powersimmodel stapsgewijs gerekend wordt. In het onderwijsontwerp is dit ook onvoldoende uitgewerkt.

De eerste modelleercyclus als geheel overziend, merken we op dat de beide uitvoeringen nog niet de gewenste invulling hebben. Het doelgerichte karakter van de activiteiten is in Chris' uitvoering niet altijd expliciet, of zelfs afwezig (als de leerlingen een computermodel gaan bouwen voordat de noodzaak daarvoor duidelijk is). Zijn uitvoering verloopt rommelig; het is te merken dat een duidelijk doel ontbreekt op basis waarvan de leerlingbijdragen geëvalueerd worden. Doordat hij het modeldoel niet centraal stelt, worden veel zijpaden bewandeld. In het onderwijsontwerp zelf is bovendien onvoldoende geanticipeerd op afwijkende ideeën van leerlingen over het mechanisme voor de temperatuur op aarde. Het verzamelen van de benodigde noties voor het 1-laagsmodel verliep niet zo vanzelfsprekend als (impliciet) verwacht werd. Dirks uitvoering heeft een veel bondiger verloop, omdat hij zich strikt houdt aan de beoogde ontwikkeling van het modelleerproces. Hij betoogt voornamelijk zelf wat er voor het model nodig is, waardoor hij, meer dan Chris, wel een natuurwetenschappelijk modelleerproces laat zien, maar waarin de leerlingen zelf weinig participeren. Daardoor is er nauwelijks zicht op wat leerlingen wel en niet zelf kunnen, of in hoeverre het verloop betekenisvol is. Ook is er geen sprake van productieve constructieruimte.

Er wordt duidelijk benoemd dat uitbreiding van het model met een atmosfeer de volgende modelleerstap is. Echter, niet omdat dit voor de leerlingen de meest voor de hand liggende stap is, maar omdat het lesmateriaal en de docent dit de geschikte uitbreiding vinden. Alleen Chris probeert de benodigde activiteiten voor de tweede cyclus te expliciteren door de leerlingen te laten reflecteren op het modelleerproces.

3.3.5 Derde episode: het 2-laagsmodel

Analysekader

In de tweede cyclus wordt de atmosfeer als een tweede laag toegevoegd aan het 1-laags Powersimmodel. De atmosfeerlaag geeft een extra warmtestroom naar de aarde. De leerlingen tekenen de atmosfeer en de energiestromen die daar bij horen in Powersim en specificeren de benodigde gegevens. De waargenomen temperatuur valt binnen de onzekerheidsmarges van dit model. Ook gedraagt het model zich zoals gewenst. Het model voldoet dus als model voor de huidige temperatuur.

Het beoogd verloop, besproken in 3.2.7, geeft aanleiding tot de volgende analysevragen:

1. Verloopt de ontwikkeling van het 2-laagsmodel betekenisvol voor de leerlingen? Dit zou moeten blijken uit relevante leerlinginbreng, zoals dat de werking van de atmosfeer (in termen van het fysisch mechanisme van het eerste model) tot een grotere energie-instroom leidt aan het aardoppervlak.
2. Wordt productieve constructieruimte gerealiseerd als de leerlingen het 2-laags Powersimmodel construeren?
3. Wordt productieve constructieruimte gerealiseerd als de leerlingen de warmtecapaciteit schatten?

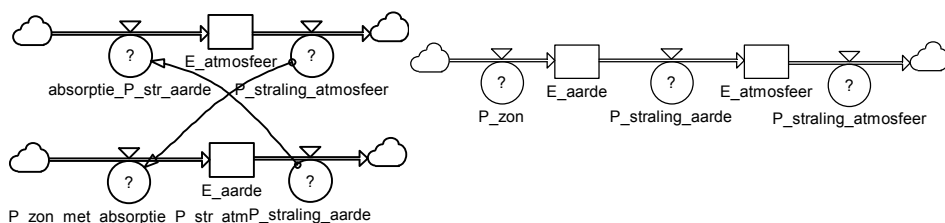
Uitvoering Chris

De tweede cyclus duurt tot en met les zes.

Gedurende de vierde les werken de leerlingen van Chris in kleine groepjes aan een deel van de opgaven over de benodigde modelgegevens; het andere deel is voor hen huiswerk. De groepjes beginnen met de vraag of de (evenwichts)temperatuur van de atmosfeer hoger of lager zal zijn dan die van de aarde. In elke groep leidt deze vraag tot discussie. Er zijn leerlingen die beargumenteren dat de lucht over het geheel genomen kouder is dan de aarde. Er zijn echter ook leerlingen die zich het opwarmende effect van de atmosfeer alleen kunnen voorstellen als de atmosfeer een hogere temperatuur heeft. Hoewel leerlingen het er op basis van hun ervaring over eens worden dat de temperatuur lager moet zijn, blijft een verklaring voor de opwarmende werking achterwege. Het mechanisme van de werking van het 2-laagsmodel is geëxpliciteerd in het lesmateriaal, op basis waarvan de leerlingen het Powersimmodel ontwikkelen.

Hoewel de leerlingen nog niet toe zijn aan het schetsen van de benodigde Powersim-structuur besluit Chris de les met een bespreking van het globale Powersim-diagram voor de 2-laagsaarde. Chris stuurt de klassikale bespreking van de benodigde Powersimstructuur voor de 2-laagsaarde in de richting van het ontwerp, zoals links in Figuur 14. De leerlingen merken echter op dat de uitstraling van de aarde ook direct verbonden kan worden aan de energievoorraad van de atmosfeer, zoals rechts in Figuur 14. De leerlingen gebruiken de stromingsmetafoor hier correct (hoewel de stroompijlen nog wel aangevuld moeten worden voor een goed

Figuur 14. Beoogde (links) en alternatieve (basis-)structuur voor de 2-laagsaarde.



totaalmodel). Niettemin houdt de docent er aan vast dat alle leerlingen op de door hem voorgestelde wijze het 2-laagsmodel in Powersim weergeven.

In les vijf gaan de leerlingen achter de computer hun Powersimmodel construeren. Er zijn geen opnamen van de individuele leerlingactiviteiten. Huiswerkopgaven m.b.t. de modelspecificaties worden niet meer plenair besproken. Bij het ontwerpen van het 2-laagsmodel hoeven de leerlingen alleen een schatting te maken voor de waarde van de warmtecapaciteit. Chris laat één leerling een waarde uitrekenen, en laat de overige leerlingen met deze waarde werken.

In les zes laat Chris zijn leerlingen het model testen op de gevoeligheid voor de verschillende modelparameters. Verschillende leerlingen doen verschillende tests; de resultaten worden op een vel voor in de klas genoteerd. Voor het testen is eerst afgesproken met welke standaard- parameterwaarden elk model gespecificeerd wordt.

Chris' leerlingen concluderen zelf dat het model aan de verwachtingen voldoet. Chris verbindt de modelresultaten met de vraagstelling. Hij benoemt dat de uitkomsten van het model nog geen toekomstvoorspelling zijn: het resultaat van het 2-laagsmodel is een punt, terwijl voor de toekomstige temperatuur een trend nodig is.

Uitvoering Dirk

De tweede cyclus loopt tot en met les zes.

De leerlingen van Dirk hebben als huiswerk meegekregen om aan de hand van de opgaven in het lesboek aan het 2-laagsmodel te werken; dit betreft opgaven voor het bepalen van de benodigde relaties en waarden. Minstens de helft van de leerlingen heeft het huiswerk echter niet gemaakt. Leerlingen die wel de opgaven zelfstandig hebben proberen te maken, kregen problemen met het bepalen van de warmtecapaciteit van de atmosfeer. Dit is voor Dirk aanleiding om het 2-laagsmodel plenair te specificeren. In de klassikale behandeling van de opgaven neemt hij zelf het voortouw; leerlingen komen niet aan bod om eigen antwoorden te formuleren. Leerlingantwoorden in het gekopieerde lesmateriaal zijn duidelijk ontleend aan de antwoorden van de docent in de klassikale bespreking.

Alle leerlingen hebben als evaluatiecriteria genoteerd dat in het model evenwicht moet ontstaan en dat de temperatuur van de atmosfeer lager moet zijn dan die van de aarde. Een leerling licht dit toe met “werkt als een deken”. Dit antwoord en deze toelichting komen overeen met wat er in de klas is besproken. Er blijkt echter niet uit hoe de hogere temperatuur verklaard moet worden in termen van energiestromen. In een latere opgave wordt gevraagd of het model in evenwicht is als de temperatuur van de atmosfeer gelijk is aan die van de aarde. Geen van de leerlingen beredeneert hoe het systeem zich gaat gedragen. Een leerling geeft het verband tussen de beide evenwichtstemperaturen ($T_{\text{atm}} = \sqrt{2} \cdot T_{\text{aarde}}$); dit kan hij echter alleen achteraf ingevuld hebben, als de verhouding tussen beide is onderzocht. Drie leerlingen stellen dat het model in evenwicht zal zijn als aarde en atmosfeer een gelijke temperatuur hebben. Zij merken niet op dat hun conclusie afwijkt van hun voorspelling.

De absorptie van warmtestraling door de atmosfeer is een fractie van wat de aarde uitstraalt. Zowel door de docent op het bord als door de leerlingen in hun lesmateriaal wordt dit correct genoteerd als is $\varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot A$ (met A het totale oppervlak). Drie leerlingen noteren nog dat dit gelijk is aan $390 \cdot \varepsilon$, waarbij 390 gelijk is aan de uitstraling van de aarde bij de huidige globaal-gemiddelde temperatuur: zij specificeren hier dus een constante grootte in plaats van een temperatuurafhankelijke relatie.

We bekijken het fragment over het schatten van de warmtecapaciteit.

1. **D:** dan hebben we alleen nog het probleem van de warmtecapaciteit, omdat sommigen net zeiden 'daar komen we niet uit'. De warmtecapaciteit van de atmosfeer. En dat ga ik eigenlijk niet voordoen, want dat is hetzelfde als de warmtecapaciteit van de aarde. Die heb ik ook al voorgedaan, het is wel goed met jullie. [Noteert op het bord $C=c \cdot m$]. Welke moet je hier nemen? Die voor lucht. En de massa van de lucht, dat is weer gewoon dichtheid maal volume. [Noteert $\rho \cdot V$]. Hoe groot is het volume? Ja, gewoon oppervlakte maal hoe dik de luchtslaag is. Ja, hoe hoog is de lucht? Of hoever willen we de lucht meenemen, eigenlijk? Hoeveel lucht willen we meenemen? Kies maar, dan gaan we wel kijken wat het beste er uit komt.
2. **ll1:** 200 kilometer.
3. **D:** dat maakt dus eigenlijk geen.. niet zo heel veel uit. 200 kilometer? Als jij 200 kilometer neemt dan begin ik wel eventjes hard achter mijn oren.. want als je dat gaat rekenen met de warmtecapaciteit [bedoeld wordt: de soortelijke warmte] van de lucht, ja welke lucht? De lucht hier, met deze luchtdruk. En dat vermenigvuldigen we met de dichtheid van de lucht, ja hier. Dat kan in elk geval niet op 200 kilometer meer. Dat kun je je wel voorstellen.
4. **ll2:** 30.
5. **D:** dus, ja, tot welke hoogte heeft het nog wel zin? Nou goed, we vereenvoudigen gewoon tot de hoogte waarin het weer plaatsvindt. De troposfeer. Hoe hoog is de troposfeer? Dat is ANW.
6. **lln:** bij ANW mag je altijd je boek erbij houden!
7. **D:** Als je een kilometer of 10 of 20 neemt, dan heb je heel redelijk.. En dan kom je op een getal dat ongeveer wel lijkt op het getal voor de atmosfeer van de aarde. Als ik hem berekende, kwam ik uit op 13 maal de oppervlakte. Maal 10 tot de zesde, bedoel ik. Terwijl bij de aarde was dat 3 maal tien tot de zesde. Maar nogmaals, neem je eigen getal, want je zult zien dat het heel weinig uitmaakt voor het uiteindelijke resultaat.

Fragment uit het klassengesprek over het schatten van de warmtecapaciteit van de atmosfeer. *Dirk: les 5, 16'*

Anders dan aangekondigd geeft de docent toch de lijn van berekening zelf en expliciteert hij welke aannames gemaakt moeten worden. Waarden die de leerlingen geven voor de hoogte van de atmosfeer zijn niet onderbouwd. Hoewel de docent

eerst stelt dat de waarde er niet zoveel toe doet (r. 3), worden de suggesties van de leerlingen wel door de docent geëvalueerd. De waarde waar uiteindelijk mee gerekend wordt, geeft hij zelf.

Drie leerlingen hebben in hun lesmateriaal een schets van het Powersimmodel gemaakt. Alle drie hebben de hoofdstructuur voor de atmosfeerlaag getekend zoals beoogd. Andere modelelementen (zoals de warmtecapaciteit of ϵ) zijn niet herkenbaar. Het ontwerp van het modeldiagram wordt niet plenair besproken.

Van twee leerlingparen uit Dirks klas is het construeren van het 2-laags Powersimmodel vastgelegd. De beide koppels hebben ongeveer 25 minuten nodig om een werkende eerste versie van het model te bouwen. Het constructieproces verschilt echter nogal.

Het eerste koppel is te karakteriseren door hun 'mechanisch kopiëren'. De opgave uit het lesmateriaal luidt:

schets een Powersimmodel van de atmosfeerlaag. Je kunt hiervoor dezelfde structuur gebruiken als in Figuur 10 van de vorige paragraaf [*afbeelding van het 1-laagsmodel in Powersim*], maar een andere opzet is ook mogelijk.

De leerlingen tekenen de figuur van het 1-laags Powersimmodel precies na, zonder aandacht te besteden aan de betekenis van de symbolen. Als de grafische elementen op het scherm staan, kennen ze er de namen aan toe.

1. **II1:** dat is eh..
2. **II2:** P_uit..atmosfeer.
3. **II1:** dat staat al, E_atmosfeer.
4. **II2:** o ja, [...]. Constante [*een Powersimelement*], die was..[...].
5. **II1:** invallend vermogen.
6. **II2:** nee, maar die intensiteit was ook niet.. volgens mij.
7. **II1:** nou oke, dan haal je 'm weg.
8. [...]
9. **II2:** warmtecap. Oke. Constante_12 is..?
10. **II1:** sigma. Maar ik weet niet welke constante dat is?
11. **II2:** dat is volgens mij gewoon sigma. Maar dat is de constante van boltzmann.
12. **II1:** maar moet die ook in de atmosfeer? Zal wel. En dit is temperatuur_atmosfeer.
13. **II2:** ja, of is dat.. is dat dat ene tekenetje?
14. **II1:** rondje_twee, dat is eh..
15. **II2:** ha, rondje_twee. Is..?
16. **II1:** temperatuur_atmosfeer. En dat is albedo, die constantie_10.
17. **II2:** is albedo. Ja, of is dat dan.. oepsie. Ach, we noemen 'm wel albedo.
[Dat is makkelijk te veranderen]. Zo.

Fragment uit het bouwen van het 2-laags Powersimmodel door het eerste koppel. *Chris:*
les 5, 28'

Alle symbolen moeten geïdentificeerd worden met de beschikbare modelementen. Bovendien moeten de leerlingen van elk element nagaan of deze nog wel thuishoort bij de atmosfeerlaag. Elk vergt een eigen afweging: de zoninstraling (r. 4-7), de constante van Boltzmann (r. 9-12) en het albedo (r. 16, 17). De naamgeving lijkt de leerlingen niet te bepalen bij de fysica die hier aan de orde is. De absorptie van warmtestraling vormt zoals bedoeld de instroom voor de atmosfeer; deze verbinding kan de leerlingen niet ontgaan omdat ze in specificatie van de instroom staat. De leerlingen vergeten echter wel de warmtestraling van de atmosfeer naar de aarde te leiden, de essentie van de werking van de atmosfeer. In de uitstraling ontbreken de emissiecoëfficiënt en een factor twee (voor het naar twee kanten uitstralen van de atmosfeerlaag), die toch ook in de modelspecificaties staan.

De docent heeft een belangrijk aandeel in het bouwen. Bij aanvang van de opdracht vervangt hij het 1-laagsmodel van de leerlingen door dat van hemzelf, zonder hiervoor een duidelijke reden te geven. Als het 2-laags Powersimmodel – met fouten – voor de eerste keer gerund wordt, roepen ze de docent er bij voor een beoordeling van het model. De leerlingen merken op dat de temperatuur van de atmosfeer lager is dan die van de aarde; dit is in overeenstemming met hun verwachtingen die bij aanvang van de cyclus zijn geëxpliciteerd. Dirk constateert dat de temperatuur voor de aardlaag in het model nog steeds te laag is. Het koppel identificeert vervolgens zelf dat de energiestroom van de atmosfeer naar de aarde ontbreekt. De docent haalt de kleinere fouten eruit door de ingevoerde formules te controleren. Met behulp van de docent eindigt het koppel nog dezelfde les met een werkend model.

Het tweede koppel lijkt meer inzichtelijk te werk te gaan. Deze leerlingen proberen de variabelen te plaatsen die ze in de ontwerpfasen zijn tegengekomen.

1. **II2:** dan weten we dus hoeveel er in gaat. Dan moeten we weten hoeveel er.. ja, wat gaat er uit? Er gaat dus eh..
2. **II1:** dat is $P_{\text{straling_aarde}}$ min $P_{\text{absorptie_atmosfeer}}$. En $P_{\text{reflectie}}$. Dus die gaat er uit, die gaat er uit en die gaat er uit.
3. **II2:** ja maar we hebben hier die nieuwe formule, deze. Twee maal..
4. **II1:** maar dan moet je even die oppervlakte_aarde zo..
5. **II2:** twee keer oppervlakte van de aarde keer..
6. **II1:** die emissiecoëfficiënt, dus dan moet je die ook even een pijl bij doen.
7. **II2:** en die moet dan.. keer emissiecoëfficiënt.
8. **II1:** maal T tot de macht 4.
9. **II2:** eh, ja.
10. **II1:** dus dan moeten we die eigenlijk ook nog even hebben. Maar die $T_{\text{atmosfeer}}$..
11. **II2:** wat staat daar [...]
12. **II1:** dus moeten nu eerst eigenlijk die $T_{\text{atmosfeer}}$.. en hoe weten we die ook al weer? Dan hebben we eerst die warmtecapaciteit nodig.

13. **II1:** de warmte is c maal m maal T . Dus als we eerst die warmtecapaciteit berekenen.

Fragment uit het bouwen van het 2-laags Powersimmodel door het tweede koppel. *Dirk:*
les 5, 25'

Dit fragment is exemplarisch voor vrijwel het gehele constructieproces van dit koppel. Bij het bouwen van het model geven ze elk modelement ook direct een zinnige naam en voeren ze de numerieke waarde of formule in. Zij praten over de ontwikkeling van hun model aan de hand van de gegeven namen. Zij doen minder vaak een beroep op de docent. Voor het oplossen van problemen en fouten controleert het koppel zelf alle verbindingen en ingevoerde waarden en formules.

Beide koppels lopen tegen het probleem aan dat zij, om het model door te rekenen, een startwaarde moeten invoeren voor de energie-inhoud van de atmosfeer. Beide koppels roepen hiervoor de hulp in van de docent. Het eerste koppel vraagt de docent specifiek om “de” juiste waarde voor de temperatuur van de atmosfeer. In plaats van een model dat naar evenwicht zal gaan, zoeken de leerlingen (wellicht niet bewust) op voorhand naar de evenwichtsconditie. De leerlingen hadden kunnen nagaan dat met een willekeurige startwaarde begonnen kan worden, zowel op basis van het 1-laagsmodel als door het gedrag te beredeneren bij een te hoog of te laag gekozen temperatuur.

Het redeneren over het modelgedrag gebeurt slechts sporadisch. Het volgende fragment geeft er een voorbeeld van. De onderzoeker vraagt de leerlingen uit het tweede koppel om het verloop van de temperatuur in een Powersim-grafiek te verklaren.

1. **O:** kun je verklaren waarom hij eerst even naar beneden stort en dan pas naar boven gaat?
2. **II2:** ehm. Hoe kunnen we dat verklaren? Nou, eh..
3. **O:** wat gebeurt er in je model wanneer de temperatuur naar beneden gaat? Wat betekent dat?
4. **II2:** dat er meer..
5. **II1:** dat er minder..
6. **II2:** ..energie wordt afgestaan dan erin komt.
7. **O:** dus er gaat in eerste instantie meer uit dan in.
8. **II2:** ja.
9. **O:** en hoe komt het dat hij te weinig in heeft?
10. **II2:** misschien absorbeert de atmosfeer eerst teveel? Of nee, wacht even, want dan wordt er ook meer uitgestraald.
11. **II1:** ja, want dan heb je ook meer uitstraling.
12. **O:** wat bepaalt of die eh.. want kijk hier. Hij begint op ongeveer dezelfde waarde als waarop die uitkomt, dus hij komt daar wel in evenwicht.
13. **II2:** ja.

Fragment over het temperatuurgedrag. *Dirk: les 6, 10'*

Het redeneren gebeurt hier op initiatief van de onderzoeker, en het gaat nogal moeizaam. In het vervolg op dit fragment is alleen de onderzoeker aan het redeneren over het modelgedrag. De docent en het eerste koppel doen dit helemaal niet.

In totaal hebben drie van Dirks leerlingen de testopgaven beantwoord. Hierin wordt gevraagd om de gevoeligheid van het model te onderzoeken voor veranderingen in het albedo en de absorptie- en emissiecoëfficiënt, en de gevoeligheid in het albedo te vergelijken met die in het 1-laagsmodel. Een leerling voert de test uit zoals gevraagd wordt. De beide andere leerlingen concluderen uit de testen alleen dat de temperatuur hoger of lager wordt als een van de parameters verandert.

Als Dirk de evaluatiefase introduceert, hebben nog niet alle leerlingen hun eigen model af. Alvorens te evalueren voorziet Dirk zijn leerlingen van vier verschillende weergaven van het 2-laags Powersimmodel, om zo te garanderen dat alle leerlingen een werkend model hebben om op voort te bouwen en om te wijzen op de flexibiliteit in de modelrepresentatie.

De docent begint de evaluatie door op voorhand vast te stellen dat het model de gewenste temperatuur voorspelt – ook al hebben nog niet alle leerlingen een werkend model. Verder gaat hij na dat het modelgedrag aan de gewenste eisen voldoet, en bespreekt hij hoe in het model een opwarmend effect wordt gerealiseerd.

1. **D:** Eerst maar eens even kijken naar dit model. “doet het model wat je ervan mag verwachten?” Degenen die het al afhadden, en degenen die het al bekeken hebben: doet dat 2-lagenmodel wat je ervan verwacht? Hij gaat naar evenwicht toe. Dat deed hij, he? En dat evenwicht, was dat verschillend voor atmosfeer en..?
2. **Il:** *[knikt bevestigend]*
3. **D:** ook nog eens verschillend. En er komt ook nog eens uit dat de temperatuur van de atmosfeer lager lag.
4. **Il:** *[knikt bevestigend]*
5. **D:** allemaal dingen die wij erin bouwen komen er ook nog eens uit. Ja, eigenlijk hebben we het erin gestopt, dus komt het er ook uit. En: zonder atmosfeer kwam er iets van 255 uit, met die albedo van 0,2 geloof ik, en nu kwam die..?
6. **Il:** 288
7. **D:** op 288 precies? In elk geval hoger; 't hoeft niet precies op die waarde te zitten, dat is ook niet belangrijk want het is toch niet een klaar model, maar hij kwam in elk geval hoger uit: met een atmosfeer komt de temperatuur hoger uit. Is dat ook logisch?
8. **Il:** *[stilte]*
9. **D:** waarom eigenlijk? Daar hebben we het gisteren ook al over gehad, maar als je een atmosfeer er boven bouwt, waarom verwachten we dan ook dat de temperatuur van de aarde dat [hoger] is? Kom op, een ding kon je meteen zien: een van die P's...
10. **Il:** *[er was terugkaatsing]*

11. **D:** ..kwam terug van de atmosfeer, dus er kwam wat extra in de aarde bij. Terugkaatsing. Nou niet zozeer terugkaatsing, maar omdat de atmosfeer ook een temperatuur heeft en die straalt niet alleen naar boven maar naar beneden ook. Dus er komt wat bij in. En dus, ja. Vraag 3:b “is het model goed genoeg”? Nou ja, jij zegt van er komt 288 uit, nou, da’s mooi. Maar je kunt er nog niet mee voorspellen, dus we zijn er nog lang niet. Als je alleen maar wilt weten van hoe zit het nu, als je die albedo een beetje verandert of zo, of die epsilon die verandert wat, of de zon gaat plotseling minder fel stralen; nou, dan kun je met dit model aardig wat onderzoeken. Maar als je wilt voorspellen doordat het broeikas versterkt wordt, dan moet je er toch andere dingen instoppen en zo. [opgave] C: “vind je dit model een bruikbare weergave van de werkelijkheid”? Is die bruikbaar? Zeg eens wat, kom op. Is die bruikbaar?
12. **Il:** best wel
13. **D:** best wel?
14. **Il:** ja
15. **D:** voor eenvoudige dingen.. nou. Maar niet voor de toekomst.

Fragment uit de klassikale evaluatie van het 2-laagsmodel. *Dirk: les 6, 5'*

In het fragment is te herkennen om welke redenen de docent het model goedkeurt. Het modellerenproces wordt dus inzichtelijk gemaakt. Echter, de leerlingen maken niet hun eigen afwegingen: alleen de docent trekt de benodigde conclusies.

Gegeven dat het model een acceptabele uitkomst geeft, gaat Dirk direct terug naar de hoofdvraag (r. 11). Dit introduceert een volgende cyclus.

Evaluatie

De eerste analysevraag is of de ontwikkeling van het 2-laagsmodel betekenisvol is voor de leerlingen. Uit de discussies tussen leerlingen over de te verwachten hoogte van de temperatuur van de atmosfeer blijkt dat zij nog geen duidelijk idee hebben hoe het effect van de atmosfeer op de temperatuur van de aarde beschreven moet worden. Het is bovendien mogelijk dat leerlingen met ongewenste ideeën over temperatuur en warmte de werking ervan conceptualiseren. In de evaluatie van het 2-laagsmodel benoemt bijvoorbeeld een leerling de extra warmtestraling nog als “terugkaatsing”. Dat kan er op wijzen dat de leerling nog steeds het idee hanteert dat energie gevangen blijft tussen de beide lagen. Doordat de leerlingen niet de ruimte hebben gekregen om hun eigen ideeën te bespreken en te evalueren, valt het te betwijfelen in hoeverre de ontwerp opdrachten in het lesmateriaal voor de leerlingen betekenisvol waren. Een belangrijk manco in het onderwijsontwerp is dat leerlingen niet de gelegenheid krijgen om hun ideeën over de werking van de atmosfeer te expliciteren in een kwalitatief model, zoals wel is gebeurd voor de 1-laags aarde.

De tweede analysevraag is of er productieve constructieruimte is gerealiseerd voor het construeren van het 2-laags Powersimmodel. Dit zou moeten blijken uit de mogelijkheid voor leerlingen om eigen keuzes en beslissingen te maken die ook geëvalueerd worden.

Beoogd was dat leerlingen in deze tweede cyclus met enige mate van zelfstandigheid zouden toepassen wat zij in de eerste cyclus van het modellerproces en de vakinhoud hadden gebruikt. In de praktijk blijken ze te weinig de mogelijkheid te krijgen om dit te laten zien. De constructieruimte voor de leerlingen is daardoor niet gerealiseerd. Zowel het ontwerp als de begeleiding door de docenten is hier debet aan.

Het ontwerp biedt onvoldoende mogelijkheid voor de leerlingen om een kwalitatieve analyse van de werking van de atmosfeer te bediscussieren.

In hun begeleiding beperken Chris en Dirk elk op eigen wijze de inbreng van de leerlingen aan het modellerproces. Chris begint veelal met het verzamelen van hun inbreng, of het nu gaat om hun ideeën over de modelstructuur of over de waarde van een modelparameter. Steeds perkt hij de bijdragen echter in totdat er één overblijft die alle leerlingen moeten volgen. Dirk stelt zich meer op als een voorbeeld-modelleur. Hij expliciteert zijn overwegingen zoveel mogelijk en benoemt de overwegingen die de rode lijn door het modellerproces moeten verduidelijken. Steeds is hij echter zelf degene die de verantwoordelijkheid neemt voor het proces, en niet de leerlingen. Ook als de leerlingen zelfstandig achter de computer werken, intervineert hij vaak. Gedurende deze interventies neemt hij de bediening van de computer over om de leerlingconstructies te verbeteren. Uiteindelijk laat het bouwen en testen van het tweede koppel uit Dirks' klas zien dat de leerlingen heel behoorlijk zelfstandig hun model kunnen construeren.

Bij de evaluatie van het model hebben de leerlingen wel de inbreng die beoogd was. De leerlingen zijn het er over eens dat het model de huidige globaal-gemiddelde temperatuur kan voorspellen, maar ook dat het evenwicht dat het model oplevert niet geschikt is voor toekomstvoorspellingen. Chris en Dirk thematiseren beiden het voorspellen van de toekomstige temperatuur zoals bedoeld, uitgaande van de evenwichtstoestand die in het 2-laagsmodel gerealiseerd wordt. De evaluatie van het model vormt zo een productieve start voor de derde cyclus.

De derde analysevraag betreft het schatten van de warmtecapaciteit van de atmosfeer. Hiervoor is het relevant te weten tot welke hoogte de atmosfeer meegerekend moet worden. Dirks leerlingen wagen twee keer een gok voor een acceptabele hoogte, maar de docent domineert de schatting. Zijn terloopse opmerking dat de precieze waarde er weinig toe doet ondermijnt zijn eigen goed- of afkeuring van de aangedragen waarden. Bovendien is het een signaal dat leerlingen geen verantwoordelijkheid hoeven te nemen voor de schatting. Het is echter op de eerste plaats de schatvraag zelf (dus: het ontwerp) die het probleem geeft. De docent heeft gelijk dat de precieze waarde er niet toe doet om met het model de huidige temperatuur te voorspellen. Een evaluatie van de schatting is niet mogelijk. Een schatting beargumenteren is echter pas relevant als deze wel consequenties heeft.

Terugkijkend moeten we concluderen dat de tweede cyclus niet adequaat is vormgegeven. Het causaal mechanisme voor de werking van de atmosfeer wordt niet expliciet besproken en de schatting van de warmtecapaciteit is eigenlijk niet functioneel. Daardoor is maar ten dele voldaan aan de voorwaarden voor een

betekenisvol verloop. Het doel van de cyclus is voor de leerlingen duidelijk, maar er zijn vraagtekens te plaatsen of de leerlingen echt zicht op succes hebben gehad. Daarvoor moeten ze toch inzien dat het fysisch mechanisme uit het 1-laagsmodel bruikbaar is om de werking van de atmosfeer te beschrijven. De opgaven in het lesmateriaal zijn hier zonder meer van uitgegaan. Hoewel de leerlingen aan de hand van deze opgaven het beoogde 2-laagsmodel hebben ontwikkeld is het de vraag wáár in het modelleringsproces zij het inzicht krijgen hoe de opbouw van de cyclus leidt tot de gewenste verklaring van de temperatuur. De benodigde noties voor de modevaluatie zijn in ieder geval wel duidelijk geëxpliciteerd. Dirk heeft als docent een prominente rol in het gehele proces, hetgeen de constructieruimte voor de leerlingen sterk beperkt; Chris slaagt er beter in om de leerlingen in het modelleringsproces te betrekken.

3.3.6 Vierde episode: toekomstvoorspellingen met scenario's

Analysekader

Om de toekomstige temperatuur te voorspellen moet rekening gehouden worden met veranderende omstandigheden. Een bekende verandering is de CO_2 -concentratie in de atmosfeer. In het 2-laagsmodel is het plausibel om te veronderstellen dat de CO_2 -concentratie de absorptie- en emissiecoëfficiënt ε beïnvloedt. Om betrouwbaar de toekomst te voorspellen moet het model ook veranderingen uit het verleden goed kunnen weergeven. Voor de relatie tussen de CO_2 -concentratie en ε zijn verschillende parametrisaties mogelijk zodanig dat het 2-laags Powersimmodel de temperatuur vanaf 1800 tot 2000 goed voorspelt bij het verloop van de CO_2 -concentratie in dat tijdvak. Leerlingen construeren verschillende scenario's voor de toekomstige CO_2 -concentratie en rekenen deze door. Zowel het doorgerkende scenario als de gebruikte relatie tussen de CO_2 -concentratie en ε zijn een bron van onzekerheid in de voorspelde temperatuur.

Het beoogd lesverloop, besproken in 3.2.8, geeft aanleiding tot de volgende analysevragen:

1. Verloopt de probleemverkenning betekenisvol voor de leerlingen? Dit zou moeten blijken uit relevante leerlinginbreng, zoals dat
 - een toekomstvoorspelling gebaseerd is op een verwachting over het verloop van relevante processen op aarde (zoals de CO_2 -uitstoot);
 - de stijgende CO_2 -concentratie een relevante invloed is voor de toekomstige temperatuur;
 - de CO_2 -concentratie de temperatuur in het 2-laagsmodel kan beïnvloeden middels de absorptie- en emissiecoëfficiënt.
2. Verloopt het modelonderzoek betekenisvol voor de leerlingen? Dit zou moeten blijken uit relevante leerlinginbreng, zoals dat
 - historische gegevens gebruikt kunnen worden om historische veranderingen te evalueren;

- de toekomstige CO₂-concentratie het resultaat is van mondiaal politieke, economische, sociologische en technische ontwikkelingen, die onbekend zijn maar waarvoor wel verschillende trends geschetst kunnen worden.
- 3. Wordt productieve constructieruimte gerealiseerd als het verloop van de CO₂-concentratie gemodelleerd wordt?
- 4. Wordt productieve constructieruimte gerealiseerd om een scenario te maken?

Uitvoering Chris

De derde cyclus duurt tot en met les negen.

Nadat de leerlingen het 2-laagsmodel hebben getest en geëvalueerd benoemt Chris dat het resultaat van het 2-laagsmodel een punt is, terwijl voor de toekomstige temperatuur een trend nodig is. Leerlingen dragen zelf bij aan het identificeren van elementen die bruikbaar zijn voor de verdere modelontwikkeling.

1. **D:** hoe weet je of het model een trend kan voorspellen?
2. **II1:** dan moeten er nog meer factoren zijn, of factoren veranderen.
3. **II7:** ja maar hoe weet je dat?
4. **II5:** als je dingen invoert uit het verleden en dan kijk je of..
5. **D:** wat zeg je? Sst, luister naar haar, het is het goede antwoord.
6. **II5:** als je dingen uit het verleden invoert en dan laat je het lopen en dan kijk je of het klopt met... nu.

Fragment met betrekking tot het voorspellen van de toekomst. *Chris: les 6, 47'*

Chris' vraag (r. 1) heeft als resultaat dat leerlingen 1 en 5 twee belangrijke aspecten benoemen voor de verdere cyclus: verandering in de temperatuur als resultaat van veranderende factoren en het simuleren van het verleden als criterium voor de modelbetrouwbaarheid. Leerling 5 licht verderop in het gesprek toe dat ze zich het terugvoorspellen herinnert als een opmerking van de docent uit een van de eerdere lessen. Een andere leerling benoemt dat, om het verleden te reproduceren, meetwaarden uit het verleden verzameld moeten worden. De inhoud van de nieuwe modelleercyclus wordt niet geïdentificeerd; de leerlingen zien pas bij het uitvoeren van de opdrachten dat de CO₂-uitstoot gemodelleerd wordt.

De leerlingen werken gedurende twee en een halve les in koppels aan het CO₂-model. Hiervan zijn geen data. In les negen toont de docent de uitkomsten van zijn eigen model op de beamer, en wordt dit model geëvalueerd. In het lesmateriaal zijn vier mogelijke relaties beschreven tussen de CO₂-concentratie en de absorptie- en emissiecoëfficiënt ϵ . De verschillende temperatuurstijgingen als gevolg van ieder van de vier relaties worden in één grafiek getoond en besproken. Bij de beoordeling van de modelresultaten en de vier verschillende relaties maken de leerlingen gebruik van zowel correcte als incorrecte argumenten.

1. **II4:** hier, dat is D [*relatie 4*].
2. **D:** is D dan beter?
3. **II4:** ja.
4. **D:** waarom?

5. **II4:** omdat die langzamer naar een vaste temperatuur blijft.. hij bereikt uiteindelijk een evenwicht.
6. **II2:** ja maar die anderen bereiken ook uiteindelijk een evenwicht. Ze zijn allemaal van die s-grafieken.
7. **II1:** maar het is toch raar dat dat juist in 200 jaar zou stabiliseren?
8. **D:** ja, 200 jaar is natuurlijk niks.

Fragment met betrekking tot de uitkomsten van de vier relaties. *Chris: les 9, 25'*

Sommige leerlingen vinden D de beste relatie. Volgens leerling 4 gaat bij relatie D de temperatuur naar evenwicht (r. 5). Dit lijkt te contrasteren met het resultaat van de andere relaties, maar dat komt door een vertekend beeld dat de Powersim-grafiek geeft. Het bereik van de temperatuurgrafiek schaal automatisch met de laatste simulatie (die van relatie D), en verband D geeft de laagste temperatuur. De temperaturen van de andere modelruns worden daardoor niet tot het einde van de looptijd getoond, met als gevolg dat de andere relaties niet zichtbaar afvlakken. Het is echter niet juist dat de andere relaties geen evenwicht zouden opleveren. Leerling 2 benoemt dit correct (r.6).

In het vervolg op het fragment brengt leerling 2 brengt wel een ander argument naar voren ten faveure van relatie D: de andere relaties kunnen leiden tot een ε groter dan 1 (bij hoge waarden voor de CO₂-concentratie). Dit is in principe een goede overweging. Niet besproken wordt dat elke relatie in principe een beperkt geldigheidsbereik heeft; zo wordt ε in de relatie D negatief bij lage waarden voor de CO₂-concentratie.

In het voorgaande fragment klinkt nog een andere beoordeling door: leerling 1 acht het onwaarschijnlijk dat het systeem, ongeacht de grootte van de verandering, steeds binnen het tijdbestek van de looptijd praktisch in evenwicht is (r. 7). Chris bevestigt dat 200 jaar een (te) korte tijdschaal is (r. 8). De opmerking van leerling 1 is bruikbaar om de eenvoud van de gemodelleerde relatie ter discussie te stellen, en zo de overgang te maken naar het modelleren van terugkoppelingen: het onderwerp voor de volgende cyclus. Chris legt echter een ander accent: de onwenselijkheid van een hoge temperatuur. Dit is echter geen goede reden om een model te accepteren of te verwerpen.

1. **D:** waarom zeggen jullie dat [relaties] 1, 2 en 3... waarom keuren jullie die af?
2. **II:** omdat we dat uitgerekend hebben.
3. **II2:** omdat D [relatie 4] de goede formule is. Want anders komt epsilon boven 1.
4. **D:** zou het mogelijk kunnen... Je zegt instinctief ergens van dat 1, 2 en 3 ja dat is te heet, dat kan niet waar zijn. Dat geloof ik niet. En dan leg je het model op zij. Of het model is fout.
5. **II2:** of beide.
6. **II1:** er kunnen nog veel meer factoren zijn.
7. **D:** er kunnen nog veel meer factoren zijn, ja. Zoals?
8. [...]

9. **D:** maar als je 1, 2 en 3 niet vertrouwt en 4 wel, dan vertrouw je er dus eigenlijk niet op dat het zo warm wordt. Dat die zo warm blijft worden. Dus dan zoek je eigenlijk iets dat de aarde.. toch weer een beetje..
10. **II8:** afkoelt.

Fragment met betrekking tot de evaluatie van het CO₂-model. *Chris: les 9, 26'*

In r. 4 beoordeelt Chris de resulterende temperatuur als te hoog. De temperatuurstijging wordt echter niet expliciet gerelateerd aan het scenario dat eraan ten grondslag ligt. Later in het fragment (r. 9) wordt in feite geconcludeerd dat het model onvolledig is. In het klassengesprek geeft dit een ongewenste richting aan de introductie van de laatste cyclus: de docent en leerlingen gaan brainstormen over mechanismen die de aarde kunnen koelen.

Uitvoering Dirk

De derde cyclus loopt bij Dirk van les zes tot en met les acht.

Nadat in een plenaire evaluatie van het 2-laagsmodel is vastgesteld dat het model de huidige temperatuur op aarde goed verklaart, benoemt een leerling als de volgende modelleerstep om 'de toekomst' in het model te stoppen. Vooruit bladerend in het lesmateriaal noemt een andere leerling specifiek de CO₂-uitstoot. De docent vraagt hem te onderbouwen waarom dit de volgende uitbreiding is. De leerling voert als reden aan dat dit veel in het nieuws is, waarna plenair besproken wordt hoe de CO₂-uitstoot de temperatuur in het model verandert.

1. **D:** maar je moet niet altijd de krant geloven, dus dat is geen goed argument.
2. **II2:** maar de CO₂ die stijgt toch?
3. **D:** ja, daar hebben we iets van gehoord: de CO₂ die stijgt. En wat zou dat beïnvloeden in ons model wat we er nu al in hebben?
4. **II:** de temperatuur
5. **D:** de temperatuur, ja dat komt er uit. Maar je moet ook iets van wat je er in stopt gaan veranderen.
6. **II:** eps..
7. **II2:** warmtecapaciteit
8. **D:** oei, de warmtecapaciteit. Van de lucht?
9. **II2:** ja
10. **D:** dat CO₂-gehalte, daarvan heb je bij anw geleerd dat dat ongeveer 0,03% en ze zijn bang dat het 0,04 wordt. Ik denk niet dat de warmtecapaciteit daar zo denderend veel van verandert.
11. **II:** epsilon
12. **II:** [heeft met de terugkaatsing..] [*las vooruit in boek, klas licht*]
13. **D:** Wat een [goede] opmerking! De epsilonwaarde had natuurlijk met de absorptie te maken. Die absorptie, die wordt natuurlijk anders!
14. **II:** hoe wordt die anders dan?
15. **D:** aha, hoe wordt die anders dan? Zou die meer of minder absorberen met CO₂ erbij?

16. **II:** meer.
17. **D:** toch gedacht he, dat die epsilonwaarde zou stijgen als de CO_2 stijgt.
18. **II:** meer.
19. **D:** maar hoe weet je nou de relatie tussen die twee precies?

Fragment uit het gesprek over temperatuurverandering t.g.v. een toenemende CO_2 -concentratie. *Dirk: les 8, 32'*

De suggestie dat de CO_2 -uitstoot effect heeft via de warmtecapaciteit wordt door de docent afgedaan door te wijzen op de kleine mate van verandering van de luchtsamenstelling (r. 7-10). Dirk gebruikt niet het argument dat hij in voorgaande cyclus gaf bij het schatten van de warmtecapaciteit, toen hij benadrukte dat deze waarde er voor de uitkomst niet toe doet. Als een andere leerling de absorptie- en emissiecoëfficiënt ε benoemt (r. 11), bevestigt Dirk dit zonder te verklaren waarom deze wél substantieel verandert.

Het einde van het fragment geeft richting aan een van de vervolgstappen in de

Tabel 3. Leerlingantwoorden uit de klas van Dirk m.b.t. de waardering van het CO_2 -model.

#	"hoe zeker ben je van de relatie tussen ε en de CO_2 -concentratie?"	"wat is je conclusie over de betrouwbaarheid van je model?"
1.	Wij zijn in zekere zin best zeker over de relatie tussen ε en de CO_2 -concentratie, omdat wij 4 verschillende relaties hebben bekeken en getest. Dit testen kon omdat er gegeven was dat bij een temperatuur van 14°C er een absorptiecoëfficiënt van 0.78 hoort. Na bij de 4 verschillende relaties de CO_2 -concentratie ingevuld te hebben kwam de absorptiecoëfficiënt aardig overeen met de werkelijke absorptiecoëfficiënt. Wij vinden relatie B het meest waarschijnlijk voor het verband tussen ε en de CO_2 -concentratie.	Het model wat we gebruiken hebben is best betrouwbaar want we hebben de temperatuur uit het verleden (van 1800 tot 2000) ermee berekend en gekeken of dat overeen kwam met de werkelijke temperatuur. Dat kwam goed overeen. Dus we zouden met dit model wel een redelijke voorspelling kunnen maken.
2.	Niet bent niet heel erg zeker van het verband tussen de grootheden omdat er nog maar over een relatief korte tijd gemeten is, verschillende modellen kunnen daarom nog erg verschillen.	Het model is niet erg betrouwbaar omdat er veel onzekerheid is over het verband tussen de CO_2 -concentratie en de epsilon.
3.	Je weet de relatie niet helemaal zeker omdat er maar drie bekende punten zijn betreffende deze relatie, en dus zijn er meerdere relaties te bedenken. Die lijken wel veel op elkaar. Je precieze relatie weet je dus niet 100% zeker. Maar het verschil onderling is ook niet heel groot dus je weet de relatie vrij goed.	Het model is vrij betrouwbaar. Het verband tussen epsilon en CO_2 -concentratie is wel ongeveer duidelijk, dat zorgt voor een vrij aannemelijk resultaat.
4.	Niet zo zeker want je hebt maar een paar meetpunten dus je kunt er niet echt een duidelijk verband uit afleiden. En weet je dus ook het verdere verloop niet zeker.	slecht want zoals [hiernaast] uitgelegd weet je het verband tussen CO_2 en epsilon niet zeker en is het model daarom onbetrouwbaar.
5.	Je bent niet heel erg zeker van het verband tussen deze twee grootheden omdat er nog maar relatief kort wordt gemeten is naar de concentratie CO_2 in de lucht. Er zijn dus veel verschillende modellen hiervoor. Deze modellen kunnen sterk uiteen lopen.	Het model is niet heel erg betrouwbaar omdat je dus nog maar weinig weet over de CO_2 concentratie in de voorbije decennia/eeuwen.
6.	Zeker, want het is bekend dat hoe meer CO_2 er zich in de atmosfeer bevindt, er meer energie geabsorbeerd wordt, dus de absorptiecoëfficiënt groter wordt.	Het model is erg betrouwbaar want het geeft de verschillende relaties tussen bijvoorbeeld de absorptiecoëfficiënt en de CO_2 goed weer.

cyclus: een verband leggen tussen de CO_2 -concentratie en ε . Dirk beargumenteert waarom de inperking tot alleen CO_2 redelijk is. Ook legt hij uit hoe de gegevens uit het verleden gebruikt worden om een verband te bepalen, en welke onzekerheden dit geeft voor een toekomstvoorspelling. Dirk verwijst in zijn betoog steeds naar de gegevens uit het lesmateriaal, om het voor de leerlingen navolgbaar te houden wat hij vertelt. De leerlingen hebben zelf echter geen inbreng. Van de gegeven relaties tussen de CO_2 -concentratie en ε evalueert hij alleen expliciet de laatste: omdat ε negatief kan worden, is deze niet correct.

Gedurende de lessen zes, zeven en acht is ongeveer de helft van de tijd voor de leerlingen beschikbaar om het beoogde Powersimmodel te construeren. De leerlingen leveren hun model en de antwoorden op de opgaven uit het werkboek in voor een cijfer. Daarom wordt er geen klassengesprek gewijd aan de modeluitkomsten. Uit de ingeleverde opdrachten blijkt dat de leerlingen de inperkingen en vereenvoudigingen die de docent heeft geëxpliciteerd goed hebben genoteerd. Alle leerlingen werken met een zelfgekozen relatie. Een veel voorkomende reden voor de keuze van een relatie is dat de temperatuur bij dat verband minder sterk stijgt dan bij de andere. Een leerling stelt dat de keuze niet goed beargumenteerd kan worden, omdat alle vier voldoen aan het criterium dat ze historische veranderingen moeten kunnen weergeven.

De leerlingen werken niet aan een eigen scenario, maar alleen aan de twee scenario's die gegeven zijn in het lesmateriaal. Hun evaluatie van het model is weergegeven in Tabel 3. De helft van de koppels is tevreden over de uitkomsten van het model, omdat deze het historisch temperatuurverloop goed kan weergeven. De andere helft van de koppels is juist niet tevreden, omdat de relatie tussen de CO_2 -concentratie en ε onzeker is.

Evaluatie

De eerste analysevraag is of de probleemverkenning betekenisvol is verlopen. In beide uitvoeringen hebben de leerlingen geconcludeerd dat uitbreiding van het 2-laagsmodel in het licht van de onderzoeksvraag noodzakelijk is. Ook is in beide uitvoeringen de notie aanwezig dat verandering van de temperatuur het resultaat moet zijn van verandering in factoren die de temperatuur bepalen. Bij Chris wordt dit algemeen geformuleerd, bij Dirk expliciet voor de CO_2 -concentratie. In Chris' uitvoering wordt de keuze om de uitstoot van CO_2 te modelleren niet gemaakt. Bij Dirk wordt een causaal verband met de temperatuur geëxpliciteerd. De start van de episode gaat dus naar behoren.

De tweede analysevraag is of het modelonderzoek betekenisvol is verlopen. In beide uitvoeringen is benoemd dat de gegevens uit het verleden bruikbaar zijn om het model mee te testen, maar alleen Chris' leerlingen noemen dit zelf. Dirk expliciteert dit voor zijn leerlingen. De noodzaak voor een scenario is niet plenair besproken. Het modelonderzoek lijkt dus in ieder geval deels betekenisvol te zijn verlopen.

De derde analysevraag betreft de constructieruimte bij het modelleren van een veranderende CO₂-concentratie. Dit zou moeten blijken uit de mogelijkheid voor leerlingen om eigen keuzes en beslissingen te maken die ook geëvalueerd worden.

Van de derde cyclus zijn maar beperkt data beschikbaar van Chris' uitvoering. Het te ontwikkelen model sluit niet vanzelfsprekend aan bij de eigen ideeën van de leerlingen over de werking van CO₂. De eerste leerlingsuggestie voor de invloed van de CO₂-concentratie op de temperatuur is dat de warmtecapaciteit beïnvloed wordt. Het verband met de absorptie- en emissiecoëfficiënt ε wordt uit het lesmateriaal gehaald. Dirk neemt in elk geval beide serieus door ook de eerste suggestie te evalueren.

Er zijn vier mogelijke verbanden gegeven voor de relatie tussen de CO₂-concentratie en ε . Beide docenten perken deze vier nog verder in, maar wel beargumenteerd. Opvallend is dat Chris er op wijst dat de eerste drie relaties een epsilonwaarde groter dan 1 kunnen geven (waardoor de laatste relatie overblijft), terwijl Dirk juist de laatste afwijst omdat de resulterende epsilonwaarde kleiner dan 0 kan worden. Leerlingen maken een eigen keuze voor een van de relaties. Zij neigen ernaar de relatie te kiezen waarmee de temperatuurverandering het kleinst blijft. Hoewel er keuzevrijheid is, is deze feitelijk niet erg productief omdat er geen (doorslaggevende) inhoudelijke criteria zijn om de ene relatie boven de andere te verkiezen.

Tijdens de modevaluatie wordt bij Chris geconcludeerd dat het model uitbreiding behoeft omdat het wenselijk is een lagere temperatuur te krijgen. Hieruit blijkt sterk een engineering approach (het genereren van een bepaald effect), hetgeen bij een voorspelling niet aan de orde is. Bij Dirk wordt het model niet plenair geëvalueerd. Zijn leerlingen beantwoorden wel de evaluatievraag in het lesmateriaal. De helft van de leerlingen hanteert het criterium dat het voorspellen van de historische trend voldoende is om het model te vertrouwen. De andere helft identificeert de onzekerheid in de relatie die is gebruikt om het model op dit verleden te tunen. Leerlingen hebben dus relevante inbreng om het model te evalueren, hoewel een plenaire discussie over de verschillende standpunten de moeite waard zou zijn geweest. Scenario's zijn niet als bron van onzekerheid benoemd.

Hoewel de mogelijkheden voor productieve constructieruimte in het ontwerp beperkt zijn, neemt Dirk in deze cyclus de bijdragen van de leerlingen wel serieus. Doordat de leerlingen hun antwoorden moesten inleveren voor een cijfer, blijft er ook enige verantwoordingsruimte voor de leerlingen. Er is dus enige constructieruimte gerealiseerd.

De laatste analysevraag is of er productieve constructieruimte gerealiseerd wordt om een scenario te maken. De noodzaak van scenariostudies is niet benoemd, omdat leerlingen zelfstandig aan de opgaven in het lesmateriaal hebben gewerkt voor hun inleveropdracht. Er zijn geen problemen gesignaleerd met het idee van de scenariostudies. De leerlingen maken echter geen eigen scenario om mee te simuleren, maar gebruiken alleen de voorbeeldscenario's uit het lesmateriaal. Constructieruimte is dus beperkt of niet aanwezig.

3.3.7 Vijfde episode: terugkoppelingen

Analysekader

Het doel van de vierde cyclus is om na te gaan wat het effect is van terugkoppeling op de modelvoorspellingen: hoe beïnvloedt een terugkoppeling het modelgedrag en welke nieuwe bronnen van onzekerheid geeft dit?

Van de gepresenteerde terugkoppelingen is op voorhand niet één duidelijk sterker dan de andere. Daarom zijn ze even relevant om in model te zetten. Om dit in de beperkt beschikbare tijd te doen, worden deelmodellen parallel ontwikkeld en vervolgens gecombineerd tot een totaalmodel.

Het beoogd lesverloop, besproken in 3.2.9, geeft aanleiding tot de volgende analysevragen:

1. Verloopt de probleemverkenning betekenisvol voor de leerlingen? Dit zou moeten blijken uit relevante leerlingbijdragen, zoals dat
 - het versterkend of tegenwerkend effect van terugkoppeling van de temperatuur op een voor de temperatuur relevante invloed kwalitatief ander gedrag geeft dan dat in voorgaand model;
 - het voor het voorspellen van de toekomstige temperatuur relevant is om rekening te houden met het effect van terugkoppeling;
 - elk van de gepresenteerde terugkoppelingen even relevant lijkt;
 - het door de verdeling van modelleertaken mogelijk wordt om alle mechanismen te modelleren in kortere tijd.
2. Wordt er productieve constructieruimte gerealiseerd bij de ontwikkeling van het Powersimmodel *oplosbaarheid van CO₂ in de oceaan*?
3. Wordt er productieve constructieruimte gerealiseerd bij de ontwikkeling van het Powersimmodel *sneeuwbedekking*?
4. Wordt er productieve constructieruimte gerealiseerd bij de ontwikkeling van het Powersimmodel *wolkenalbedo*?

Uitvoering Chris

De vorige episode eindigde met de conclusie dat de modeltemperatuur lager zou moeten worden. Chris bespreekt vervolgens met zijn leerlingen welke mechanismen de aarde afkoelen. De leerlingen beargumenteren dat de hoeveelheid zonne-energie of de hoeveelheid CO₂ moet verminderen. Ze gaan na welke mechanismen dat laatste bewerkstelligen, zoals meer vegetatie en minder uitstoot door minder auto te rijden en schonere technieken te gebruiken. Chris tematiseert hoe deze mechanismen in het model gezet kunnen worden. Voor de vegetatie doet hij de suggestie dat een hogere temperatuur in eerste instantie voor meer plantengroei zorgt, waardoor meer CO₂ wordt vastgelegd. Hij merkt er bij op dat het mechanisme alleen een netto afname tot gevolg heeft zolang de vegetatie toeneemt. Chris bespreekt hoe het aantal auto's in het model gezet kan worden, en geeft daarbij een scenario voor de autogroei als functie van de bevolkingsgroei. Voor een

afname van CO₂ suggereert hij opslag van CO₂. Leerling 8 grapt dat CO₂ in frisdrank opgeslagen kan worden, waarna Chris de stap maakt naar de oceaan. Leerling 2 werpt tegen dat de oceaan niet bruist zoals frisdrank. Dit brengt het gesprek op het neerslaan van opgeloste CO₂ en koraalvorming. Chris vraagt een leerling om de grote lijn te schetsen hoe een mechanisme van de opslag van CO₂ in de oceaan in model gezet moet worden. Deze identificeert als benodigde stappen hoeveel CO₂ de oceaan in kan, hoe groot het oppervlak is van de oceaan en hoeveel koraal er per jaar gevormd wordt.

Chris vraagt om nog meer mogelijke koelmechanismen. Leerling 1 en 8 suggereren verandering van het albedo door wolken. Chris merkt op dat wolken zowel een opwarmend als een afkoelend effect hebben. Hij vraagt nog een andere invloed op het albedo, waarop leerling 9 sneeuw suggereert. Chris rondt daarna het klassengesprek af met het benoemen van de drie modeluitbreidingen voor de komende cyclus. Hij geeft de opdracht dat leerlingen in koppels aan een van de drie werken. Om de leerlingen te helpen een keuze voor een van de drie te maken, karakteriseert hij de verschillende routes: de oplosbaarheid van CO₂ is het meest geologisch/scheikundig, het model met sneeuwbedekking laat het meest vreemde gedrag zien, en het wolkmiddel is het meest natuurkundig en in wiskundig opzicht het meest ingewikkeld. De leerlingen motiveren hun keuze voor een van de specialisaties op basis van deze karakteristieken. Een leerling vraagt of er vervolgens ook een totaalmodel van gebouwd wordt, waarin alle drie een plek hebben.

Chris maakt het scenariomodel voor iedereen toegankelijk, zodat alle leerlingen eenzelfde startpunt hebben.

Wegens tijdgebrek komt het uitwerken van de specialisatieopdrachten niet uit de verf; de leerlingen besteden nog slechts één lesuur aan de stof, waarna de slotles volgt van de lessenserie.

Uitvoering Dirk

Dirk introduceert de terugkoppelingen nog in les acht, bij het afronden van het scenariomodel. Leerlingen werken gedurende les negen tot en met elf aan de specialisaties.

Dirk refereert aan het woordweb dat in de eerste les gemaakt is van de mogelijke invloeden op de temperatuur. Sommige daarvan zijn ondertussen verwerkt, een aantal nog niet. Door de inhoudsopgave van het lesmateriaal te lezen benoemen de leerlingen welke ontbrekende factoren nog in het model gezet worden.

1. **D:** hahaha. Die hadden jullie niet verzonnen. Eigenlijk staat hij al deels hier in [*wijst op wordmap met de relatie CO₂ - temp*]. Want het beperkte van wat we tot nu toe gedaan hebben was: dit is eenrichtingsverkeer [*tekent pijltjes in het wordmap*].
2. **II:** [*mompelt zachtjes*] ja, nou en?
3. **D:** dat er een atmosfeer is? Oke, dat warmt de aarde wat op en zo. En wat we met de CO₂ gedaan hebben, was nog eenrichtingsverkeer. Want

we weten wat de concentraties CO₂ waren in het verleden. Die stoppen we erin en die moeten er ook uitkomen, maar wat er dan uitkomt, had tot nu toe nog geen invloed op de CO₂-concentratie zelf. En dat is wel een van de drie verdere opdrachten dat we nu die terugkoppeling erin gaan stoppen. Zo van: een andere temperatuur, dan zou daardoor – hoe zou dat de concentratie CO₂ kunnen beïnvloeden? Ja... dat weten we nog niet. Nog niet gelezen? Het heeft invloed erop. Andere temperatuur... Waar blijft CO₂? Ja, in de lucht, maar ook...?

4. **Il:** in de zee
5. **D:** in de zee. Ja, dat lees je net. Enig idee over de relatie tussen die oplosbaarheid en de temperatuur?
6. **Il:** [*leest voor*] bij een stijgende temperatuur wordt de oplosbaarheid minder, zodat de CO₂ vrijkomt en de absorptiecoëfficiënt van de lucht...
7. **D:** verandert de temperatuur, dan verandert de concentratie in de oceaan, en dus ook de CO₂-concentratie in de lucht. En dat is een terugkoppeling, die hadden we er nog niet in zitten. Dat is interessant, maar ook veel moeilijker. En dat geldt bij wolk ook een beetje, want andere temperatuur, andere bewolking. Andere bewolking, andere temperatuur. En die is helemaal verrassend ingewikkeld. Want jullie hadden al geloof ik een keer eh.. meer wolken, meer albedo, daardoor lagere temperatuur. Maar dat is maar 1 richting, het zal ook de andere kant op gaan. Meer bewolking.. door een hogere temperatuur kan ook het effect hebben dat het albedo omhoog gaat maar dat daardoor de temperatuur weer omlaag zakt. Nou, dat is ook een van de componenten. En bij sneeuw en ijs is dat ook zo iets. Niet alleen omdat er meer sneeuw/ijs is, meer albedo, meer spiegeling van het ijs en zo, een andere temperatuur, maar door een andere temperatuur ligt er, logisch, ook meer of minder ijs. Nou, dat maakt het veel moeilijker, dat hadden we er tot nu toe nog niet ingestopt. En dat is drie keer moeilijk en drie keer te veel, zeg maar, maar een keer gaat wel, voor de komende twee weekjes. Dus dat gaan we even verdelen.

Fragment uit het klassengesprek over terugkoppeling. *Dirk: les 8, 18'*

Dirk onderstreept het verschil met de voorgaande modeluitbreiding, dat in de te modelleren mechanismen de temperatuur weer effect heeft op de oplosbaarheid van CO₂ in de oceaan, de hoeveelheid sneeuw en ijs, respectievelijk de wolk. Ook benoemt hij de noodzaak om het werk te verdelen (r. 7). De leerlingen kiezen een van drie specialisaties.

Aan elke specialisatie werken twee koppels gedurende drie lessen (les negen t/m elf). Voorafgaand aan les tien (de tweede les over de specialisaties) stuurt Dirk zijn leerlingen een deelmodel van elke specialisatie toe. Zijn doel hiermee is dat leerlingen hun eigen constructies kunnen toetsen en, indien nodig, met dit model verder kunnen werken als zij niet snel genoeg vorderen. De antwoorden op opgaven in het lesmateriaal kunnen de leerlingen bij de docent verifiëren met een antwoordblad.

Oplosbaarheid van CO_2

Om te achterhalen in hoeverre de leerlingen een idee hebben van het effect van terugkoppeling op het modelgedrag vraagt de onderzoeker de leerlingen bij aanvang van de specialisatie te benoemen wat het model, als het klaar is, zal doen.

1. **O:** kun je nou al vermoeden... als dit nou lukt he, als je hier een model van maakt, wat je model dan gaat doen?
2. **Il:** nou dat hebben we net gelezen, dan wordt de temperatuur hoger.
3. **O:** hoe dan?
4. **Il:** eh, even kijken... hoe zat het ook al weer? Doordat de CO_2 -waarde.. doordat de CO_2 minder wordt opgenomen in de zee doordat de temperatuur stijgt.
5. **O:** waarom stijgt de temperatuur als de CO_2 minder wordt opgenomen?
6. **Il:** ja dan lost het niet meer op in zee of zo, weet ik veel hoe het precies zit.
7. **O:** haha.
8. **Il:** in ieder geval wordt die minder opgenomen, en dan stijgt de temperatuur omdat die epsilon, of de absorptiecoëfficiënt, groter wordt.
9. **O:** ja.

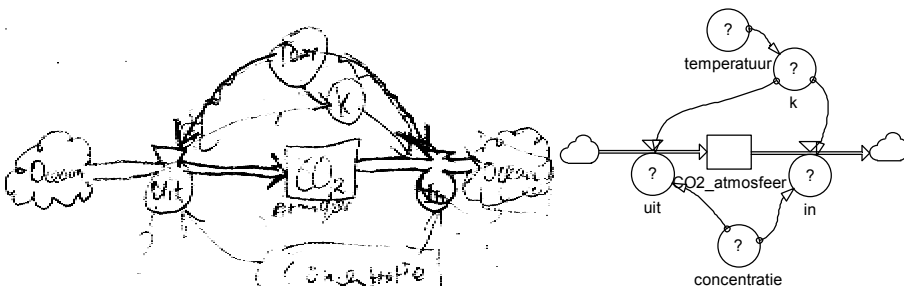
Fragment uit het gesprek tussen onderzoeker en leerlingen over het effect van de terugkoppeling door oplosbaarheid van CO_2 . *Dirk: les 8, 25'*

Dit koppel dat aan oplosbaarheid van CO_2 werkt, kan de causale relatie goed benoemen.

In de eerste les die ze aan de terugkoppeling besteden, maken deze leerlingen een goede schatting van de hoeveelheid CO_2 die door de oceaan is opgenomen. Hun eerste schets voor het Powersimmodel van het mechanisme is weergegeven in Figuur 15.

De leerlingen hebben correct een voorraadgrootheid toegekend aan de hoeveelheid CO_2 in de atmosfeer. Deze CO_2 -voorraad neemt toe door wat er uit de oceaan komt en neemt af door wat de oceaan ingaat. Anders dan gevraagd in het lesmateriaal is er dus geen nettostroom. De oceaan zelf heeft geen voorraadgrootheid. De in- en uitstromen zijn correct afhankelijk van zowel de oplosbaarheid k als de concentratie, maar de concentratie hangt niet af van de CO_2 -

Figuur 15. Eerste schets voor het Powersimmodel van de oplosbaarheid van CO_2 in de oceaan. (Voor de duidelijkheid is rechts weergegeven hoe dit er in Powersim zou uitzien.)



voorraad. Een eerste verbinding tussen temperatuur en de stromen is goed gecorrigeerd door een verbinding met k zelf. In Figuur 15 is in de getekende rechterwolk ‘oceaan’ een blokje zichtbaar; dit is door de docent ingetekend na inname van het leerlingmateriaal.

Gedurende de drie lessen zijn de leerlingen bezig met het uitwerken van de informatie in het werkboek. In deze lessen maken zij geen Powersimmodel. Behalve de correctie van de docent na afloop van de lessen krijgt het koppel ook al gedurende de begeleiding aanwijzingen om aan de oceaan een voorraadgrootheid toe te kennen.

Uit het gekopieerde leerlingmateriaal blijkt dat deze leerlingen wel een eigen schatting hebben gemaakt voor het watervolume van de oceaan, maar hierbij zijn geen aannames genoteerd.

Ook het tweede koppel is in deze lessen alleen met het werkboek bezig. Volgens de notities gemaakt tijdens de lesbezoeken is er bij dit koppel weinig voortgang tijdens de lessen; de leerlingen krijgen weinig greep op de modelinhoud. Uit het ingenomen lesmateriaal blijkt het koppel uiteindelijk wel de gevraagde opgaven beantwoord te hebben. Wat betreft de bijdrage van de oceaan aan de opslag van CO_2 maken zij in hun schatting een rekenfout; zij hebben echter wel de benodigde gegevens bepaald. De antwoorden op de andere opgaven (ook de schatvragen) zijn duidelijk gebaseerd op het antwoordenblad.

De kwaliteit van de data is onvoldoende om het modelleerproces van de beide koppels te volgen.

Sneeuwbedekking

De leerlingen die aan het sneeuwmodel gaan werken hebben moeite om het effect van de terugkoppeling te verwoorden.

1. **II** ehm, ja. Die laat denk ik zien wat het verband is tussen de temperatuur en sneeuw, wat het daarmee doet. Als je heel veel sneeuw hebt, wat dat voor invloed heeft op de temperatuur.
2. **O:** wat denk je?
3. [...]
 4. **II2:** hoe meer sneeuw..
 5. **II4:** ..hoe meer reflectie.
 6. **O:** dus?
 7. **II4:** hoe hoger het albedo.
 8. [...]
 9. **O:** en dus? Hoge reflectie..?
 10. **II4:** hoe hoger albedo.
 11. **II2:** ja, hoe minder absorptie.
 12. **O:** en dan?
 13. **II:** kouder.
 14. **O:** en dus meer sneeuw?
 15. **II2:** maar..
 16. **II:** er smelt ook weer sneeuw.

17. **II2:** ja maar de temperatuur die zal.. maar er is geen.. ja, toename van sneeuw, dan wel... Er is denk ik geen toename van sneeuw.
18. **O:** er is geen toename van sneeuw?
19. **II2:** van ijs.
20. **O:** nu niet? Op aarde niet. Maar in je model kan dat natuurlijk wel.
21. **II2:** ja..
22. **O:** maar wat gebeurt er als de sneeuw smelt, dan?
23. **II4:** dan absorbeert de sneeuw [warmte]
24. **II2:** en dan wordt de albedo..
25. **II4:** [komt er warmte bij.]
26. **II2:** dus dan zou het weer warmer worden.
27. **O:** en? Wat heeft dat voor effect?
28. **II2:** nou, meer sneeuw eh..
29. **II4:** minder sneeuw.
30. **II2:** ik bedoel nog minder sneeuw..
31. **O:** dus dat is een versterkend effect. Of de ene kant op, of de andere kant op. Ja..

Fragment uit het gesprek tussen onderzoeker en leerlingen over het effect van de terugkoppeling door sneeuwbedekking. *Dirk: les 8, 30'*

In het fragment wordt uiteindelijk benoemd hoe stapsgewijs verandering van de temperatuur op aarde zal versterken door de terugkoppeling. Om dit geëxpliciteerd te krijgen, moet de onderzoeker na elke gezette stap doorvragen wat het gevolg ervan zal zijn (r. 6, 9, 12, 14, 22, 27). De leerlingen vinden de redenering dat het sterker zou gaan afkoelen niet vanzelfsprekend, omdat dit niet overeenstemt met hetgeen ze waarnemen op aarde (r. 17-20). De werking van bewolking (niet hun eigen specialisatie) benoemen dezelfde leerlingen wel snel:

1. **II:** ja, dat is hetzelfde als bij wolken. Als het warmer wordt weer, dan komt er weer meer wolken of zo iets. Ten minste, dan wordt er weer meer gecondenseerd en dan komen er weer meer wolken.
2. **O:** ja.
3. **II:** als er weer heel veel wolken zijn, dan wordt het weer kouder.

Fragment uit het gesprek tussen onderzoeker en leerlingen over het effect van de terugkoppeling door wolken. *Dirk: les 8, 32'*

In de volgende les expliciteren de leerlingen aan de docent correct de causale relaties tussen temperatuur, sneeuwbedekking en albedo.

1. **D:** maar goed, wat gebeurt hier? De albedo beïnvloedde de temperatuur natuurlijk, het geheel.
2. **II2:** en de temperatuur beïnvloedt..
3. **D:** maar de temperatuur..
4. **II1:** beïnvloedt sneeuwbedekkingsgraad. En de sneeuwbedekkingsgraad beïnvloedt weer albedo.
5. **D:** precies. En dat moet je er in stoppen.

6. **II1:** dan moet je er dus sowieso zo'n cirkeltje van maken.
7. **D:** dat wordt zo'n cirkeltje, ja.

Fragment uit de sneeuwspecialisatie over de terugkoppeling. *Dirk: les 9, 7'*

Bij de implementatie blijken de leerlingen het globale idee nog niet te kunnen vertalen naar een rekenmodel. De sneeuwbedekkingsgraad specificeren zij zoals gevraagd wordt in het lesmateriaal, maar als zij het gemiddelde albedo definiëren, laten zij de hoeveelheid sneeuw op aarde niet afhangen van de temperatuur.

1. **II1:** [iets van 0,9 van het oppervlak van de aarde] met een albedo van 0,3 en 10 procent van de aarde bestaat uit die sneeuwbedekking. Denk ik.
2. **O:** hoe weet je dat?
3. **II1:** ja eh..
4. **O:** wat heb je nou net in je model gestopt dan?
5. **II2:** net hebben we die sneeuwbedekking erin gestopt. En nou moet je dus die albedo nog wat aanpassen.
6. **O:** maar wat.. waarom heb jij het nou over een verdeling van 10 en 90 procent als je net een sneeuwbedekking erin hebt gedaan?
7. **II1:** nou, daar hadden we het gister over dat het ongeveer zoveel was.
8. [...]
9. **II1:** maar dit [de sneeuwbedekkingsgraad] geldt toch alleen maar voor een klein oppervlakte aarde met sneeuw erop?
10. **II2:** hu?
11. **II1:** niet over de hele aarde.. niet over de hele aarde ligt sneeuw.
12. **II2:** nee, maar daarom heb je toch een bedekkingsgraad 1 – 0?
13. **O:** wat is de sneeuwbedekkingsgraad als er wel op de hele aarde sneeuw zou liggen? Welke waarde heeft die dan?
14. **II1:** over de hele aarde sneeuw?
15. **O:** ja.
16. **II1:** ik zou zeggen 1, of niet? Oh, natuurlijk.
17. **O:** dus dat gebeurt op het moment dat de temperatuur gemiddeld 233 kelvin zou zijn. Dan zou je over de hele aarde..
18. **II2:** dan zou je over de hele aarde ijs en sneeuw hebben.
19. **O:** ja.
20. **II1:** dus daar hoeft je verder niet mee te prutsen, zeg maar. Dat zit er al in.

Fragment uit de sneeuwspecialisatie over de sneeuwbedekkingsgraad. *Dirk: les 9, 23'*

De leerlingen definiëren het globaal-gemiddelde albedo op basis van een vaste verdeling tussen sneeuwbedekt en sneeuwvrij aardoppervlak; deze verdeling schatten zij op 10/90 (r. 1-7). Leerling 1 acht 'sneeuwbedekkingsgraad' alleen toepasbaar op het oppervlak waar de sneeuw ligt (r. 9) en vat het dus op als een getal behorend bij daar waar sneeuw ligt.

Als de leerlingen de invoer correct hebben, is de docent bij het doorrekenen van het model aanwezig. Hij vraagt hen eerst naar een voorspelling van de uitkomst.

1. **D:** Nou, enig idee wat hij doet?
2. **I1:** het zal wel een constant getal worden als de temperatuur constant is.
3. **D:** nou, run hem maar.
4. **I1:** een constant getal.
5. **D:** ja, maar wel één. Wat betekent dat?
6. **I2:** dat het sneeuwig is hierzo.
7. **D:** de aarde is bevroren. Helemaal. Kijk eens naar de temperatuur van de aarde, wat doet die? De temperatuur van de aarde, daar bovenaan, dat grafiekje? [...] Je kunt het ook wel in de tabel zien, maar de aarde is gigantisch bevroren. [...] Hij wordt meteen.. hij bevriest, de hele aarde bevriest.
8. **I1:** heel snel.
9. **I2:** dat is niet de bedoeling.
10. **D:** nou, en dat zou wel eens kunnen omdat je albedo wel erg hoog is. Want het was 0,3 voor een gemiddelde aarde en nu zeg je voor het deel dat niet bedekt is, is 0,3 en het deel dat wel bedekt is, is nog hoger. Dat is natuurlijk ook niet eerlijk. Dus neem eens 0,25. Je ziet 'm helemaal niet lopen, he. Maar ik weet wel waarom. De sneeuwbedekkingsgraad is plotseling niet 1 meer maar 0. Met andere woorden, de hele aarde is ontdooid.
11. **I1:** oh, ook leuk.
12. **I2:** kunnen we er niet tussenin zitten?
13. **D:** nou, probeer het maar.
14. **I2:** ja, nou is hij weer normaal. Tjonge jonge.
15. **D:** haha, dat is nou net de bedoeling. Dat je duidelijk wordt van hé, of de aarde wordt helemaal bedekt met sneeuw, of helemaal sneeuwloos.
16. **I1:** ja.
17. **D:** hij is instabiel.
18. **I2:** ja.
19. **D:** en hoe komt dat?
20. **I2:** ja, is dat zo? [bladert]
21. **D:** nee! Kijk naar je grafiek! Als je hier ergens begint, dan knalt hij of daarheen, of hij knalt daarheen.
22. **I2:** hebben we de begintemperatuur niet goed of zo?

Fragment uit de sneeuwspecialisatie over de sneeuwbedekkingsgraad. *Dirk: les 9, 27'*

De leerlingen verwachten een stabiele temperatuur (r. 2), maar niet een totaal sneeuwbedekte aarde (r. 9). De docent verandert wat in de bijdrage van het sneeuwvrij oppervlak aan het globaal-gemiddelde albedo, waarna het model sneeuwvrij wordt (r. 10). De leerlingen lijken te worstelen met het verschil tussen de realiteit (een aarde waarop 10% van het oppervlak bedekt is met sneeuw) en de modelwereld (waarin het oppervlak varieert van volledig sneeuwbedekt tot volledig sneeuwvrij). De docent toont zich juist tevreden dat de extremen direct uit het

model volgen. (r. 15). Ondanks wat de docent zegt dat er beoogd wordt (r. 15), wordt het de leerlingen niet duidelijk waarom er geen tussenpositie mogelijk is.

Dirk gaat verder met het modelonderzoek en laat de leerlingen zien hoe forcering van ε leidt tot sprongen tussen de twee extreme toestanden.

Om klimaatzones aan te brengen maken leerlingen een schatting van de gemiddelde temperatuur in drie zones aan de hand van een kleurgecodeerde temperatuurkaart van de wereld. Binnen elke zone kiezen ze de meest voorkomende kleur, en nemen ze de corresponderende temperatuur als gemiddelde voor die zone. Hun schattingen controleren zij met behulp van het antwoordblad van de docent.

De data over de andere leerlingen die de terugkoppeling door sneeuw modelleren, is van onvoldoende kwaliteit om hun proces te volgen. Een markant moment is als ook hun model voor het eerst in een extreme toestand schiet. Een van de leerlingen denkt het gedrag te herkennen. In de voorgaande cyclus heeft hij een hele avond er aan besteed om te achterhalen waarom dat model steeds uitkwam op extreem hoge of lage waarden. In de les, geholpen door de docent, kwam hij er vervolgens achter dat de tijdstapgrootte te groot was waardoor het model verkeerd doorgerekend werd. Bij het zien van het gedrag van het sneeuwmodel is zijn eerste suggestie dat het wel weer aan de tijdstapgrootte zal liggen.

In de laatste les die aan de specialisaties wordt besteed hebben beide koppels een werkend sneeuwmodel ontwikkeld.

Wolkalbedo

De eerste opdracht voor de leerlingen in de wolkspecialisatie is het berekenen van de hoogte waarop een wolk zich vormt. Een koppel berekent 37 meter. Deze waarde achten ze onwaarschijnlijk, zodat ze de rekenstappen nog eens langslopen. Ze bedenken een controle voor hun antwoord (dat niet precies is te achterhalen), dat tot hetzelfde resultaat leidt. Met behulp van de onderzoeker wordt uitgezocht dat zowel in de eerste berekening als in de controle dezelfde fout gemaakt wordt. Hoewel de onderzoeker dus nodig was om tot het gewenste antwoord te komen, hebben de leerlingen zelf twee belangrijke stappen gezet in het oplossen van het probleem: het herkennen van een verkeerd antwoord en het bedenken van een controleberekening.

Ook het andere koppel toont zich kritisch over hun berekeningen. Zij berekenen een wolkalbedo van 22 en zien dat deze waarde niet goed kan zijn. Een nieuwe berekening (maar nog steeds met een rekenfout) geeft 0,1. Voor de leerlingen aanleiding om hulp in te roepen: de waarde is lager dan ze verwachtten, maar in principe wel mogelijk. Het wegwerken van de rekenfout resulteert in een albedo van 0,7. Daarmee zijn de leerlingen tevreden.

In de derde les hebben beide groepen hun wolkmodel af.

Evaluatie

De eerste analysevraag betreft het betekenisvol verloop van de probleemverkenning.

In de uitvoering van Chris speelt het identificeren van terugkoppelingen als relevante modeluitbreiding geen rol. De richting die hij aan de uitbreiding geeft, is

het identificeren van mechanismen die de aarde afkoelen, als reactie op de hoge temperaturen in het scenariomodel. Opvallend (want: onverwacht) is dat de leerlingen, ondanks de minimale inhoudelijke sturing, wel relevante inbreng hebben in het expliciteren van de drie mechanismen.

Dirk benoemt wel de wederzijdse beïnvloeding als onderwerp van de laatste cyclus. Hoewel de leerlingen zelf geen richtinggevende inbreng hebben bij de introductie van de drie terugkoppelingen, kunnen zij bij aanvang van de cyclus de keten van causale relaties in hun specialisatie in principe wel benoemen. Toch lijkt dit de leerlingen onvoldoende inzicht te bieden in het belang van deze wisselwerking. De leerlingen die een model met sneeuwbedekking maken, verwachten de plotselinge omslag naar een sneeuwbedekte of sneeuwvrije wereld in elk geval niet; in eerste instantie menen zij dat het model niet goed is. Hoewel de leerlingen dus wel het idee kunnen benoemen dat er wederzijdse beïnvloeding is, hebben zij op voorhand nog nauwelijks inzicht in de consequenties daarvan. Zij verwachtten dat het warmer of kouder werd, maar niet een dergelijk effect als uit het sneeuwmodel. Het ligt daarom voor de hand dat de leerlingen als modelresultaat een vergelijkbaar ‘warmer of kouder worden’ in gedachten hadden als in het voorgaande model. Omdat zij geen ander gedrag verwachtten, zal modeluitbreiding omwille van de wisselwerking voor hen niet betekenisvol zijn geweest. Eventueel is dit voor de leerlingen die de terugkoppeling door sneeuw modelleerden wel meer gaan leven. Maar in aanmerking genomen dat het effect van de positieve terugkoppeling in het sneeuwmodel veel duidelijker is dan in de beide andere modeluitbreidingen, valt te betwijfelen of de overige leerlingen dit inzicht hebben ontwikkeld.

De volgende analysevragen betreffen de verschillende specialisaties. Het modellerenproces van de verschillende koppels kan slechts ten dele geëvalueerd worden. Chris had onvoldoende tijd beschikbaar om de leerlingen aan de specialisatie te laten werken. In Dirks uitvoering was deze tijd er wel, maar de databronnen blijken niet toereikend te zijn geweest om het modellerenproces van de leerlingen in de verschillende specialisaties gedetailleerd te volgen. Hoewel het beeld dus beperkt is, krijgen we van elke specialisatie wel een globale indruk van het verloop.

De tweede analysevraag is of er productieve constructieruimte is gerealiseerd bij de ontwikkeling van het Powersimmodel *oplosbaarheid van CO₂ in de oceaan*. Dit zou moeten blijken uit de mogelijkheid voor leerlingen om eigen keuzes en beslissingen te maken die ook geëvalueerd worden.

Eén van de beide koppels die aan deze specialisatie werken, maakt een eigen schets van de basisstructuur die ze voor hun Powersimmodel nodig denken te hebben. Door de begeleiding van de docent en de onderzoeker krijgen de leerlingen hier feedback op. Het is niet duidelijk of zij uiteindelijk met een eigen model werken of met het model dat door de docent is toegestuurd. Het andere koppel werkt in ieder geval met het model dat door de docent is verstrekt. Bij het tweede koppel is dus onvoldoende sprake van productieve constructieruimte in de ontwikkeling van hun Powersimmodel, terwijl dit bij het eerste koppel onduidelijk blijft.

De beide koppels hebben in hun lesmateriaal een eigen schatting gemaakt van het deel van de door de mens uitgestoten CO₂ dat door de oceaan is opgenomen. Deze schatting dient om de leerlingen een idee te geven van het belang van de modeluitbreiding. Er is geen empirische bevestiging dat de leerlingen door het maken van de opgave het belang van de oceaan inzien. Ook zijn er geen gegevens dat de waarde gebruikt wordt als een controle bij de evaluatie van het Powersimmodel. In hoeverre de schatting productief wordt, is daarom onduidelijk. Van een koppel is duidelijk dat ze een eigen schatting voor het watervolume hebben gemaakt; het andere koppel volgt de door de docent verstrekte informatie. In hoeverre bij het eerste koppel sprake was van productieve constructieruimte, is niet te beoordelen.

De derde analysevraag is of er productieve constructieruimte is gerealiseerd bij de ontwikkeling van het Powersimmodel *sneeuwbedekking*. Net als in de voorgaande specialisatie zijn de eerste opgaven bedoeld om het belang van de modeluitbreiding te verduidelijken. Beide koppels construeren al snel een Powersimmodel dat het beoogde gedrag laat zien. Duidelijker dan bij de beide andere specialisaties bleken de leerlingen ondersteuning nodig te hebben voor het construeren van hun Powersimmodel. Dit was niet alleen het geval bij de verwerking van een nieuw Powersimcommando, maar ook bij het definiëren van een nieuw verband (zoals het globaal-gemiddelde albedo als functie van de sneeuwbedekkingsgraad). Doordat zij geen verwachtingen hadden over het modelgedrag, hadden de leerlingen bovendien moeite om te beoordelen of modeluitkomsten goed genoeg waren, of dat deze hen juist voor een (nieuw) probleem stelden. De leerlingen krijgen van de docent de goedkeuring dat het modelgedrag correct is. Het modelgedrag wordt echter niet expliciet verklaard. Het valt daarom te betwijfelen of de leerlingen zelf het modelgedrag begrijpen. De data geven geen uitsluitsel over de constructieruimte voor het construeren van de klimaatgordels in het model. Enerzijds lijkt een koppel een eigen schatting te maken voor de gemiddelde temperatuur in elke gordel. Anderzijds is het goed mogelijk dat het antwoordblad van de docent de antwoorden van de leerlingen heeft gestuurd.

De vierde analysevraag is of er productieve constructieruimte is gerealiseerd bij de ontwikkeling van het Powersimmodel *wolkalbedo*. De enige informatie met betrekking tot de procesgang van de leerlingen die het wolkalbedo modelleren, betreft het oplossen van twee rekenproblemen. Beide koppels laten daarin zien kritisch te reflecteren op de gevonden resultaten. Dat is een belangrijke aanwijzing dat de leerlingen goed inzicht hebben waar zij mee bezig zijn.

3.3.8 Zesde episode: synthese

Analysekader

De leerlingen presenteren elkaar de inhoud van hun specialisatie, waarna zij de deelmodellen samenvoegen in één totaalmodel.

Het beoogd verloop van deze episode, besproken in 3.2.10, resulteert in de volgende analysevragen:

1. Is er sprake van productieve constructieruimte als de leerlingen de deelmodellen presenteren? Dit zou moeten blijken uit de mogelijkheid voor leerlingen om eigen keuzes en beslissingen te maken die ook geëvalueerd worden.
2. Verloopt de synthese betekenisvol voor de leerlingen?
3. Is er sprake van productieve constructieruimte als de leerlingen een overkoepelend model construeren?

Uitvoering Chris

Chris had onvoldoende tijd beschikbaar voor de ontwikkeling van de deelmodellen. Leerlingen hebben daaraan slechts een lesuur gewerkt. In de slotles van de lessenserie geven leerlingen wel een korte presentatie over het onderwerp dat zij gekozen hebben, maar voor de analyse is deze niet geschikt. Het spreekt voor zich dat ook de synthese van de deelmodellen niet aan de orde is gekomen.

Uitvoering Dirk

De laatste twee lessen worden benut om vijf van de zes koppels hun specialisatiemodel te laten presenteren. Alle leerlingen hebben dan een werkend deelmodel, gebaseerd op de modellen die Dirk heeft rondgestuurd (voor les tien, halverwege de specialisatieopdrachten). We bespreken achtereenvolgens een presentatie van het sneeuwmodel, van het wolkmodel en van een model voor de oplosbaarheid van CO₂.

Het effect van positieve terugkoppeling is in het sneeuwmodel sterk, maar de presenterende leerlingen laten zich er niet over uit of de sprongen naar een sneeuwbedekte of sneeuwvrije wereld ook overeenkwamen met hun verwachtingen. Zij benoemen dat het effect van de terugkoppeling sterk afhangt van startwaarden.

1. **D:** wat zegt die grafiek [*in het lesmateriaal*] nou?
2. **II1:** die grafiek geeft de sneeuwbedekkingsgraad weer tegen de temperatuur.'
3. **II2:** dus onder 233 graden zou de aarde bevroren wezen, dan zou de hele aarde onder sneeuw kunnen zijn. En bij pak en beet 288.. is er geen sneeuwbedekkingsgraad meer, en is de aarde dus sneeuwvrij.'
4. **II1:** [...steekt aardig nauw met de beginwaarde]. Want als je de beginwaarde ook maar iets verkeerd hebt, dan heb je twee keer terug.. twee keer positieve terugkoppeling in zitten: die loopt hier van de bedekkingsgraad naar de albedo, albedo wordt groter, meer reflectie, aarde koelt af. Aarde koelt af komt er meer sneeuw en ijs, weer meer reflectie: is twee keer positieve terugkoppeling. En dan steekt de beginwaarde aardig nauw. Dan krijg je of heel snel een bevroren aarde of een compleet ontdooide aarde. Dat is best wel lastig.

Leerlinguitleg van het effect van sneeuwbedekking. *Dirk: les 12, 2'*

Anders dan in het lesmateriaal gebruikt de leerling de term ‘positieve terugkoppeling’ voor een enkele relatie tussen twee grootheden (r. 4); niettemin is de essentie van de relaties en hun effect correct. Wellicht zijn er wel indirecte aanwijzingen in de presentatie dat de leerlingen het gedrag opzienbarend vinden: zij benoemen al snel dat de eindtoestanden afhankelijk zijn van de beginwaarden in het model en benoemen dit als lastig (het is niet op te maken of ‘lastig’ slaat op het modellerprobleem of op het tunen/in toom houden van het modelgedrag).

Het modeldiagram is ondersteunend om het effect van de ene grootheid op de andere te benoemen.

1. **D:** je had al een model waar de temperatuur uitkwam, de temperatuur van de aarde. Die hebben we allemaal, klopt. En daar gaat een pijltje naar bedekkingsgraad. Waarom?
2. **Il:** bij een bepaalde temperatuur op aarde hoort dus volgens deze grafiek een bepaalde bedekkingsgraad.
3. **D:** juist.
4. **Il:** die bedekkingsgraad zorgt voor een bepaalde reflectie, daarom gaat het pijltje ook naar het albedo. Nou, zoals we hadden gezien in ons model warmt de aarde... warmt op. Dat betekent dat als je dat invult naar de bedekkingsgraad, de bedekkingsgraad minder wordt, betekent weer een warmere aarde, betekent een hogere temperatuur, een hogere temperatuur betekent nog minder sneeuw; dan heb je weer die terugkoppeling daarin zitten.

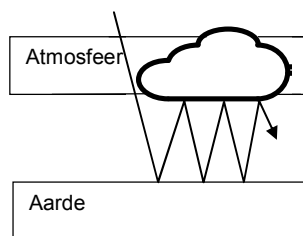
Leerlinguitleg van het mechanisme uit de specialisatie ‘sneeuwbedekking’. *Dirk: les 12, 10’*

Globaal genomen lijken de leerlingen de vakinhoud en de modeldynamiek voldoende te begrijpen.

Bij het presenteren van de vakinhoud en de bevindingen van elk model benoemen de leerlingen alleen hun albedoschatting voor het sneeuwbedekte en -vrije oppervlak: “wij hebben het midden gehouden. Sneeuw heeft een albedo van 0,6-0,8, sneeuw en ijs, en wij zijn daar tussenin gaan zitten, zo van nou, wij doen 0,7.” Ze bespreken niet de geschatte temperaturen voor de verschillende zones, of het effect van de schattingen.

De tweede presentatie gaat over het wolkmiddel. Deze leerlingen starten hun presentatie met uiteen te zetten wat hun eigen ideeën zijn ten aanzien van het mechanisme.

1. **Il:** wij hebben dus ons model uitgebreid met de wolken. Daarvoor hebben wij even gekeken naar wat een wolk nou eigenlijk precies doet, want waar zorgt een wolk voor in het model. Want we hadden dus wel van nou de atmosfeer, en we hadden de aarde [tekent twee lagen op het bord]. Je kreeg dus die



Figuur 16. Leerlingidee van de werking van bewolking: een opwarmend effect door herhaaldelijke reflectie van inkomend zonlicht.

stralen van warmte en licht, en die reflecteren weer, voor een deel worden ze weer geabsorbeerd en voor een deel weer gereflecteerd door de aarde. Maar nu hebben we dus een wolk bijgetekend, er komt dus een wolk bij tussen. Wat krijgen we dus, is dat de warmte die weer terugkaatst die gaat tegen die wolk en wordt weer voor een deel geabsorbeerd, maar gaat ook weer voor een deel terug. Het blijft dus heen en weer gaan, eigenlijk, de warmtestraling [*maakt een schets als in Figuur 16*]. Wij hadden dus nu als eerste gedacht van krijg je nu geen warmere aarde, omdat je de wolken toevoegt? Want: nu blijft de straling dus steeds heen en weer gaan.

Leerling benoemt oorspronkelijke eigen idee m.b.t. het wolkmechanisme. *Dirk: les 12, 16'*

In de door de leerling benoemde voorstelling is het idee herkenbaar dat, voor een opwarmend effect, de warmte van de zon niet mag 'ontsnappen'. Absorptie van energie wordt niet benoemd. In de modelleeropdracht beschouwen de leerlingen vervolgens het koelend effect van de wolken; het wordt daardoor niet duidelijk of het leerlingidee over de opwarmende werking zich nog ontwikkelt.

Net als bij de presentatie van het sneeuwmodel wordt de terugkoppeling door de leerlingen geëxpliciteerd.

1. **D:** maar leg eens uit: waarom is het logisch dat als de temperatuur stijgt dat dan het albedo stijgt?
2. **I12:** nou als de temperatuur stijgt dat betekent dat er meer water in de wolk zit en meer water in de wolk meer reflectie dus ook een hoger albedo. Toch?
3. **D:** ja ja! Vertel rustig verder.
4. **I12:** en dat is hier [*verbinding tussen druppelstraal en albedo*] hetzelfde, volgens mij, als je hier een kleinere straal hebt, heb je kleinere druppels en dus meer oppervlakte dus weerkaatst het..

Leerlinguitleg van het mechanisme en het modeldiagram uit de specialisatie 'wolkalbedo'. *Dirk: les 12, 25'*

Het modeldiagram functioneert ondersteunend om het effect van de ene grootheid op de andere te benoemen.

Om tot een wolkmodel te komen, wordt in het lesmateriaal een aantal grote inperkingen gemaakt: een enkel type wolk, alleen een koelend effect, een gemiddelde druppeldichtheid. In hun presentatie van het wolkmechanisme verwijzen de leerlingen hiernaar als hun inperkingen: "Wij hebben gekozen voor de stratocumuluswolk", "Wij hebben hier 100 genomen, 100 druppeltjes per kubieke centimeter". De gemaakte inperkingen worden echter niet betrokken bij de evaluatie van het model. Als afsluiting van de presentatie tunen de leerlingen hun model op aanwijzingen van de docent zo dat het globaal-gemiddelde albedo precies op 0,3 uitkomt – want dan doet het model wat ervan verwacht mag worden. Het opwarmende effect wordt niet meer benoemd als een relevant effect om rekening mee te houden.

De (enige) presentatie van het model over de oplosbaarheid van CO_2 in de oceaan vormt een sterk contrast met het ontwerp- en constructieproces van de leerling. Tijdens de lessen dat hij aan de specialisatie werkte, ontstond bij de docent en de onderzoeker de indruk dat hij nauwelijks begreep wat hij aan het doen was. Bovendien was hij in de laatste les nog niet toegekomen aan een schets van het Powersimmodel. In zijn presentatie slaagt hij er desondanks in om een systematische en correcte weergave te geven van de relevante modelvariabelen en hun onderlinge relaties aan de hand van een modeldiagram te benoemen. Het gepresenteerde Powersimmodel is het model dat de docent de leerlingen heeft toegestuurd.

Net als de leerlingen die het wolkmmodel hebben gemaakt, benoemt hij zichzelf als degene die de benodigde inperkingen voor het model heeft gemaakt (“dus die heb ik buiten beschouwing gelaten in het model”). De leerling heeft geen tijd gehad om het model te testen en te onderzoeken.

Evaluatie

De evaluatie heeft alleen op Dirks uitvoering betrekking.

De eerste analysevraag is of er sprake is van productieve constructieruimte als de leerlingen de deelmodellen presenteren. Dit zou moeten blijken uit de mogelijkheid voor leerlingen om eigen keuzes en beslissingen te maken die ook geëvalueerd worden.

De vakinhoud van de drie specialisaties wordt correct verteld en aan de hand van de modeldiagrammen benoemen de leerlingen goed het (kwalitatieve) effect van de terugkoppelingen. In hun presentaties spreken de leerlingen van ‘hun’ inperkingen en aannames om tot een model te komen, ook al zijn deze in het lesmateriaal zo benoemd. De inperkingen en aannames komen in de modevaluatie eigenlijk niet meer aan bod. Tijdens de presentaties vraagt de docent de leerlingen om gebruikte relaties en schattingen toe te lichten als dit niet aan bod komt en vat af en toe samen wat de kern is van het leerlingverhaal. In vergelijking met de eerdere lessen van Dirk is zijn inbreng nu opvallend minder en bewaakt hij vooral de grote lijn van de specialisatiestof. Al met al is er daarom beduidend meer leerlinginbreng en tot op zekere hoogte ook wel constructieruimte: leerlingen lijken zich in elk geval deels eigenaar te voelen van het gepresenteerde deelmodel. Anderzijds blijkt uit de modevaluatie nog niet dat de inbreng ook productief is geworden.

De leerlingen die het sneeuwmodel hebben gemaakt, benoemen zoals beoogd dat de eindtoestand van het model afhangt van de gekozen beginvoorwaarden. Bij de andere leerlingen is dit inzicht niet herkenbaar aanwezig. Het modelgedrag dat de beide andere deelmodellen laten zien, is hiervoor echter ook niet erg geschikt. Voor een klein deel van de leerlingen (namelijk diegenen die het sneeuwmodel onderzocht hebben) is de modeluitbreiding omwille van het effect van positieve terugkoppeling misschien betekenisvol geworden, maar bij de meerderheid waarschijnlijk niet.

De laatste twee analysevragen vervallen. Er is niet besproken wat het combineren van de verschillende modellen voor consequenties zou hebben voor een temperatuurvoorspelling. Wegens tijdgebrek is de synthese in beide uitvoeringen niet gedaan.

3.4 Conclusies m.b.t. het ontwerp van de eerste ronde

In deze paragraaf trekken we een aantal conclusies over het functioneren van het ontwerp, reflecterend op de verantwoording en op de empirische evaluatie.

Omdat zowel de vakinhoud als de modelleertool nieuw zijn voor het vak natuurkunde, zijn twee belangrijke aandachtspunten voor deze eerste onderzoeksrunde (1) of het niveau van de stof goed is voor de leerlingen en (2) of de docenten er mee uit de voeten kunnen. Daarnaast is natuurlijk de vraag wat de bevindingen zijn van de empirische evaluatie voor de onderzoeksvraag hoe *natuurnetenschappelijke modelontwikkeling, betekenisvol voor leerlingen en productieve constructieruimte* adequaat vorm krijgen in een concreet modelleerproces voor leerlingen in het voortgezet onderwijs.

3.4.1 Niveau en uitvoerbaarheid van het ontwerp

De bedoeling van het ontwerp is dat de leerlingen vier modelleercycli doorlopen, eerst vooral klassikaal en geleid door de docent en later met toenemende zelfstandigheid. Het niveau van de stof in de eerste cycli lijkt goed werkbaar voor de leerlingen, zij hebben immers relevante ideeën voor het basismechanisme. De omvang van de module als geheel is echter te groot. Alleen in de uitvoering bij Dirk hebben de leerlingen hun specialisatieopdrachten volledig uitgevoerd en afgerond met een presentatie. Bij deze opdrachten hebben zij wel meer ondersteuning nodig gehad dan van tevoren verwacht was, zowel wat betreft het bouwen van de Powersimmodellen als het uitvoeren van het modelonderzoek.

In de evaluatie is Dirk over het onderwijsontwerp veel positiever dan Albert, Ben en Chris, terwijl vooraf juist Dirk de meeste twijfels over de uitvoerbaarheid had geuit. Albert, Ben en Chris benadrukken dat het ontwerp moeilijk was en dat de eindproducten van de leerlingen tegenvallen. De grotere tevredenheid van Dirk is goed te begrijpen omdat alleen zijn leerlingen tot een bevredigend einde van de module kwamen. Toch werkten ook Chris' leerlingen met grote inzet aan de modellen en waren het niveau van zijn leerlingen en de omvang van de klas vergelijkbaar met die van Dirk.

Het verschil in succes is te verklaren uit het feit dat Dirk voor zijn uitvoering twee lessen meer uittrok dan Chris. Hoewel Dirks leerlingen, in tegenstelling tot die van Chris, al ervaring hadden met het modelleerprogramma Coach, is dit in de uitvoering niet aan te wijzen. Alleen voor het presenteren van de specialisatiemodellen hebben de leerlingen er duidelijk profijt van gehad dat zij over kant-en-klare deelmodellen konden beschikken. Zij presenteren nu toch het modelgedrag, ondanks dat de leerlingen in de beschikbare tijd niet zelfstandig een werkend model konden construeren.

Daarbij komt dat Dirk in sterke mate zijn gebruikelijke onderwijsstijl volgde. In de beschrijving van Dirks uitvoering is herhaaldelijk opgemerkt dat hij veel meer controle over het verloop hield dan beoogd was en na afloop geeft hij aan dat zijn doceergedrag niet erg verschilde van die in de reguliere natuurkundelessen.

Niettemin week de opzet van het onderwijsmateriaal af van wat de docenten gewend zijn: de opdrachten bouwen op elkaar voort en de theorie en de opdrachten komen niet gescheiden aan bod. Dirk maakte echter eigen keuzes in de uitvoering, door een antwoordenblad en de deelmodellen ter beschikking te stellen in de specialisatie en door voorafgaand aan de module de theorie van de zwarte straler ‘droog’ te behandelen.

In lijn met het ontwerp laat Chris veel meer ruimte voor inbreng van de leerlingen. Dat hij hier in slaagt, is goed te verklaren als dit bij hem de normale lespraktijk is. In de les die ter kennismaking is bezocht is deze veronderstelde normale praktijk inderdaad herkenbaar. Niettemin slaagt hij er niet volledig in om er goed op voort te bouwen.

Het handelen van de participerende docenten is pas zinvol te interpreteren als gelet wordt op hun onderwijsvisies en deze zijn niet uitvoerig onderzocht. De onderwijsopvattingen die onder scheikundedocenten zijn geïdentificeerd bieden een eerste aanzet om de verschillen tussen Chris en Dirk te kunnen duiden (Van Driel, Bulte, & Verloop, 2005). Uit het onderzoek van Van Driel et al. blijken deze onderwijsopvattingen sterk gecorreleerd met verschillende clusters van *curriculum emphases*, impliciete of expliciete boodschappen uit het onderwijs aangaande het doel ervan. De door Chris’ gerealiseerde klassencultuur is goed te duiden met een gerichtheid op leerlingenparticipatie, terwijl Dirk sterk georiënteerd is op de vakstructuur. Hoewel Chris de visie achter het ontwerp deelt om leerlingen te laten bijdragen aan het proces relateert hij concrete onderwijshandelingen niet aan de globale, abstracte uitgangspunten in het ontwerp. Vergelijkbare bevindingen worden gedaan in het onderzoek waarin docenten het onderwijs mee-ontwerpen (Deketelaere & Kelchtermans, 1996).

Het onderwijsmateriaal lijkt daarom globaal genomen voldoende op het niveau van de leerlingen te zijn, maar blijkt met name op het einde te veel en te moeilijk. Over het geheel genomen lijkt het onderwijs uit te voeren zoals bedoeld is, mits dit dicht bij de normale praktijk van de docent ligt.

3.4.2 Natuurwetenschappelijke modelontwikkeling

Een ontwerpdoel is dat de karakteristieke elementen van natuurwetenschappelijke modelontwikkeling tot uitdrukking komen in het modelleerproces dat door de module geïnitieerd wordt.

Een doelgericht probleemoplosproces

Centraal in een natuurwetenschappelijk modelleerproces staat de onderzoeksvraag, die leidt tot een doelgerichte procesgang. Met de vraagstelling in dit onderwijsontwerp, ‘voorspel de globaal-gemiddelde temperatuur in 2200’, beoogden we zo’n doelgericht modelleerproces in gang te zetten.

De richting die ontleend kan worden aan de vraagstelling is bruikbaar voor de eerste modellen die ontwikkeld worden, maar bereidt niet goed voor op de specialisaties. Bij het sneeuwmodel is dit het meest duidelijk, maar het geldt

evengoed voor de beide andere deelmodellen: de vraagstelling richt de aandacht op de numerieke uitkomsten van het model (hoe warm wordt het), terwijl de specialisatiemodellen juist bedoeld zijn om het kwalitatief inzicht in het gedrag van een complex dynamisch systeem te vergroten. Het karakter van deze specialisaties als *toy models*, modellen voor het verklaren van de globale, kwalitatieve karakteristieken van systeemgedrag, is voor leerlingen onvoldoende duidelijk geworden.

Het betrouwbaar voorspellen van de toekomstige temperatuur op aarde is voor de leerlingen geen haalbaar doel en van meet af aan was dat voor hen duidelijk. Beoogd was dat leerlingen zich toch inzetten voor het ontwikkelen van eigen modellen, om zo een beter inzicht te krijgen in de manier waarop klimaatwetenschappers dit probleem aanpakken. Hieronder verstaan we onder meer het identificeren van bronnen van onzekerheid. In de wetenschappelijke praktijk is het vanzelfsprekend dat met de modeluitkomsten ook de onzekerheden worden gespecificeerd. In de opgaven van het lesmateriaal wordt de leerlingen dan ook bij elke cyclus gevraagd om de gemaakte inperkingen en aannames op een rij te zetten en om te reflecteren op de waarde van de modelresultaten in het licht van de gemaakte vereenvoudigingen en de spreiding in uitkomsten. Echter, in de lespraktijk beoordelen de leerlingen hun modellen alleen door de gevonden uitkomsten te toetsen aan bekende gegevens en verwachtingen. Leerlingen betrekken de gemaakte modelkeuzes en de onzekerheden in de ingevoerde waarden niet in hun interpretatie en beoordeling van de gevonden resultaten. In tegenstelling tot de wetenschappelijke praktijk is het in de klassenpraktijk niet vanzelfsprekend om de betrouwbaarheid van de modelvoorspellingen ter discussie te stellen. De formulering van de onderzoeksvraag draagt daar ook niet aan bij: gevraagd wordt naar een waarde voor de temperatuur, niet om de bronnen van onzekerheid in een modelvoorspelling te expliciteren.

Een belangrijk facet van het modellerenproces betreft het construeren van computermodellen. In de lessenreeks wordt de computer in de eerste cyclus ingevoerd. De reden daarvoor is echter een didactische, niet een inhoudelijke. Onze motivatie was om leerlingen zo vroeg mogelijk vertrouwd te maken met Powersim, zodat ze verder in de lessenserie meer en meer zelfstandig met het programma kunnen werken. Voor het evalueren van het 1-laagsmodel is de computer echter niet nodig. De introductie van het computermodel bij het doorrekenen van het 1-laagsmodel komt daarom, inhoudelijk gezien, te vroeg. Leerlingen zien op kwalitatieve gronden in dat het model een evenwichtswaarde kent die niet afhangt van de begintoestand en kunnen deze waarde analytisch bepalen. Een computermodel zou alleen functioneel zijn voor de vraag hoe lang het duurt voordat het evenwicht bereikt wordt vanuit een zekere begintoestand. Deze vraag past echter niet in de inhoudelijke opbouw en is bovendien niet zinvol: het antwoord wordt bepaald door de waarde voor de warmtecapaciteit, maar deze is niet te controleren. Hoewel het Powersimmodel wel geconstrueerd wordt ten behoeve van de analyse van het modelgedrag, is de reden ervoor gekunsteld.

Het doelgerichte karakter van het modelleringsproces is in de uitvoeringen op veel plaatsen niet geëxpliciteerd. Een aantal keren is dit ook ondergraven door omkeringen van activiteiten, het gevolg van overwegingen die de docenten maken om efficiënt met de beschikbare tijd om te gaan. Powersim wordt bijvoorbeeld gedemonstreerd voordat het dynamisch gedrag is gethematiseerd, omdat de opdrachten waarin dit gebeurt ook wel als huiswerk gemaakt kunnen worden. De les erop kunnen leerlingen dan zelf aan de slag met Powersim, zonder dan nog tijd te verliezen aan de uitleg. Ook omwille van de tijd wordt het 2-laagsmodel door de beide docenten geschetst en geëvalueerd voordat de leerlingen er aan toe zijn en krijgen de leerlingen modellen aangeboden voordat hun eigen model af is.

Het verklaren van systeemgedrag op basis van een causaal mechanisme

Het gedrag van complexe systemen komt vooral aan bod in de specialisatiemodellen. De leerlingen ontdekken daar echter niet de relevante gedragingen, enerzijds doordat deze in twee van de drie specialisatiemodellen nauwelijks tot uitdrukking komen in het modelgedrag en anderzijds doordat de leerlingen onvoldoende bedacht zijn op vreemd modelgedrag.

In het onderwijsontwerp en ook in de onderwijsuitvoering zijn dus meerdere knelpunten te signaleren die een doelgerichte procesgang hinderen en/of niet passen bij het onderzoeken van het systeemgedrag.

3.4.3 Betekenisvol voor leerlingen

Om voor leerlingen het doelgerichte proces zichtbaar te maken moeten de modelleringsactiviteiten betekenisvol voor hen zijn, dat is: zij moeten inzicht hebben in het doel, inzien hoe de te ondernemen activiteiten bijdragen aan het realiseren van dat doel en vakinhoudelijke noties op basis waarvan keuzes en beslissingen genomen worden, moeten overeenstemmen met leerlingnoties.

Betekenisvolle ontwikkeling van het basismechanisme

De ontwikkeling van de conceptuele modellen in de eerste drie cycli geeft geen grote problemen wat betreft de doelgerichte ontwikkeling, maar de voorkennis van de leerlingen is wel een aandachtspunt. In de uitvoering van Chris komen leerlingdenkbeelden naar voren die afwijken van het natuurkundige temperatuurbegrip, zoals de temperatuur als resultaat van een netto energieverbruik en opwarming ten gevolge van energie gevangen tussen twee lagen. Ook in een van de eindpresentaties in de klas van Dirk komt dit laatste denkbeeld nog langs. De beoogde lijn van berekening van de modeltemperatuur sluit niet aan op deze leerlingdenkbeelden. Omdat dit in de lesuitvoering niet is onderkend voldoet de uitvoering in dat opzicht niet geheel aan de criteria voor een betekenisvol verloop.

Betekenisvolle constructie van de computermodellen

Beoogd was dat de introductie van de computer gemotiveerd werd door een probleem met het doorrekenen van het modelgedrag. De aanpak waarin eerst het verloop

van een lineair verband geproblematiseerd wordt, lijkt productief. Met name in Chris' uitvoering duiden de data erop dat leerlingen het probleem en de oplossing – continue aanpassing van de grootte van de rekengrootheden – goed begrijpen. Het doel was om vervolgens het stapsgewijs doorrekenen van het verloop te introduceren. Echter, de overgang die in het lesmateriaal gemaakt wordt van het handmatig doorrekenen van een aantal tijdstappen naar het Powersimmodel, is voor de leerlingen niet inzichtelijk en ook in de Powersimstructuur is niet zichtbaar dat er per tijdstap gerekend wordt.

Hoewel een inhoudelijk motief voor de inzet van de computer dus niet is gerealiseerd, hebben de leerlingen er geen moeite mee om de overstap te maken naar een computermodel. Wellicht is het gebruik van de computer sowieso aantrekkelijk voor leerlingen, of wordt het gebruik van de computer voor het modelleren van het klimaat al verondersteld omdat het klimaat en het weer nu eenmaal altijd op een computer berekend worden. Voor het opbouwen van het eerste Powersimmodel is een handelingsvoorschrift gegeven, zodat inzicht in het rekenprobleem ook niet nodig is om een werkend model te krijgen. In de daaropvolgende cyclus bleek dat het de leerlingen aan het gewenste inzicht ontbreekt als er problemen zijn met het modelgedrag. Problemen ten gevolge van de verkeerde tijdstapgrootte werden in de begeleiding herkend en opgelost, maar dergelijke problemen werden niet met de leerlingen samen geanalyseerd.

Betekenisvolle ontwikkeling van de specialisatiemodellen

Al in de verantwoording is opgemerkt dat de leerlingen weinig voorkennis hebben over het modelgedrag dat in de vierde cyclus onderzocht wordt. In de onderwijsuitvoering blijkt dit ook. Het modelgedrag lijkt dus geen motief te verschaffen voor de vierde cyclus. Nu zorgt de schoolcontext er toch wel voor dat leerlingen de gevraagde activiteiten uitvoeren, ook als ze daar niet de zin van inzien. Niettemin lijken de leerlingen goed gemotiveerd: de inzet van de leerlingen tijdens de cyclus is groot en ze werken geconcentreerd.

Wellicht weerspiegelt hun werkhouding dat de leerlingen de uitbreiding wel zinvol vinden. Een reden waarom de uitbreiding mogelijk zinvol is, is gelegen in hun idee van wat een model meer betrouwbaar maakt, namelijk: hoe beter het model een afspiegeling is van de werkelijkheid, hoe betrouwbaarder de uitkomsten. Kort gezegd: hoe meer elementen in het model, hoe beter. Dan is het wél zinvol om de specialisatiemodellen toe te voegen. Het idee rijmt echter niet goed met dat van een *toy model*, waarin het gaat om het bestuderen van kwalitatieve eigenschappen van complex gedrag. Ook is de spanning merkbaar tussen enerzijds het toevoegen van meer elementen om het model te verbeteren en anderzijds het minimaliseren van de modelinhoud zodat het goed genoeg is.

Opbouw van het lesmateriaal

In het lesmateriaal is zoveel mogelijk inzichtelijk gemaakt om welke reden een bepaalde modelleerstep of opdracht aan bod komt. De gedachte hierachter was dat dit een betekenisvolle uitvoering van elke cyclus mogelijk maakt. Elke cyclus is uitge-

werkt in tekst en opdrachten waarin is geëxpliciteerd welk doel nagestreefd wordt, welke beperkingen gemaakt worden en welke fysische processen aan de orde zijn.

Deze opzet van het lesmateriaal bleek echter het beoogde modelleerproces niet goed te ondersteunen. Een aantal keren stuurden de leerlingen het traject in de gewenste richting op basis van de titels voor de verschillende modellen of de inleidende teksten. Daarmee wordt de eigen inbreng van leerlingen in een klassengesprek overbodig, terwijl het bovendien niet altijd besproken wordt waarom de ingeslagen weg een goede is. In de eerste cyclus waren expliciete activiteiten gepland om plenair een kwalitatief model te schetsen en de benodigde gegevens te identificeren. Daar hebben de leerlingen relevante inbreng bij gehad, zonder zich te baseren op het lesmateriaal. In de volgende cycli werden deze stappen niet klassikaal gemaakt. Dit verstoorde niet het onderwijsverloop, omdat het benodigd model en de benodigde gegevens toch wel benoemd stonden in het lesboek. De leerlingen konden zo de vragen maken zonder te bedenken waarom een vraag op zeker moment aan de orde is. Het ontwikkelen van de modellen verliep dus in feite opdracht-gestuurd, terwijl de essentie van het modelleren nu juist is om de benodigde deelproblemen te identificeren die een probleemstelling oplosbaar maken. In de huidige opzet van het lesmateriaal ontbreekt de noodzaak om dit te doen.

3.4.4 Productieve constructieruimte

Beoogd was dat leerlingen bijdragen aan het proces van modelontwikkeling. Met productieve constructieruimte is bedoeld dat leerlingen vrijheid hebben om eigen ideeën uit te werken die ze ook kunnen verantwoorden.

Opvallend is het verschil tussen beide uitvoeringen wat betreft de leerlingenbijdragen tijdens de klassikale besprekingen. Chris geeft veelvuldig de ruimte aan de leerlingen. Bovendien bouwt hij ook voort op de bijdragen van de leerlingen. Hij is echter niet zo kritisch in de evaluatie van de leerlingeninbreng, waardoor de constructieruimte vaak onproductief blijft. Dirk is overwegend zelf aan het woord. Ook als Dirk op verzoek van de onderzoeker meer ruimte biedt voor leerlingeninbreng blijft de respons gering. Hoewel Dirks leerlingen niet zo actief bijdragen in de plenaire gedeelten, luisteren ze wel met aandacht naar zijn verhaal. Of de leerlingen gebruik maken van de gelegenheid om bij te dragen hangt dus niet alleen af van de geboden ruimte op dat moment, maar ook van het verwachtingspatroon ontstaan in de reguliere lessen, waarin duidelijk is wat de rol en bijdragen zijn van de docent en van de leerlingen.

Een enkele lessenreeks over modelleren is een (te) beperkte onderwijseenheid om zoiets als een basisvaardigheid in het modelleren te realiseren. Niettemin was onze gedachte achter de cyclische opbouw onder meer dat dit de gelegenheid geeft aan leerlingen de opeenvolgende cycli steeds meer zelfstandig te doorlopen. Elke cyclus in het lesmateriaal is opgebouwd met de onderdelen 'ontwerpen', 'bouwen' en 'testen'. Deze modelleerstappen zijn geëxpliciteerd om de leerlingen te helpen met het plannen en uitvoeren van elke cyclus. Zoals ook hiervoor is opgemerkt, ontbreekt de noodzaak om zelf de benodigde modelleerstappen te identificeren. Na

afloop van de eerste cyclus heeft Chris deze stappen wel laten identificeren, maar de leerlingen ontnemen er geen ondersteuning aan voor de tweede cyclus. De structuur op zichzelf is dus niet toereikend.

Zowel individueel als in het klassenproces zijn leerlingen vooral betrokken geweest bij de uitvoerende taken, zoals het vinden van de benodigde modelrelaties en parameterwaarden en het bouwen en doorrekenen van de Powersimmodellen. Voor de regulerende taken hebben zij vrijwel geen verantwoordelijkheid gedragen, zoals het opdelen van de complexe hoofdvraag in deelproblemen of het plannen van activiteiten. Leerlingen hebben wel inbreng gehad in de inhoudelijke opdrachten, maar met wisselende kwaliteit. Een van de terugkomende modelleeractiviteiten waarvoor productieve constructieruimte relevant was, was het maken van parameterschattingen. Veelal werkten de leerlingen in hun modellen echter niet met een zelfbepaalde waarde, maar met een door de docent gekozen waarde. Dit is begrijpelijk omdat het voor de leerlingen de meeste zekerheid geeft als er een waarde door de docent wordt goedgekeurd, terwijl het voor de docenten eenvoudiger is om overzicht te houden over de modelkwaliteit als overal met dezelfde waarden gerekend wordt.

Een toenemende onafhankelijkheid wordt onvoldoende zichtbaar. Een belangrijke oorzaak is dat de leerlingen te weinig gelegenheid hebben om dit te laten zien. Vanaf de tweede cyclus wordt het ontwerpen en specificeren van een model niet plenair gedaan en in het lesmateriaal wordt er niet om gevraagd. In tegenstelling tot de eerste modelleercyclus wordt bij de ontwikkeling van het 2-laagsmodel geen leerlingeninbreng gevraagd om het fysische mechanisme te expliciteren of om de benodigde gegevens te identificeren. Het 'vertrouwd raken met het domein' gold bovendien niet voldoende voor de specialisaties. Kennis van de vakinhoud uit het 1- en 2-laagsmodel is niet voldoende voor het modelleren van de oplosbaarheid van CO₂ en het wolkalbedo, waarvoor de leerlingen zich veel nieuwe stof moesten eigen maken. De eigen verantwoordelijkheid van de leerlingen was daardoor beperkt. Het modelleren van de sneeuwbedekking is in dit opzicht eenvoudiger omdat het mechanisme intuïtiever is.

Om productieve constructieruimte te realiseren moet dus in elk geval in het onderwijsontwerp zelf voor leerlingen meer gelegenheid komen om eigen ideeën aan te dragen, zowel ten aanzien van het te modelleren mechanisme als de schatting van modelparameters. Het slagen ervan is echter afhankelijk van de ruimte en begrenzingen die de docent biedt. In hoeverre hij hierin slaagt, lijkt op de eerste plaats bepaald te worden door het normale onderwijspatroon: Chris' leerlingen komen wel met inbreng, zodat Chris zelf 'slechts' de rationale van het proces hoeft te bewaken, terwijl Dirk en zijn leerlingen een nieuwe klassencultuur moeten ontwikkelen.

3.5 Implicaties voor een herontwerp

Het onderwijsontwerp lijkt voldoende bruikbaar om verder te ontwikkelen. Het niveau van de vakinhoud is grotendeels goed voor de leerlingen. Zowel in het ontwerp als in de uitvoering is het een en ander te verbeteren,. Onderstaande punten vormen de uitgangspunten voor een herziening van het onderwijsontwerp.

3.5.1 De introductie van stapsgewijs rekenen

In de onderwijsuitvoeringen van de eerste ronde lijken de leerlingen geen probleem te hebben om de computer te gaan gebruiken. De uitvoeringen overtuigen echter niet dat het beoogde inhoudelijk motief om de computer in te zetten ook gerealiseerd is. Voor de leerlingen lijkt het eerder vanzelfsprekend of gewoon aantrekkelijk om met de computer te werken. Zij kunnen echter het modelgedrag niet verklaren uit de rekenregels en ze herkennen eenvoudige problemen niet, zoals het effect van een te grote tijdstap op het modelgedrag. Een herziening van het ontwerp is nodig om de leerlingen inzicht te geven in de noodzaak om de computer te gebruiken. Als de leerlingen begrijpen waarom het stapsgewijs doorrekenen nodig is en dit kunnen toepassen, zullen zij ook beter in staat zijn om (problemen met) modelgedrag te verklaren.

Omwille van de samenhang in de module werd in het eerste ontwerp beoogd om binnen dezelfde context over klimaatmodelleren een motief op te roepen voor het gebruik van de computer. Het is gebleken dat de klimaatmodule voor de leerlingen moeilijk is. We zullen daarom in een aparte module voorafgaand aan de klimaatmodule meer aandacht besteden aan de introductie van het stapsgewijs rekenen. Binnen de klimaatmodule kan gebruik worden gemaakt van de eerdere ervaringen met Powersim (transfer). Zo'n 0-module wordt natuurlijk wel weer ontwikkeld met inachtneming van dezelfde uitgangspunten (natuurwetenschappelijke modelontwikkeling, betekenisvol voor leerlingen, en productieve constructieruimte), maar hoeft geen complex systeem te betreffen.

3.5.2 Een richtinggevende vraagstelling

De vraagstelling vormt de aanleiding voor een modelleerproces. De vraag moet voldoende interessant zijn om de leerlingen te kunnen motiveren, en voldoende uitdagend om diverse aspecten van het modelleerproces aan bod te laten komen.

De vraagstelling waaraan de leerlingen in de eerste ronde werkten, is het voorspellen van de globaal-gemiddelde temperatuur in 2200. Het beantwoorden van de vraag geeft zeker aanleiding tot een modelleerproces, maar richt de aandacht van de leerlingen ook op numerieke uitkomsten. In de eerste twee modelleercycli, waarin de huidige temperatuur op aarde verklaard wordt, gaat dit nog goed. De specialisatiemodellen zijn echter niet bedoeld om een betrouwbare waarde voor de temperatuur te voorspellen, maar om modelgedrag te onderzoeken. Beoogd werd bovendien dat met de modeluitkomsten ook onzekerheden in voorspellingen

gethematiseerd worden. Dit volgt echter niet uit de vraagstelling en is in het onderwijs ook niet vanzelfsprekend. Een goede voorspelling geven van de temperatuur is bovendien voor de leerlingen geen realistisch doel, ook niet als zij meerdere mechanismen in hun model opnemen. We hebben daarom een andere vraagstelling nodig die het proces beter kan sturen.

3.5.3 Een inzichtelijk specialisatiemodel

De drie specialisaties en de synthese uit het eerste ontwerp weerspiegelen een kenmerk van de klimaatwetenschappelijke praktijk: het verdelen van het werk, het uitwisselen van de bevindingen en het combineren van deelmodellen. Omdat het de laatste cyclus is uit de module werd beoogd dat leerlingen aan het laatste model het meest zelfstandig zouden werken.

In de praktijk komen de leerlingen niet toe aan het combineren van de deelmodellen. Bovendien was het inzicht van de leerlingen in de afzonderlijke specialisatiemodellen onvoldoende om het gedrag van het totaalmodel zinvol te onderzoeken. De vakinhoud van de specialisaties ‘oplosbaarheid van CO₂ in de oceaan’ en ‘wolkalbedo’ was bovendien te moeilijk om zelfstandig in model te zetten. Hoewel het onderzoek aan het modelgedrag van het sneeuwmodel niet goed uit de verf kwam, waren er geen moeilijkheden met het begrijpen van het mechanisme.

In een herontwerp zullen we daarom de specialisaties ‘oplosbaarheid van CO₂ in de oceaan’ en ‘wolkalbedo’ achterwege laten. Alleen de uitbreiding ‘sneeuwbedekking’, dat een intuïtief inzichtelijk mechanisme heeft, blijft over. Ook het feit dat het onderzoek aan het modelgedrag niet goed liep, vormt een reden om juist deze modeluitbreiding over te houden. Het model kent grote sprongen van de ene extreme toestand naar de andere als gevolg van de terugkoppeling door sneeuwbedekking, is gevoelig voor de begincondities, en de condities voor een sprong naar het ene extremum zijn niet dezelfde als voor de sprong naar het andere. Het begrijpen van deze modelgedragingen is een waardevol inzicht in complexe dynamische systemen en is een belangrijke bron van onzekerheid voor modelvoorspellingen. Deze inzichten kunnen beter gethematiseerd worden in de uitbreiding ‘sneeuwbedekking’ dan in een van beide andere.

3.5.4 Ruimte voor productieve leerlinginbreng

Het lesmateriaal uit de eerste ronde is een doorlopende tekst waarin door middel van opdrachten is opengelaten wat de leerlingen moeten doen. Door deze structuur, waarin informatie afgewisseld wordt met opgaven, is er weinig zicht op het vaardiger worden van de leerlingen. Vanaf de tweede cyclus was er geen ruimte meer voor de leerlingen om een kwalitatief fysisch model te schetsen of om de benodigde gegevens te identificeren. Daardoor konden leerlingen de vragen maken zonder in te zien waarom een vraag aan de orde is.

Om een leerlijn modelleren vorm te geven moet er in elk geval de mogelijkheid zijn dat leerlingen meer verantwoordelijkheid krijgen voor de voortgang van het

proces. Om dit te bereiken moet de docent meer werk maken van het klassikale proces en moeten de leerlingen niet zondermeer in het lesmateriaal aan de slag kunnen. In een herontwerp zullen we daarom de modelleercycli zoveel mogelijk procesmatig sturen, niet inhoudelijk.

3.5.5 Aandacht voor leerlijnen in het modelleerproces

In het ontwerp en verantwoording uit de eerste ronde is onvoldoende gespecificeerd hoe de ontwikkeling van een basisvaardigheid modelleren verloopt. In de herziening van het ontwerp is er met name aandacht voor de ontwikkeling van vier aspecten van het modelleerproces, namelijk:

- de vorming van het kwalitatief model
- het maken van schattingen
- het opstellen van de differentievergelijkingen
- de analyse van modelgedrag

Bij het maken van schattingen werd in het eerste onderwijsontwerp gevraagd om een puntschatting. Een spreiding in uitkomsten ontstaat als verschillende leerlingen verschillende waarden nemen. Leerlingen moesten wel beargumenteren hoe zij aan hun waarde komen, maar verschillende waarden kunnen even goed zijn. In het herontwerp schat elk leerling een redelijke onder- en bovengrens, zodat elke leerling een acceptabele spreiding krijgt. Behalve het albedo α wordt nu ook de absorptie- en emissiecoëfficiënt ε geschat. De geschatte waarden voor de warmtecapaciteit van de aardlaag en de atmosfeerlaag hadden geen consequenties in het eerste ontwerp. Nu wordt onderzocht hoe lang het duurt voordat de temperatuur zich aanpast aan een instantane verandering in ε . Op basis hiervan wordt beargumenteerd of een computermodel noodzakelijk is voor de scenariostudies.

In een herontwerp zullen we daarom het kwalitatief begrijpen en verklaren van modelgedrag meer aandacht geven. Ook aanloopverschijnselen en (eenvoudige) problemen met Powersim-grafieken kunnen worden geanalyseerd en verklaard. Hiervoor is het nodig dat de modelresultaten gerelateerd kunnen worden aan de modelvergelijkingen. Het begin van een leerlijn voor het opstellen van differentievergelijkingen ligt al bij de introductie van het stapsgewijs rekenen, dus in een aparte module.

4. Tweede onderzoeksrunde

Het gewijzigde onderwijsontwerp vormt het onderwerp van de tweede onderzoeksrunde. Eén implicatie van het vorige hoofdstuk is om numerieke integratie in een aparte module te introduceren. De verantwoording en de empirische evaluatie hiervan worden besproken in paragraaf 4.1; de module gaat vooraf aan de herziene temperatuurmodule. Zowel deze nieuwe module als de herziene temperatuurmodule zijn door één docent uitgevoerd, Chris. De belangrijkste veranderingen in de temperatuurmodule zijn dat de leerlingen aan een gewijzigde vraagstelling werken, de vakinhoud beperkt is en er meer nadruk ligt op de vorming van het fysisch kwalitatief model. Ook is geprobeerd om meer ruimte te laten voor het vormgeven van het modelleringsproces in de klas, waardoor meer verantwoordelijkheid bij Chris komt te liggen om het proces te bewaken. De verantwoording van deze wijzigingen en de uitvoering komen aan bod in paragraaf 4.2. In de slotparagraaf evalueren we de ontwerpherzieningen.

4.1 Een inleidende module over stapsgewijs rekenen

4.1.1 Verantwoording van het ontwerp

Doelstellingen

Naar aanleiding van de onderwijsuitvoeringen in de eerste ronde is geconcludeerd dat een herziening nodig is om te bereiken dat de leerlingen inzicht krijgen in de noodzaak om de computer te gebruiken. Als de leerlingen begrijpen waarom het stapsgewijs doorrekenen nodig is en dit kunnen toepassen, zullen zij ook beter in staat zijn om (problemen met) modelgedrag te verklaren.

Om het ontwerp van de eerste ronde te ontlasten wordt in deze tweede onderzoeksrunde het stapsgewijs rekenen geïntroduceerd in een aparte module, voorafgaand aan de klimaatmodule. Binnen de klimaatmodule kan gebruik worden gemaakt van de eerdere ervaringen met Powersim en met het opstellen van differentievergelijkingen in het bijzonder. De nieuwe module wordt ontwikkeld met inachtneming van dezelfde doelen (natuurwetenschappelijke ontwikkeling, betekenisvol voor leerlingen en productieve constructieruimte), maar betreft geen complex systeem. Concreet wordt beoogd dat leerlingen:

- een eenvoudig dynamisch proces kunnen beschrijven, uitgaande van tijdstappen;
- de tijdstapgrootte variabelen kunnen interpreteren en gebruiken in relatie tot de karakteristieke tijd van het proces;
- de differentievergelijkingen voor een eenvoudig dynamisch proces kunnen opstellen;
- begrijpen hoe de differentievergelijkingen in Powersim gerepresenteerd worden.

In deze paragraaf wordt het ontwerp van zo'n module verantwoord en de uitvoering ervan geëvalueerd.

Radioactief verval als context

Radioactief verval is wellicht een bruikbare context om numerieke integratie betekenisvol te introduceren. Hieronder wordt beargumenteerd welk probleem voor de leerlingen interessant is en hoe numerieke integratie een oplossing biedt voor het probleem. Daarnaast is te verwachten dat leerlingen kunnen bijdragen aan de oplossing omdat het onderwerp goed in het natuurkundecurriculum past. De vakinhoud, ten slotte, sluit goed aan op de syntax van Powersim.

Een uitdagende en bruikbare probleemstelling

Een van de onderdelen in het normale onderwijs over radioactief verval is dat leerlingen de halveringstijd van radioactieve stoffen bepalen. Hiervoor leren zij twee manieren: door deze af te lezen uit een gegeven vervalcurve, of door de halveringstijd te berekenen als de vervalconstante of de stof in de opgave is gegeven. In dat laatste geval kunnen zij de halveringstijd berekenen middels de relatie

$$\lambda = \frac{\ln 2}{\tau_{1/2}}$$

waarin λ de vervalconstante is en $\tau_{1/2}$ de halveringstijd; dit verband is standaard gegeven.

Rutherford bepaalde als eerste de halveringstijd van een langlevende stof, radium-226. De halveringstijd hiervan is 1600 jaar. Door de grote halveringstijd is er gedurende de tijd van meten echter geen merkbare verandering van de activiteit. Het volgende probleem is daarom voor de leerlingen wellicht interessant: hoe is, uitgaande van Rutherfords meetgegevens, toch de halveringstijd van radium te bepalen?

Curriculuminpassing en leerlingbijdragen

Het onderwerp vormt een aanvulling op reguliere lessen over radioactiviteit. Om het gestelde probleem op te lossen worden basisbegrippen bekend verondersteld, zoals activiteit en halveringstijd, en wordt gebruik gemaakt van het verband tussen de activiteit en (de verandering van) het aantal atomen. Normaal gesproken komen deze onderwerpen bij de lessen over radioactiviteit aan bod. Dit geldt ook voor het begrip van de vervalconstante en het kunnen rekenen met e-machten; kennis hiervan is niet nodig voor de voorgestelde probleemstelling, maar belemmert de beoogde oplossingroute ook niet. Het is daarom te verwachten dat leerlingen na het volgen van hun gewone lessen over radioactiviteit productief kunnen bijdragen aan het uitwerken van een stapsgewijze berekening van radiumverval.

Aansluiting bij de modelleersoftware

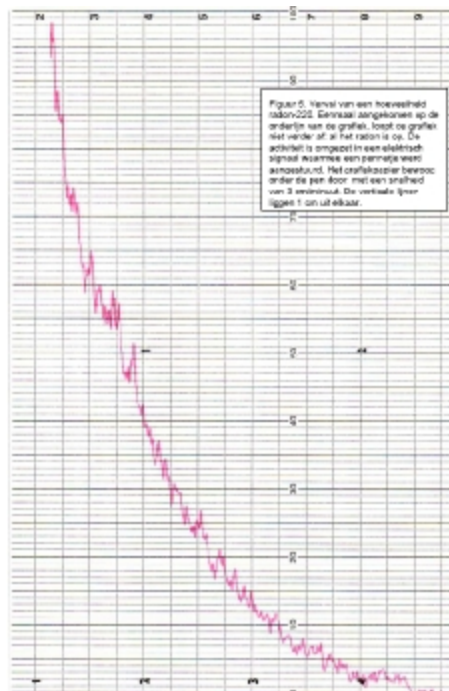
De stromingsmetafoor van Powersim stemt goed overeen met de beschrijving van radioactief verval als een hoeveelheid radioactief materiaal die toe- of afneemt.

Beoogd lesverloop

Het probleem waaraan de leerlingen werken en waarvoor numerieke integratie een oplossing vormt, is hoe de halveringstijd van radium te bepalen valt uitgaande van Rutherfords meetgegevens; deze zijn gegeven. Om hen voor dit probleem te motiveren bepalen de leerlingen eerst de halveringstijd van het kortlevende radon-220 (een meetgrafiek van de radonactiviteit is opgenomen in het lesmateriaal; Figuur 17). Dit relateert het bepalen van de halveringstijd aan iets dat je kunt meten. In een klassengesprek worden de uitkomsten van leerlingen geïnventariseerd voor de halveringstijd van radon en (verschillen in) de meetmethode besproken.

We verwachten dat, tegen de achtergrond van de werkwijze met het radon, het de leerlingen duidelijk wordt dat een aanpak voor het langlevende radium-226 problematisch is. De leerlingen maken een grafiek van de activiteit die Rutherford mat, om zo het verschil tussen het snelle verval en de (schijnbaar) constante activiteit te visualiseren. Ze schatten een waarde voor de halveringstijd door een lineaire afname te veronderstellen. Deze ondergrens geeft een idee van de orde van grootte. Om de halveringstijd te kunnen schatten, hebben de leerlingen het inzicht nodig dat de activiteit gelijk is aan het aantal deeltjes dat vervalst. Als leerlingen dit nog niet weten, wordt dit door de docent benoemd. Op grond van de gevonden halveringstijd bedenken de leerlingen dat het problematisch wordt om de halveringstijd te bepalen op eenzelfde wijze als bij radon, omdat het meten van een verandering in de activiteit veel langer duurt dan menselijk haalbaar is. De docent kondigt aan dat zij een oplossing zullen uitwerken om het radiumverval te berekenen.

In het lesmateriaal wordt de oplossingsrichting aan de hand gedaan om de halveringstijd te berekenen door een model te ontwikkelen. Om met de meetgegevens van Rutherford daadwerkelijk het radiumverval door te rekenen en de vervaltijd te bepalen is inzicht nodig in het mechanisme van radioactief verval. Hoewel de activiteit A gedurende enige tijd Δt niet meetbaar verandert, kan in principe berekend worden hoeveel atomen N overgebleven zijn na de meettijd. Met het inzicht dat de activiteit rechtevenredig is met de hoeveelheid radioactief



Figuur 17. Vervalgrafiek van radon-220 zoals opgenomen in het lesmateriaal.

materiaal zijn na elke volgende tijdstap een nieuwe N en A te bepalen. Om het verval stapsgewijs door te rekenen hebben de leerlingen dus een ‘ordering’ van N en A nodig, het verband tussen A_t en N_t , en de introductie van de tijdstap Δt . De leerlingen maken opdrachten in het lesmateriaal waarmee zij de benodigde gegevens verzamelen en ordenen (zie hieronder). Deze opdrachten worden in de tekst steeds verantwoord, maar de oplossingsrichting en de opgaven worden ook in een klassengesprek besproken zodat de docent ervoor kan zorgen dat alle leerlingen het idee erachter begrijpen.

De leerlingen stellen een eerste uitdrukking op voor $N_{t+\Delta t}$, voortbouwend op de uitdrukking voor Δt : $N_t = N_0 - A_0$; deze is gegeven in het lesmateriaal). In het lesmateriaal wordt benoemd dat, om A na één tijdspanne Δt te kunnen berekenen, bekend moet zijn wat A_t is bij elke N_t . In een gedachte-experiment vergroten en verkleinen de leerlingen de hoeveelheid radium waaraan Rutherford mat, op basis waarvan ze de evenredigheid tussen de activiteit en de hoeveelheid van een radioactieve stof expliciteren. Deze vervalconstante berekenen zij met Rutherfords gegevens.

De gezochte halveringstijd is nu te bepalen. Leerlingen berekenen handmatig A_3 , de activiteit na drie seconden. Op basis daarvan benoemen zij als rekenproblemen dat de verandering per seconde te klein is om te kunnen noteren en dat er teveel rekenstappen nodig zijn om de geschatte waarde van de halveringstijd door te rekenen. Zij bepalen vervolgens een waarde voor Δt waarmee praktisch te rekenen valt en een waarde voor Δt die voldoende nauwkeurig is.

De wiskundige beschrijving voor het model is nu bekend:

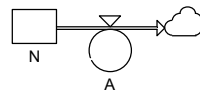
$$N_{t+\Delta t} = N_t - A_t \cdot \Delta t$$

$$A_t = \lambda \cdot N_t$$

Powersim wordt geïntroduceerd als rekenhulp. Een basisstructuur voor het verval is gegeven, zoals in Figuur 18. De leerlingen expliciteren hoe in de grafische weergave zichtbaar is dat er sprake is van een afname. De leerlingen construeren een vervalmodel op basis van een handelingsvoorschrift. Daarin is geëxpliciteerd dat Δt door Powersim wordt toegevoegd. De leerlingen runnen het model met hun eerder bepaalde waarde voor de tijdstapgrootte. Ze onderzoeken in hoeverre de tijdstapgrootte de gevonden waarde voor de halveringstijd beïnvloedt. De docent inventariseert de halveringstijden die de leerlingen hebben gevonden.

Na het bepalen van de halveringstijd voor radium met het computermodel bepalen de leerlingen nog het verband tussen λ en de halveringstijd, om een analytische oplossing te vinden die verklaart dat Rutherford, zonder computer, ook tot een oplossing kon komen. Dit wordt geverifieerd voor een radonmodel.

Om de bruikbaarheid van de computer in te zien modelleren de leerlingen ook een deel van de vervalketen van radium. Leerlingen stellen nu zelf de modelvergelijkingen op. Ze gaan na wanneer de totale activiteit stabiliseert wanneer er dochters ontstaan. Vervolgens bepalen ze hoe lang het duurt voordat alle dochters



Figuur 18.
Basisstructuur van een Powersimmodel voor radioactief verval.

praktisch verdwenen zijn als het gas radon, de eerste en langstlevende van de gevormde radioactieve dochters, ontsnapt. De leerlingantwoorden worden door de docent geïnventariseerd. Als er verschillen zijn, wordt besproken of deze te verwaarlozen zijn. Indien niet, dan wordt de rekenwijze nagegaan.

Natuurwetenschappelijke modelontwikkeling

Natuurwetenschappelijke modelontwikkeling komt als volgt aan bod:

- er wordt een probleem geformuleerd met een toetsbare uitkomst;
- er wordt een causaal mechanisme geformuleerd dat het gedrag van de activiteit verklaart en dat een antwoord geeft op het probleem;
- de differentievergelijkingen worden opgesteld en geïmplementeerd om het model door te kunnen rekenen;
- het effect van gemaakte vereenvoudigingen op het resultaat wordt onderzocht.

Betekenisvol voor leerlingen

Numerieke integratie is voor de leerlingen betekenisvol als zij inzicht hebben in het doel van de berekening en inzien hoe de rekenwijze bijdraagt aan het realiseren van het gestelde doel.

Inzicht in het doel, het bepalen van de halfwaardetijd van radium, vereist dat leerlingen weten wat de halveringstijd is en dus wat een radioactieve stof is. Te verwachten is dat leerlingen dit doel kunnen begrijpen als zij hun reguliere lessen over radioactiviteit gehad hebben. Uit die lessen zijn de volgende ideeën nodig:

- de activiteit is het aantal deeltjes dat per tijdseenheid vervalst;
- de hoeveelheid straling hangt af van de hoeveelheid aanwezig radioactief materiaal;
- voor kortlevende stoffen is de halveringstijd te bepalen uit de vervalgrafiek.

Zij zien in hoe het stapsgewijs doorrekenen van het vervalproces leidt tot de gezochte halfwaardetijd als ze begrijpen dat:

- op basis van een gegeven N_0 en A_0 wel een veranderde N maar niet een veranderde A bekend is;
- A_t als functie van N_t te berekenen is vanwege rechtevenredigheid van de activiteit met het aantal aanwezige deeltjes;
- het vervalproces stap na stap doorgerekend kan worden omdat Rutherfords meetgegevens een startpunt vormen voor deze berekening.

Powersim is voor de leerlingen een betekenisvolle modelleertool als zij inzien dat

- grote tijdstappen nodig zijn om het vervalproces handmatig door te rekenen, hetgeen ten koste gaat van de nauwkeurigheid;
- de computer het herhaaldelijk uitvoeren van de rekenstap snel en nauwkeurig doet.

Het nut van de computer is dus het herhaaldelijk nauwkeurig en snel doorrekenen van de modelvergelijkingen.

Een analytische oplossing kan voor de leerlingen slechts beperkt betekenisvol worden gemaakt. Zij kunnen wel inzien dát er een alternatieve berekening mogelijk moet zijn, aangezien Rutherford destijds niet over een computer beschikte maar wel een waarde vond. In principe kennen de leerlingen zowel de definitie van een afgeleide als de afgeleide van de e -macht, zodat de e -machten voor het verval van A en N beargumenteerd kunnen worden ingevoerd. Het is echter niet te verwachten dat de leerlingen op basis van hun eigen wiskundekennis kunnen aansturen op de analytische oplossing, *i.e.* de wiskundige kennis hebben om op te merken dat geldt

$$N' = -\lambda \cdot N$$

en dit als eigenschap van de e -macht identificeren. Stapsgewijze berekening van de halveringstijd biedt dan wél zicht op succes, zodat een computermodel voor de leerlingen betekenisvol geïntroduceerd kan worden.

Productieve constructieruimte

Het is niet te verwachten dat leerlingen zelf het numeriek doorrekenen van het radiumverval als oplossingsrichting kunnen identificeren. Dit wordt daarom zowel in het lesmateriaal als door de docent geïntroduceerd. Door middel van opdrachten in het lesmateriaal verzamelen en ordenen de leerlingen de benodigde gegevens.

Voor het stapsgewijs doorrekenen van het radiumverval kiezen de leerlingen zelf een tijdstapgrootte. Hiervoor beslissen ze over een criterium voor welke verandering in de activiteit gedurende dat tijdsinterval acceptabel is. Met deze stapgrootte wordt ook het hierna te ontwikkelen Powersimmodel doorgerekend.

Het eerste Powersimmodel construeren leerlingen aan de hand van een handelingsvoorschrift. Daarna construeren de leerlingen nog eenzelfde vervalmodel voor radon en een uitgebreider vervalmodel voor de keten van radium met vijf radioactieve dochters. Voor de structuur van deze Powersimmodellen krijgen de leerlingen geen nadere aanwijzingen.

4.1.2 Procedure en databronnen

Uit de uitvoeringen van de eerste ronde bleek dat aandacht voor leerlinginbreng de ene docent makkelijker ligt dan de andere. De uitvoering (en daarmee ook de evaluatie van het ontwerp) lijkt de beste kans van slagen te hebben als de ‘didactische cultuur’ in de klas al zoveel mogelijk overeenstemt met de beoogde lesopzet. Dit laatste vormde daarom een criterium bij de keuze voor docenten in de tweede ronde. Vanwege de gewenste verbinding tussen de radioactiviteitsmodule en de temperatuurmodule heeft het de voorkeur om met een van de ervaren docenten te werken, die zowel het programma Powersim als de vakinhoud van de temperatuurmodule kent. Van de vier docenten uit de eerste ronde gaven Albert en Chris het meest gehoor aan de inbreng van de leerlingen. Om praktische redenen kon het nieuwe materiaal alleen door Chris uitgetest worden.

Het nieuwe ontwerp over radioactief verval is door Chris uitgevoerd in een nieuwe klas in mei 2006, aansluitend aan de reguliere lessen over radioactiviteit. Er zaten elf leerlingen in de klas. Eén was een zittenblijver; hij heeft dus ook de eerste

onderzoeksrunde meegedaan. Eén andere leerling was slechts een enkele les aanwezig omdat zij twee dagen per week een alternatief onderwijsprogramma volgde buiten de school, aan het Junior College van de Universiteit Utrecht.

Gedurende de ontwikkeling van de module heeft Chris tweemaal de gelegenheid gehad om op een conceptversie van het materiaal te reageren. Ter voorbereiding op het modelleren van radioactief verval is er één bespreking met Chris geweest over de module als geheel en verder één voor elke les afzonderlijk. Het doel van de bespreking van de lessenserie als geheel was om de rationale van het ontwerp toe te lichten. In de bespreking van de afzonderlijke lessen is besproken hoe het onderwijs aan bod moest komen. De uitvoering van de radioactiviteitsmodule duurde vier lessen van elk 50 minuten.

Alle lessen zijn opgenomen op video en getranscribeerd. Van de gesprekken tijdens groepswork, tussen de leerlingen en met de docent of onderzoeker, is een audio-opname gemaakt. Uit de eerste onderzoeksrunde is gebleken dat enkel audio-opnamen niet voldoende zijn om het zelfstandig werken van de leerlingen te analyseren, in het bijzonder als zij achter de computer werken. Daarom zijn in deze ronde ook schermregistraties gemaakt met Camtasia Studio 3. De antwoordenboekjes van negen leerlingen zijn na afloop gekopieerd. Bovendien hebben alle leerlingen na afloop een vragenlijst ingevuld om inzicht te krijgen in hoeverre zij het betreffende onderwerp gewaardeerd hebben, het onderwijs betekenisvol voor hen was en of zij productief konden bijdragen.

4.1.3 Het voorbereidingstraject met de docent

In de bespreking van de radioactiviteitsmodule als geheel vertelt de onderzoeker over de rationale van het ontwerp. Aan de hand van het lesmateriaal legt hij uit wat de centrale vraagstelling is voor het onderwijs, door middel van welke opgaven deze opgeroepen wordt en hoe het stapsgewijs rekenen als oplossingsmethode wordt gerealiseerd. Vragen van de docent bij de uitleg van de onderzoeker betreffen de lesstof die hij in de reguliere lessen over radioactiviteit (voorafgaand aan de module) aan bod mag laten komen en wanneer de leerlingen Powersim nodig hebben. Chris heeft geen vragen bij de opbouw van het materiaal en geeft aan deze te begrijpen.

De onderzoeker streeft na dat de docent inzicht heeft in de opbouw van het lesmateriaal zodat deze in staat zal zijn om op basis van dit inzicht zijn handelen in de lessen te sturen (bijvoorbeeld door naar de benodigde leerlingbijdragen te vragen en te evalueren). Chris' vragen weerspiegelen enerzijds zijn onzekerheid over wat hij de leerlingen wel en niet mag vertellen en anderzijds zijn behoefte om de experimentele lessen praktisch in te delen in lessen waarin geen en lessen waarin wel een computer nodig is. Hij lijkt daarom veel meer gefocuseerd te zijn op de concrete lesactiviteiten en –inhouden dan in het overkoepelend verhaal van de onderzoeker aan bod komt. Het inzicht in het lesontwerp dat de onderzoeker Chris beoogt te geven zou diens vragen beantwoorden. Omdat de onderzoeker en de docent met de bespreking verschillende doelen lijken na te streven is het voorbereidingstraject niet geheel adequaat geweest. Enerzijds heeft de onderzoeker

onvoldoende praktisch gespecificeerd wat de lessen voor Chris inhouden, anderzijds zag Chris onvoldoende de rationale achter het ontwerp in.

In de voorbespreking van de afzonderlijke lessen is een aantal keer verschil van mening tussen de docent en de onderzoeker over de verwachte leerlingbijdragen en –inzichten. Naar Chris' mening wordt in het lesontwerp onderschat wat de leerlingen begrijpen van radioactiviteit, zoals de verhouding tussen de activiteit en de hoeveelheid radioactief materiaal en de betekenis van de vervalkans. In de optiek van de onderzoeker dienen deze noties een expliciete rol te krijgen om het verval van radium betekenisvol door te kunnen rekenen. Chris rekent erop dat leerlingen dit al inzien en dat hij deze anders gemakkelijk kan uitleggen; hij is daarom niet geneigd om bij deze inzichten en hun rol voor de oplossing van het centrale probleem stil te staan.

Ondanks dergelijke verschillen tussen de onderzoeker en de docent in verwachtingen en wensen zegt de laatste steeds toe de lessen te zullen uitvoeren volgens het plan van de onderzoeker.

4.1.4 Empirische evaluatie

Analysekader

De functie van de radioactiviteitsmodule is om numerieke integratie als oplossingsmethode te ontwikkelen voor het doorrekenen van radiumverval. Met de computer wordt een numerieke oplossing gevonden. Vervolgens wordt een analytische oplossing gezocht (die verklaart dat Rutherford, zonder computer, ook tot een oplossing kon komen). De leerlingen construeren ook Powersimmodellen voor het verval van radon en een vervalketen van radium.

Het beoogd lesverloop resulteert in de volgende analysevragen:

1. Verloopt de probleemverkenning betekenisvol voor leerlingen? Dit zou moeten blijken uit relevante leerlingreacties, zoals dat
 - leerlingen zich afvragen hoe de halveringstijd van een langlevende stof bepaald wordt;
 - leerlingen n.a.v. de geïntroduceerde oplossingsrichting (dat de halveringstijd stapsgewijs berekend kan worden als bij elke N_t een A_t berekend kan worden) zich realiseren dat de activiteit evenredig is met het aantal aanwezige deeltjes, en dat N_0 en A_0 bekend zijn uit Rutherfords meetgegevens zodat er een startpunt is om het vervalproces door te rekenen.
2. Wordt productieve constructieruimte gerealiseerd als de leerlingen Powersimmodellen construeren voor het radonverval en voor moeder-dochterverval?

Uitvoering

Aan het einde van hun reguliere lessen over radioactiviteit krijgen de leerlingen als huiswerk mee om zelfstandig de halveringstijd van het kortlevende radon te bepalen

aan de hand van een grafiek van de gemeten activiteit. Bij de start van de eerste les van de module bespreekt Chris deze opgave met de leerlingen.

In ieder geval vijf leerlingen geven aan dat zij geprobeerd hebben de halveringstijd te bepalen. Zij weten hoe zij in principe te werk moeten gaan, maar hebben problemen om hun aanpak uit te voeren. Deze problemen zijn gerelateerd aan de presentatie van de meetdata. Als Chris hen hierbij helpt, komen zij allemaal tot een eigen waarde. Zoals beoogd, is er enige variatie in de antwoorden. Een leerling evalueert de gevonden waarde met de Binas-waarde als referentie.

1. **II8:** het was 55 seconden, stond er in Binas.
2. **D:** ja, Binas. Weet ik veel. Dit is gewoon... iemand heeft gewoon een proef ergens gedaan, hoeft niet uit te komen wat in Binas staat, he? Binas bestond toen nog niet eens.
3. **II8:** maar het is toch gewoon 0,7 van 60? *[verwijst naar de berekening op basis van de grafiek]*
4. **D:** ja, dat is toch 42 *[seconden]* dan? Maar zij zeggen 50.
5. **II7:** 60 *[seconden]*.
6. **D:** 60 zelfs.
7. **II8:** [maar hoe kom je daar dan bij?]
8. **II7:** [wij hebben het gemeten.]
9. **D:** wie heeft dat nog meer gedaan? [...] Jij ook. Ook tot daar.

Fragment uit het klassengesprek over de gevonden halveringstijd van radon. *Chris: les 1, 10'*

Chris wijst het beroep op Binas van de hand (r. 2) en inventariseert in eerste instantie de gehanteerde werkwijzen (r. 7-9). De opgave biedt zo de eerste gelegenheid voor productieve constructieruimte voor de leerlingen; de eigen meetmethode van de leerlingen vormt immers de rechtvaardiging voor de gevonden waarde. Niettemin zoekt Chris overeenstemming over een beste waarde door een klasgemiddelde te bepalen en deze te laten verifiëren voor verschillende intervallen van de grafiek.

Na de opgave over het radonverval krijgen de leerlingen de metingen van Rutherford aan radium gepresenteerd. Onvoorzien was dat zij, behalve de meetgegevens, ook de halveringstijd van radium vonden (1602 jaar). Op basis van dit laatste concluderen zij correct dat deze halveringstijd niet door meten bepaald kan worden omdat dit te lang duurt. In het lesmateriaal is een opgave opgenomen voor een eerste schatting van de halveringstijd. Beoogd was om deze te schatten uitgaande van Rutherfords meetgegevens. De docent en de leerlingen baseren zich echter op de 1602 jaar.

1. **D:** *[Vraag]* drie. Hoe lang zou je moeten meten voordat je iets kunt meten? [...] Maar hoe lang zou je je proef dan moeten doen voordat je wel wat kunt meten?
2. **II7:** 1602.
3. **D:** na 1602 jaar is het gehalveerd.
4. **II7:** oh, ja.

5. **II9:** je kan toch..
6. **D:** kan het echt niet minder?
7. **II7:** ja, jawel.
8. **II6:** 800 jaar kan ook wel, denk ik.
9. **II9:** 800 jaar.
10. **D:** na 800 jaar is het dus ge...?
11. **II6, 9:** gekwarteerd.
12. **II7:** nee.
13. **II4:** dat is niet waar.
14. [...]
15. **II8:** dus je moet gewoon echt die 1600 jaar uitzitten?
16. **D:** nee, zeker niet. Op het eind, hier op het eind bij onze eigen dingetjes [*grafiek van het radonverval*], op het eind ging die het eh langzaamst. Gevoelsmatig krijgen we hier een getal uit dat we niet vertrouwen. Maar als dit nou.. even kijken. Als dit dat stofje zou zijn, dan in 1600 jaar zou die gehalveerd zijn. Ja? Wat doet die dan na 800 jaar?
17. **II8:** dan is die er al bijna.
18. **D:** dan is die er al bijna. Bij wijze van spreken. Dus redelijkerwijs, als het practicum 100 jaar duurt, dan kom je een heel eind.
19. **II6:** ja.
20. **D:** maar dat is nog te lang, want die goede man is zelf maar 80 geworden of zo. [...] [*Vraag*] drie. Even kijken hoor. We maken een schatting. “als de hoeveelheid radium met dezelfde constante snelheid blijft”.. dat hebben we net gezegd. “hoe lang duurt het dan voordat het radium voor de helft vervallen..” 800, he?

Fragment uit het klassengesprek over benodigde meettijd voor radium. *Chris: les 1, 31'*

De opgave uit het lesmateriaal (vraag drie, r. 1) om een eerste schatting te maken van de halveringstijd van radium moet leiden tot een berekening van een ondergrens door de gemeten activiteit constant te veronderstellen. Echter, feitelijk vraagt Chris in r. 1 wanneer een verandering in A merkbaar is. Deze vraag wordt uiteindelijk (door Chris zelf) beantwoord met zo'n 100 jaar (r. 18-20). Leerlingen 6 en 9 suggereren 800 jaar (r. 8-10). In het gesprek gaat deze waarde functioneren als het tijdvak waarin het grootste deel van de halvering gerealiseerd wordt (r. 16-18). De docent beschouwt dit als de gevraagde schatting van de benodigde tijd (r. 20).

Nadat Chris 800 jaar als antwoord heeft gegeven op de schatvraag worden de deelvragen van de schatting gemaakt. Afgezien van het feit dat er geen verband geëxpliciteerd is tussen de deelvragen en de schatting hebben de leerlingen ook conceptuele problemen met de vragen: met de betekenis van atoomgewicht, met het verband tussen atomen en moleculen, en met het aantal α -deeltjes dat een atoom uitzendt bij desintegratie. Met hulp van Chris wordt het gevraagde antwoord klassikaal berekend. Zij vinden 1400 jaar, hetgeen de docent als goed bestempeld, want “hier [*het antwoordmodel*] staat iets alles tussen 1300 en 1450 is prima”. In tegenstelling tot de

bespreking van de eerste opgave, waarin de halveringstijd van radon gevonden is, bepaalt nu niet de werkwijze of het antwoord goed is maar het antwoordenboek.

In het ontwerp is beoogd dat na de schatvraag de probleemstelling voor de module geformuleerd wordt. Omdat het einde van de les is bereikt wordt de laatste deelvraag voor de schatting, of de berekende waarde te hoog of te laag is, niet meer gemaakt. Ook de probleemstelling voor de module is bij het einde van de les nog niet expliciet benoemd en dit gebeurt ook niet bij de terugblik op de les bij aanvang van les twee. De probleemstelling staat wel in het lesmateriaal vermeld, maar het is nu niet duidelijk in hoeverre deze motiverend is. Uit een van de reguliere lessen halen we echter wel een aanwijzing dat de vraagstelling in principe intrigerend kan zijn voor de leerlingen. Als de leerlingen dan leren de halveringstijden op te zoeken in een Binastabel, vraagt leerling 2 zich af hoe men deze toch ooit te weten komt van stoffen die er miljoenen jaren over doen om te vervallen. Deze opmerking krijgt op dat moment geen vervolg, maar past goed in de opzet van deze module.

Zonder expliciete probleemstelling worden de opgaven waarin het verval stapsgewijs wordt doorgerekend klassikaal gemaakt. Van geen van de opgaven wordt benoemd wat deze bijdraagt aan de oplossingsrichting. Dit staat wel in de tekst in het lesmateriaal geëxpliciteerd, maar deze tekstgedeelten worden niet gelezen (althans, niet gezamenlijk). De leerlingen maken dus de opgaven zonder dat blijkt dat ze inzien waar de opgaven voor dienen.

In het lesmateriaal wordt een wiskundige notatie geïntroduceerd voor het aantal atomen en de activiteit op een zeker tijdstip, N_t en A_t , en is gegeven dat geldt $N_t = N_0 - A_t$ bij tijdstap $\Delta t = 1$. Deze relatie wordt in de loop van de module uitgebreid tot de differentievergelijking die het verval wiskundig beschrijft (met een willekeurige tijdstapgrootte). Als de docent de leerlingen vraagt uit te leggen wat er met het gegeven verband wordt bedoeld blijven de 'tijdindices' nog vaag aangeduid.

1. **D:** leg eens uit? Wat staat hier dan?
2. **II1:** radiumactiviteit? Op het moment dat je het meet, of zo?
3. **II3:** nee, het aantal atomen min de radioactiviteit.
4. **D:** oke.
5. **II2:** je weet wel veel [...].
6. **D:** ja. Dit is wat je hebt op tijdstip 0 – oh, pardon. Dit is wat je hebt op tijdstip 0. wat is dit dan?
7. **IIn:** de activiteit.
8. **D:** de activiteit..
9. **II8:** wat die per..
10. **D:** ..op tijdstip..?
11. **IIn:** 0.
12. **D:** en dat wordt?
13. **II6:** N_1 .
14. **D:** en wat is dat?
15. **II6:** aantal moleculen.
16. **II:** aantal atomen.

17. **D:** oke. En doe dan eens een formule voor N_2 ?

18. **II8, 2:** N_1 min A_1 .

Fragment uit het klassengesprek over de geïntroduceerde notatie. *Chris: les 2, 5'*

In r. 2 doet leerling 11 een suggestie voor de betekenis van de index '0', namelijk het moment van meten. De docent gebruikt vervolgens het vagere 'op tijdstip 0' in r. 6. In het vervolg van het fragment gebruiken de leerlingen geen verwijzing naar de tijd (r. 7, 8, 13-18), alleen nog als Chris hier om vraagt (r. 10, 11).

De leerlingen hebben geen moeite om de notatie toe te passen als gevraagd wordt N_2 en vervolgens N_{t+1} te geven als functie van N_1 respectievelijk N_t . De docent stelt de leerlingen ook een alternatieve uitdrukking voor: hij vraagt of hij in plaats van $N_2 = N_1 - A_1$ ook mag schrijven $N_2 = N_1 - 2A_0$. Hiermee introduceert hij een klassikale discussie over de tijdstap tussen twee opeenvolgende indices.

1. **D:** Eh.. mag ik dit opschrijven? [*schrijft op: $N_2 = N_0 - 2 A_0$*]
2. **II2:** ik weet het niet.
3. **II10:**nee.
4. **D:** want?
5. **II10:**het is telkens gehalveerd.
6. **II2:** het is niet gehalveerd.
7. **II3:** het moet niet gelijk opgaan.
8. **II10:**het is niet telkens hetzelfde eraf.
9. **D:** is dit dan beter? Wat is het verschil tussen dit.. Is die onderste [*relatie $N_2 = N_1 - A_1$*] wel goed?
10. **II1:** ja.
11. **D:** wat is dan het verschil tussen ditte en datte [*de twee voorgestelde relaties?*]
12. **II10:**nou, A_1 is anders dan A_0 .
13. **D:** ja, maar hoe anders?
14. **II4:** de helft.
15. [...]
16. **D:** Dit is gewoon waar je mee begint. Dan haal je A_0 er vanaf. Dat is de activiteit in de eerste seconde. A_1 is de activiteit in de tweede..? seconde.. ja. En dan hou je over: N_2 . Ja? Niet moeilijk, toch? Alleen die A wordt steeds kleiner.

Fragment uit het klassengesprek over de tijdstapgrootte. *Chris: les 2, 6'*

Leerlingen 4 en 10 menen dat de activiteit steeds halveert (r. 5, 14), waardoor de index het aantal halveringstijden zou tellen. Leerling 2 is het hier niet mee eens, maar kan niet aangeven wat het wel is (r. 2, 6). De leerlingen lijken het erover eens dat de door de docent voorgestelde notatie niet kan omdat de activiteit steeds anders wordt (r. 7, 8), waardoor $2A_0$ niet gelijk is aan $A_0 + A_1$. Chris geeft uiteindelijk aan het subscript de betekenis van seconde. Onbenoemd blijft dat het ook kan verwijzen naar opeenvolgende tijdperiodes van willekeurige grootte, zoals de meetduur.

Hoewel het gesprek de betekenis van de notatie lijkt te verhelderen blijft onbenoemd dat het probleem voor het doorrekenen van het radiumverval is dat, behalve de gemeten A_0 , A_t bij willekeurige N_t een onbekende is. In een volgende opgave gaan de leerlingen een verband opstellen tussen de activiteit en het aantal aanwezige atomen. Door in gedachten na te gaan hoe de activiteit zal veranderen als de hoeveelheid radioactief materiaal verdubbelt of anderszins verandert, zien de leerlingen in dat beide rechtevenredig zijn. Er is niet benoemd dat dit verband het stapsgewijs rekenen mogelijk maakt en uit de leerlingreacties blijkt ook dat leerlingen niet begrijpen wat ze met het antwoord aan moeten.

1. **D:** en als hij drie keer zoveel had gebruikt, in plaats van 0,26 0,78?
Hoeveel dan?
2. **I14:** ik denk drie keer zoveel.
3. **D:** drie keer zoveel! Geweldig. Dat is goed hoor.
4. **I10:** ja?
5. **I14:** wat is het dan voor vraag [...].
6. **D:** nou om te kijken of jullie het snappen. Maar nou is het dus daar opgenomen dat het niet zo goed was aangekomen. Dat is een eitje toch, zo'n vraag?
7. **I14:** ja, maar ik verwacht niet dat ze zulke domme vragen stellen.
8. **D:** vind je het een domme vraag?
9. **I14:** ja.
10. **I13:** als ze zoiets vragen dan ga je toch denken dat ze..
11. **D:** maar dat geeft niets. Je mag in de revanche. [vraag] B.

Fragment uit het gesprek over de relatie tussen activiteit en aantal atomen. *Chris: les 2, 10'*

De leerling vindt de opgave te eenvoudig om de moeite waard te zijn (r. 5-9), waaruit blijkt dat de bedoeling van de opgave niet duidelijk wordt. Chris licht ook niet toe waarvoor de opgave dient (r. 6, 11).

De volgende opgave in het lesmateriaal is om de vervalkans te berekenen. Hiertoe moeten de leerlingen de verhouding A/N uitrekenen. De berekening geeft geen problemen, maar er wordt niet gesproken over de conceptuele stap die gemaakt wordt van de verhouding tussen A en N als macro-eigenschappen van een radioactief sample naar een vervalkans voor de individuele atomen (micro-eigenschap). Niettemin is op te maken dat zij wel begrijpen welk verband geïmpliceerd wordt, omdat sommige leerlingen de vervalkans niet zonder protest accepteren als verklaring voor het aantal vervallen atomen ("hoe kan het dat er maar zo'n kleine kans is en toch dat er zoveel verval"). Merk op dat Chris dit gedurende het voorbereidingstraject onproblematisch achtte.

Leerlingen berekenen bij verschillende tijdstapgroottes een waarde voor ΔN . Zij benoemen correct dat gedurende elke lineaire benadering de activiteit gedurende een tijdstap Δt in principe wordt overschat en ze concluderen dat het met de hand doorrekenen van het vervalproces teveel rekenwerk is.

Met het maken van de hiervoor besproken opgaven verzamelen de leerlingen de benodigde elementen om het radiumverval stapsgewijs door te rekenen. De essentie

van het rekenproces is dat er steeds één stap verder gerekend kan worden met de beschikbare gegevens. Van de opgaven wordt echter niet benoemd hoe zij aan het rekenformalisme bijdragen. Op verzoek van de onderzoeker begint de docent de derde les daarom met het expliciteren van het stapsgewijze rekenen als oplossingsmethode. Chris betreft dit op een voorbeeldsituatie met eenvoudige getallen. In het voorbeeld van Chris is voor het eerst duidelijk sprake dat A_1 niet gemeten kan worden.

1. **D:** dus als ik er nou 300 [*atomen*] heb en we meten dus een paar keer en de gemiddelde $A_{0..}$ zo.. [...] is eh.. 12. En je mag 1 seconde meten. Wat heb je dan.. wat is dan N_1 ? Dit is N_0 , he? Wacht. Dit gaat tot 300, dus dan is N_0 .. daar he? [*schrijft dit op het bord bij '300'*] Wat is N_1 ?
2. **II1:** 300 – 12 [*Chris heeft de gemeten activiteit op 12 gesteld*].
3. **II7:** ongeveer 288.
4. **D:** wacht. Waarom zeg je ongeveer?
5. **II7:** omdat A_0 gemiddeld is.
6. **D:** oke. [...] dit is niet op schaal he. Ik doe maar wat he. Dit is.. dit is de tijd [*tekent de x-as*]. Na 1 seconde heb ik 288. [...] En dan? Wat is N_2 ?
7. **II2:** N_2 is eh...
8. **II1:** he..
9. **II11:** dan moet je de A_1 weer weten, de A_1 weer meten.
10. **D:** ja, ik moet.. maar hij stopt! De apparatuur is weg. Terug naar de leverancier. Ik kan niets meer meten.

Fragment uit het gesprek over het vervalproces in een rekenvoorbeeld. *Chris: les 3, 5'*

In het rekenvoorbeeld worden N_0 , A_0 en N_1 geïdentificeerd als 300, 12 en 288 (r. 1-6). Chris suggereert nu dat hij de meetapparatuur niet langer ter beschikking heeft (r. 10), waardoor een rekenprobleem ontstaat dat de leerlingen moeten oplossen. Onbenoemd blijft wat in Rutherford's situatie de tegenhanger is van het niet kunnen meten van A_1 .

Een leerling suggereert dat, om N_2 te vinden, er nogmaals 12 van afgetrokken moet worden. Chris noteert de rekenstappen in de voorgestelde wiskundige notatie. Leerling 2 merkt op dat in de voorgaande les het verband $A_t/N_t = \text{constant}$ opgesteld was, in dit geval 12/300. Hiermee berekent Chris N_2 en N_3 . De leerlingen gaan vervolgens in koppels aan het werk om in Powersim een vervalmodel te construeren. Hiervoor is in het lesmateriaal een handelingsvoorschrift opgenomen. In de les resteert hiervoor nog ongeveer 30 minuten; één koppel vindt binnen deze tijd een waarde voor de halveringstijd van radium.

Chris start de volgende les met te inventariseren welke waarden de leerlingen hebben gevonden en bij welke instellingen (Tabel 4). Zoals verwacht, is er enige variatie in de gevonden leerlingantwoorden. Terecht betreft Chris bij de inventarisatie de gebruikte simulatie-instellingen *stoptime* en *timestep*, omdat de tijdstapgrootte van belang is voor de uitkomst. Er wordt echter niet besproken waarom dit het geval is, of waarom de eerste twee koppels toch tot verschillende antwoorden komen. Drie

Stoptime Tijdsduur	Timestep lengte 1 stap	$t_{1/2}$	
1400 jr in s	100 jr	$5.89 \cdot 10^{10} \text{ s}$	1866
	100 jr	$6.2 \cdot 10^{10} \text{ s}$	± 1900
1400	10 jr	$\pm 1400 \text{ jr}$	
1400	17.5 jr	$6.123 \cdot 10^{10} \text{ s}$	

Tabel 4. Weergave van de bordaantekeningen voor de inventarisatie van gevonden halfwaardetijden.

koppels hebben zoals beoogd een halveringstijd gevonden van ongeveer 1900 jaar. Opvallend is dat in ieder geval twee van deze koppels aangeven het model slechts 1400 jaar doorgerekend te hebben (1400 is de berekende ondergrens voor de vervaltijd uit het begin van de module). Het derde leerlingkoppel in de tabel heeft het model 1400 jaar doorgerekend en dit ook als halveringstijd gevonden. Chris stelt de gevonden waarden niet ter discussie. Ook wordt niet meer besproken hoe de waarden die met het Powersimmodel zijn gevonden zich verhouden tot de eerder berekende 1400 jaar. Hoewel met de gevonden waarden het probleem voor de module is opgelost, wordt dit niet als zodanig benoemd.

Het lesmateriaal is zo opgebouwd dat leerlingen verdergaan om ook een analytische oplossing te vinden, zodat duidelijk wordt hoe Rutherford tot een waarde kwam zonder de beschikking te hebben over een computer. Vervolgens gaan leerlingen nog na dat een computermodel handig is voor het doorrekenen van vervalketens. In het vervolg op het inventariseren van de halveringstijden voor radium stelt Chris eerst de reactievergelijkingen op voor het radon- en radiumverval, aansluitend bij zijn eigen lessen voorafgaand aan de module. Hierbij komt het verval van een aantal generaties radioactieve stoffen spontaan ter sprake. Onder meer wordt het kwalitatieve gedrag besproken van de totale activiteit als de halveringstijden van moeder en dochter ver uit elkaar liggen. In principe vormt dit een uitstekende inleiding op het tweede deel van het resterende deel van de module, het doorrekenen van vervalketens. Chris keert echter terug naar de opgave die in het lesmateriaal aan de beurt is, om aan het besproken programma vast te houden.

Door in een gedachte-experiment de vervalkans te vergroten bepalen de leerlingen het verband $\lambda \cdot \tau_{1/2} = \text{constant}$. Met de Rutherfordgegevens berekenen de leerlingen deze constante en, gegeven de halveringstijd van radon die de leerlingen bij de start van de module gevonden hebben, een vervalkans voor radon. De leerlingen krijgen de opdracht om een Powersimmodel van het radonverval te construeren, om zo na te gaan dat deze vervalkans inderdaad dezelfde halveringstijd geeft. Dat doel is hen echter niet goed duidelijk, omdat de meeste leerlingen menen dat de berekende constante specifiek is voor radium. De leerlingen wijzen elkaar er op dat de formule voor het verval die de docent op het bord heeft geschreven, $0,7/\tau_{1/2}$, in het Powersimmodel voor radium ingevuld kan worden. Alle leerlingkoppels vragen zich af welke startwaarde het aantal radonatomen in het model moet krijgen. Bij drie koppels geeft de docent aan dat dit niet uitmaakt, twee koppels komen zelf op dit idee.

Evaluatie

De eerste analysevraag voor de radioactiviteitsmodule is of de probleemverkenning betekenisvol verloopt voor de leerlingen.

De essentie van het probleem dat de halveringstijd van radium niet door meting bepaald kan worden is op voorhand voor de leerlingen duidelijk. Uit het lesverloop blijkt niet in hoeverre de leerlingen dit ook een interessant probleem vinden, hoewel in een van de reguliere lessen een leerling zich een soortgelijke vraag stelt. Hoewel deze vraag op dat moment geen vervolg krijgt, is het toch een aanwijzing dat de probleemstelling voor de leerlingen wel degelijk interessant kan zijn. De globale vraagstelling wordt echter niet expliciet gemotiveerd. Ook doet de docent schijnbaar geen moeite om het leidende probleem centraal te stellen, want de probleemstelling wordt in het geheel niet benoemd.

Voor de introductie van het stapsgewijze doorrekenen van het vervalproces worden alle benodigde opgaven klassikaal gemaakt, maar hiervan wordt niet benoemd wat deze bijdragen aan de oplossingsrichting. In de tekst in het lesmateriaal is wel geëxpliciteerd hoe de opgaven bijdragen aan het oplossen van het gestelde probleem, maar deze wordt in de klas in ieder geval niet gezamenlijk gelezen. De leerlingen maken dus opgaven op volgorde zonder dat blijkt dat ze inzien wat daarin de rode lijn is.

We concluderen dat de probleemverkenning niet geheel betekenisvol is geworden, maar dat er in de uitvoering zeker mogelijkheden waren om dit te realiseren zoals beoogd. Een belangrijke oorzaak waardoor het verloop niet betekenisvol werd, ligt in het feit dat de essentie van het probleem niet is benoemd, hoewel beoogd was dat het richting zou geven aan de module.

De tweede analysevraag betreft productieve constructieruimte voor de leerlingen bij het construeren van computermodellen voor radonverval en vervalketens. Dit zou moeten blijken uit de mogelijkheid voor leerlingen om eigen keuzes en beslissingen te maken die ook geëvalueerd worden.

Aan de vervalketens zijn de leerlingen niet toegekomen, waardoor er uiteindelijk weinig gelegenheid voor hen was om te demonstreren in hoeverre zij constructieruimte konden benutten. Voor het modelleren van het radonverval hoefden de leerlingen slechts de modelspecificaties van het radiummodel aan te passen; een nieuw modeldiagram was niet nodig. Of de beoogde constructieruimte nu productief kan worden valt dus niet te zeggen.

Doordat (1) numerieke integratie niet als oplossingsmethode ontwikkeld is en (2) het opstellen en implementeren van de differentievergelijkingen niet in een nieuwe situatie is geoefend lijkt de module niet in z'n opzet geslaagd om leerlingen numerieke integratie te leren.

4.1.5 De mening van de leerlingen

Na afloop van de lessenreeks hebben alle leerlingen een enquête ingevuld. De items en antwoorden worden hieronder besproken, als aanvulling op de analyse en evaluatie van het lesverloop.

De enquête is opgebouwd uit 17 items: 15 stellingen en twee open vragen. Bij 12 stellingen geven de leerlingen op een 5-puntsschaal aan in hoeverre zij het met de stelling (on)eens zijn. Drie stellingen hebben twee antwoordmogelijkheden (eens/oneens) en daarbij wordt de leerlingen gevraagd om de keuze toe te lichten. Eén item staat op zichzelf; verder betreffen combinaties van twee tot vier items steeds eenzelfde onderwerp. Items komen in de enquête ongeordend aan bod.

In drie items, waarvan één open vraag, wordt de lessenreeks vergeleken met de reguliere lessen van de docent. De twee stellingen zijn opgenomen in Tabel 5. Meer dan de helft van de leerlingen beoordeelt de lessen als moeilijker dan normaal. Op twee uitzonderingen na vonden alle leerlingen de docent anders lesgeven. Zes van hen geven op dit laatste een toelichting, waaruit blijkt dat zij vonden dat de docent niet goed vertrouwd was met het materiaal: hij leek niet goed voorbereid of leek het zelf ook niet te weten. Tien leerlingen beantwoorden de open vraag of er opvallende verschillen waren in vergelijking met de gewone lessen. Zes refereren aan het gebruik van de computer, dat normaal niet gebeurt. Vier leerlingen vinden de lessen onduidelijker of rommeliger, waarvan één toelicht dat ze nu meer zelf moeten uitzoeken en er minder uitleg is “van het waarom”. Eén leerling is er juist positief over dat zij zelf meer moeten uitzoeken en vindt de lessen interactiever.

Tabel 5. Vergelijking met de reguliere lessen. Per item is het aantal reacties per antwoordmogelijkheid gegeven (1 = oneens, 5 = eens) en geheel rechts de gemiddelde score.

Item	1	2	3	4	5	$\bar{x}$
De lessen waren moeilijker dan de gewone natuurkundelessen.	1	1	1	5	3	3.7
Onze docent gaf anders les dan normaal.	2				8	4.2

Aan de hand van twee stellingen wordt gepeild of de leerlingen de probleemstelling interessant en logisch vinden (Tabel 6). Het gemiddelde laat dit in het midden, maar uit de scoreverdeling blijkt dat de leerlingen hierover verdeeld zijn: vier leerlingen vinden het probleem interessant en zeven leerlingen niet of nauwelijks. De tweede stelling kon alleen met eens of oneens beantwoord worden; de verdeling is hier half om half. Opvallend is dat de twee items geen verband lijken te houden: twee leerlingen die het probleem interessant vinden, vinden radium niet logischer en drie leerlingen die radium logischer vinden, vinden het probleem niet of nauwelijks interessant.

Tabel 6. Probleemstelling. Per item is het aantal reacties per antwoordmogelijkheid gegeven (1 = oneens, 5 = eens) en geheel rechts de gemiddelde score.

Item	1	2	3	4	5	$\bar{x}$
Ik vond het bepalen van de halveringstijd van langlevend radium een interessant probleem.	3	4	-	4	-	2.5
Het was logischer om het verval van radium per tijdstap te berekenen dan het verval van radon.	4				5	3.3

Vier items hebben betrekking op de ervaren samenhang, een indicatie voor de betekenisvolheid (Tabel 7). Vijf leerlingen beoordelen de samenhang in het verhaal van de docent neutraal, maar vier leerlingen vinden hem van de hak op de tak springen. Gelet op het feit dat met het ontwerp expliciet een voor leerlingen logische samenhang is nagestreefd, zijn de scores wat betreft het nut van de opgaven en zicht op het vervolg enigszins laag. De laatste stelling is positiever beantwoord, maar dit kan ook het resultaat van de formulering zijn ('het is niet expliciet onlogisch'). Uit de antwoorden op de open vraag of er opvallende verschillen zijn met de reguliere lessen blijkt dat verschillende leerlingen de lessen onduidelijk en rommelig vinden.

Tabel 7. Ervaren samenhang. Per item is het aantal reacties per antwoordmogelijkheid gegeven (1 = oneens, 5 = eens) en geheel rechts de gemiddelde score.

Item	1	2	3	4	5	$\bar{x}$
De docent sprong vaak van de hak op de tak.	-	2	5	2	2	3.4
Ik had vaak geen idee waarvoor een opgave nuttig was.	1	1	-	5	2	3.4
Na een klassikale bespreking had ik meestal een duidelijke verwachting over het vervolg van de les.	3	1	4	3	-	2.6
De opgaven uit het gebruikte boekje volgden logisch op elkaar.	1	1	5	2	2	3.3

Drie stellingen gaan over de ervaren productieruimte voor de leerlingen (Tabel 8). Ongeveer de helft van de leerlingen vindt zichzelf veel inbrengen. De meeste leerlingen vinden dat er ook wat met hun inbreng wordt gedaan. Dit is overeenkomstig het beeld uit de lessen, waarin leerlingen geregeld inbreng hebben en de docent hier ook op reageert. De helft van de leerlingen vindt dat hun bijdrage ook het lesverloop beïnvloedt en slechts twee vinden dit niet, hetgeen een positieve waardering is van de ervaren productieruimte.

Tabel 8. Constructieruimte. Per item is het aantal reacties per antwoordmogelijkheid gegeven (1 = oneens, 5 = eens) en geheel rechts de gemiddelde score.

Item	1	2	3	4	5	$\bar{x}$
Ik had veel inbreng tijdens de klassikale momenten.	1	3	2	4	1	3.1
Ik had weinig invloed op het verloop van de les.	1	4	2	1	3	3.1
Wanneer ik iets inbracht in het klasgesprek werd daar vaak wat mee gedaan.	1	1	3	2	3	3.5

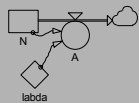
Bij twee items beoordelen de leerlingen de leeropbrengst van de module (Tabel 9). De score op deze items is opvallend: hoewel de leerlingen vrijwel unaniem zijn dat ze iets nieuws geleerd hebben over radioactiviteit, zijn ze veel terughoudender over de stelling dat ze radioactiviteit beter zijn gaan begrijpen. Waarover hebben ze dan wel iets nieuws geleerd? Bij een van de open vragen werd door veel leerlingen benoemd dat ze normaal gesproken niet met de computer werken in de natuurkundeles. Een plausibele optie is dan ook dat leerlingen hiernaar verwijzen als zijnde 'nieuw geleerd'. In een item dat samenhangt met het gebruik van Powersim

kiezen de leerlingen welke weergave zij het duidelijkst vinden (Tabel 10). In de toelichting van hun keuze geven drie leerlingen als argument dat zij de formule duidelijker vinden en vijf dat juist het diagram laat zien hoe de formule in elkaar steekt (ook een leerling die de voorkeur geeft aan de formulevorm). Een aantal leerlingen merkt op dat zij nu eenmaal meer gewend zijn aan formules, dat onduidelijk is gebleven wat de Powersimsymbolen betekenen en dat het tekenen van het diagram meer werk is dan het invullen van de formule. De Powersimstructuur is dus voor enkele leerlingen een duidelijke hulp geweest om de wiskundige notatie te begrijpen, maar voor een aantal hebben de diagramelementen geen duidelijke betekenis gekregen.

Tabel 9. Leeropbrengst. Per item is het aantal reacties per antwoordmogelijkheid gegeven (1 = oneens, 5 = eens) en geheel rechts de gemiddelde score.

Item	1	2	3	4	5	$\bar{x}$
Ik heb bij dit boekje iets nieuws geleerd over radioactiviteit.	1	-	-	6	4	4.1
Ik ben het verschijnsel radioactiviteit beter gaan begrijpen door de halveringstijd van radium te bepalen.	3	4	3	1	-	2.2

Tabel 10. Voorkeur voor weergave.

	Formulevorm $\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N$	Powersim 
Het aantal atomen dat vervalst, kun je weergeven met een wiskundige formule of met een Powersimmodel. Welke vind jij het duidelijkst?	7	4

Eén stelling betreft de ervaren verstoring van de les door de gemaakte audio- en video-opnames. Acht leerlingen hebben geen storing ervaren, twee vrijwel niet en een leerling wel. De onderzoekssetting is voor de meeste leerlingen dus nauwelijks van belang geweest.

De enquête stemt overeen met de analyse van het lesverloop dat de uitgevoerde module zijn doel niet heeft gerealiseerd. Leren numeriek te integreren is niet het expliciete leerdoel geweest voor de leerlingen. De leeropbrengst van de module wordt in de enquête geduid als ‘computeren’, maar tegelijkertijd is Powersim voor ongeveer de helft van de leerlingen onduidelijk gebleven. De interesse van de leerlingen voor de probleemstelling en de ervaren samenhang duiden er op dat het onderwijs niet in die mate betekenisvol is geworden die met het ontwerp nagestreefd werd. De door de leerlingen ervaren constructieruimte is daarentegen redelijk.

4.2 Het herziene onderwijsontwerp ‘klimaatmodelleren’

4.2.1 Herzieningen t.o.v. het eerste ontwerp

Een modelleerprobleem gericht op onzekerheid in voorspellingen

De vraagstelling waaraan de leerlingen in de eerste ronde werkten, laat de leerlingen focuseren op numerieke uitkomsten, ook waar dit niet bedoeld was. Bovendien werden onzekerheden in voorspellingen niet gethematiseerd.

Een aanknopingspunt voor een gewijzigde insteek is de bevinding dat veel leerlingen verwachten dat een model preciezer voorspelt naarmate het vollediger is. Deze redenering wordt in het herziene ontwerp ter discussie gesteld. Het probleem dat geïntroduceerd wordt, is dat van de toenemende onzekerheid in modelvoorspellingen door complexere modellen. Verondersteld wordt dat leerlingen het intrigerend vinden dat in recente IPCC-voorspellingen voor de temperatuurontwikkeling tot het jaar 2100 de onzekerheid is toegenomen t.o.v. eerdere voorspellingen en dat ze hieraan een motief ontleen om aan de hand van eigen modellen te onderzoeken hoe dit effect kan ontstaan. Het onderzoeken van het modelgedrag van een model met positieve terugkoppeling past in deze lijn omdat het de leerlingen hierin meer inzicht kan geven.

Alleen terugkoppeling door sneeuwbedekking

In de uitvoeringen van de eerste ronde komen de leerlingen niet toe aan het combineren van de deelmodellen. Bovendien was het inzicht van de leerlingen in de afzonderlijke specialisatiemodellen onvoldoende om het gedrag van het totaalmodel zinvol te onderzoeken. De vakinhoud van de specialisaties ‘oplosbaarheid van CO₂’ en ‘wolkalbedo’ was bovendien te moeilijk om zelfstandig in model te zetten.

In het herontwerp zijn de specialisaties ‘oplosbaarheid van CO₂ in de oceaan’ en ‘wolkalbedo’ weggelaten en blijft alleen de uitbreiding ‘sneeuwbedekking’ over. Er waren geen moeilijkheden met het begrijpen van het mechanisme, terwijl het feit dat het onderzoek aan het modelgedrag niet goed liep juist een reden is om deze modeluitbreiding over te houden. Het model kent grote sprongen van de ene extreme toestand naar de andere als gevolg van de terugkoppeling door sneeuwbedekking, is gevoelig voor de begincondities, en de condities voor een sprong naar het ene extremum zijn niet dezelfde als voor de sprong naar het andere. Het begrijpen van deze modelgedragingen is een waardevol inzicht in complexe dynamische systemen en een belangrijke bron van onzekerheid voor modelvoorspellingen. Deze inzichten kunnen beter gethematiseerd worden in de uitbreiding ‘sneeuwbedekking’ dan in een van beide andere.

Modelleercycli procesmatig sturen, niet inhoudelijk

Op basis van de uitvoeringen van het eerste ontwerp is geconcludeerd dat het modelleerproces in de klas minder inhoudelijk en meer procesmatig gestuurd moet worden. Ook in Chris’ uitvoering van de radioactiviteitsmodule bleek dat opgaven

veelal niet gemotiveerd werden, waardoor de rode lijn van de modelontwikkeling niet aan bod kwam. Hoewel de opbouw van het lesmateriaal misschien eraan heeft bijgedragen om dit doelgerichte karakter voor de leerlingen te verhelderen, blijkt dit niet uit de klassengesprekken. Daarentegen zijn er wel veel aanwijzingen dat leerlingen de teksten in het lesmateriaal slecht lezen. Daarom is er voor gekozen om in de tweede ronde het proces in de klas te benadrukken door in het lesmateriaal terughoudender te zijn en de leerlingen (en in het bijzonder met deze docent) als het ware te dwingen om zelf de verbinding tussen de opgaven en het voorgaande te laten benoemen.

Afgezien van een introductie op het onderwerp, waarin de toenemende onzekerheid in de IPCC-voorspellingen aan bod komt, is er daarom geen hoofdstuk meer. Elke cyclus vormt een eigen hoofdstuk. Twee grote wijzigingen m.b.t. de opbouw van het lesmateriaal worden hieronder besproken.

Overeenkomstige opbouw van de modelleercycli

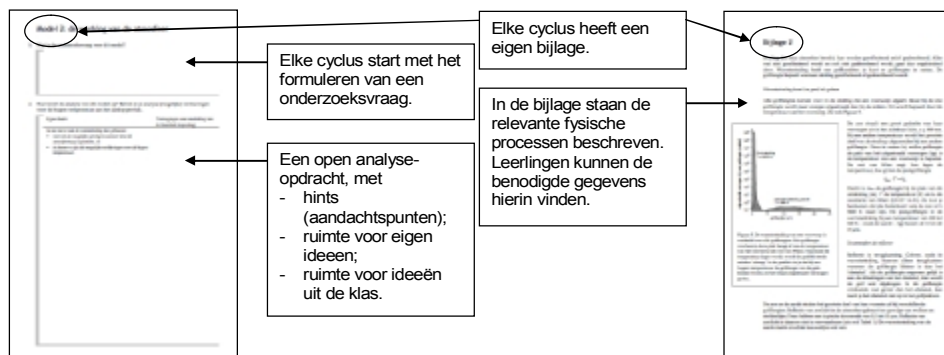
In het eerste ontwerp zijn de modelleerfasen gemarkeerd in het lesmateriaal, toegespitst op de constructie van het computermodel. De leerlingen bleken de fasering wel te herkennen en te kunnen benoemen, maar dit werd, om verschillende redenen, niet productief.

Ten eerste waren de labels te algemeen. Hoewel elke cyclus ‘ontwerpen’, ‘bouwen’ en ‘testen’ had, waren de opgaven waarop ze betrekking hadden in elke cyclus anders (want: specifiek voor dat model). Door de focus op de ontwikkeling van het computermodel was er bovendien geen onderscheid tussen opgaven waarin het fysisch model werd ontwikkeld en opgaven waarin het model werd gespecificeerd; beide heetten ‘ontwerpen’.

Ten tweede kregen de leerlingen weinig gelegenheid om hun ervaring met ontwerpen, bouwen en testen in te zetten in een volgende cyclus, omdat in het lesmateriaal de benodigde activiteiten en informatie al gespecificeerd waren.

In het herziene lesmateriaal is er voor gekozen om beter gebruik te maken van de fasering van het modelleerproces. De verschillende cycli zijn zoveel mogelijk uniform opgebouwd, uitgaande van de fasen die in het modelleerproces onderscheiden zijn (zie hoofdstuk 2). De opgaven zijn zo min mogelijk geformuleerd voor de specifieke modelinhoud, maar sturen zo veel mogelijk de opeenvolgende fasen van de modelontwikkeling. Deze opdrachten zijn om (1) de onderzoeksvraag te formuleren voor de betreffende cyclus, (2) de situatie te analyseren, resulterend in een kwalitatief fysisch model, (3) de benodigde relaties en waarden te specificeren, (4) het model door te rekenen en te onderzoeken, en (5) het model te evalueren. In de eerste cyclus zijn bij deze algemene opgaven nog specifieke aanwijzingen gegeven, maar deze nemen af in de volgende cycli. Zie Figuur 19 (links) voor een bladzijde-overzicht.

De leerlingen en de docent zijn afhankelijk van het klassikale proces om de modelleerstappen bij elke cyclus goed te doorlopen. Het is de bedoeling dat leerlingen in de cycli steeds meer verantwoordelijkheid krijgen, door hen terug te laten grijpen op de manier waarop een fase in een eerdere cyclus is uitgewerkt.



Figuur 19. Bladzijdenoverzicht van het lesmateriaal. Links: de ontwikkeling van een model aan de hand van 'procesvragen'. Rechts: een bijlage met achtergrondinformatie, zonder opgaven.

Splitsen van opgaven en informatie

In het lesmateriaal van de eerste ronde en van de radioactiviteitsmodule stonden alle redenen om een bepaalde richting op te gaan of om een opgave te maken geëxpliciteerd in het materiaal. Dit garandeerde echter niet dat er betekenisvol werd gemodelleerd, eerder het tegendeel. Met andere opgaven, die het proces sturen in plaats van de inhoud, is dit wellicht al ten dele verholpen. In het herziene lesmateriaal is er voor gekozen om de benodigde vakinhoud helemaal uit de hoofdstukken te halen, en deze in aparte bijlagen bij elke cyclus op te nemen. Binnen elke modelontwikkeling blijft zo de focus op het modellerenproces. Er is alle ruimte om in de les gezamenlijk uit te maken wat er voor elk model nodig is, zonder gehinderd te worden door keuzes in de tekst van het lesmateriaal. Bovendien geeft de tekst in de bijlagen nu een samenhangend overzicht van de relevante fysica (zie Figuur 19). De benodigde informatie wordt nu niet langer daar aangeboden waar de leerlingen deze nodig hebben, maar de leerlingen moeten deze distilleren uit een groter geheel – hetgeen ook beter overeenstemt met de natuurwetenschappelijke praktijk.

Aandacht voor leerlijnen in (delen van) het modellerenproces

In de herziening van het ontwerp is met name aandacht voor de ontwikkeling van vier aspecten van het modellerenproces, namelijk:

- vorming van het kwalitatief model;
- schattingen maken;
- differentievergelijkingen opstellen;
- analyse van modelgedrag.

Bij het maken van schattingen werd in het eerste onderwijsontwerp gevraagd om een puntschatting. Een spreiding in uitkomsten ontstaat als verschillende leerlingen verschillende waarden nemen. Leerlingen moesten wel beargumenteren hoe zij aan hun waarde kwamen, maar verschillende waarden konden even goed zijn. In het

herontwerp schat elk leerling een redelijke onder- en bovengrens, zodat elke leerling een acceptabele spreiding krijgt. Behalve het albedo α wordt nu ook de absorptie- en emissiecoëfficiënt ε geschat. De geschatte waarden voor de warmtecapaciteit van de aardlaag en de atmosfeerlaag hadden geen consequenties in het eerste ontwerp. Nu wordt onderzocht hoe lang het duurt voordat de temperatuur zich aanpast aan een instantane verandering in ε . Op basis hiervan wordt beargumenteerd of een computermodel noodzakelijk is voor de scenariostudies.

Zowel in de begeleiding door de docent als in de analysevragen komt het kwalitatief begrijpen en verklaren van modelgedrag voorop te staan. Leerlingen krijgen meer gelegenheid om eigen Powersimmodellen te schetsen, hetgeen mogelijk is door hun ervaring met het modelleren van radioactief verval. Ook aanloopverschijnselen en (eenvoudige) problemen met Powersim-grafieken worden geanalyseerd en verklaard.

4.2.2 Procedure en databronnen

Chris heeft het herziene ontwerp over klimaatmodelleren uitgevoerd in december 2006 en januari 2007, met dezelfde leerlingen die in de uitvoering van de radioactiviteitsmodule hebben meegedaan. De klas is in deze tijd overgegaan van 5V naar 6V en één van de leerlingen heeft dus ook het eerste onderwijsontwerp gedaan.

Om de docent voor te bereiden op de onderwijsuitvoering zijn er vier besprekingen geweest over de onderliggende visie op modelleren en de didactische keuzes die daaruit voortvloeien, van elk twee uur. Daarnaast is weer elke les afzonderlijk voorbesproken. Van alle voorbesprekingen zijn audio-opnames gemaakt.

De besprekingen over de visie achter het onderwijsontwerp zijn gebaseerd op de uitvoeringen van de eerste onderzoeksrunde en van de radioactiviteitsmodule. Als Chris in die les anders handelde dan met het ontwerp beoogd was, is dit vaak goed te begrijpen als verondersteld wordt dat hij een andere visie op modelleeronderwijs heeft. Het plan voor de eerste bespreking was om de beide visies (van de onderzoeker en de docent) te expliciteren. Hiertoe luisteren de onderzoeker en de docent samen naar een aantal video- en audiofragmenten (uit zijn lessen en de voorbesprekingen) waarin Chris zich uitliet over modelleren en over het doel van het onderzoek. Op basis daarvan bespreken zij Chris' visie op modelleren. Als zijn ideeën goed verwoord zijn, bespreken zij hoe zijn insteek doorwerkt in het lesverloop en hoe dit afwijkt van hetgeen beoogd was. Het doel is dat Chris in de beluisterde fragmenten signaleert in hoeverre leerlingen daar, door te modelleren, een probleem oplossen. Zo wordt Chris uitgenodigd om naar het lesontwerp te kijken vanuit de visie van de ontwerper op modelleren. Aan de hand van fragmenten bespreken de docent en de onderzoeker in de volgende bijeenkomsten hoe in een aantal concrete lessituaties uit de eerste temperatuurmodule de inbreng van de leerlingen vergroot kan worden. Vervolgens presenteert de onderzoeker de rationale van het herziene onderwijsontwerp en bespreekt hij met de docent de didactische keuzes van de lesactiviteiten in de herziene module.

De uitvoering van de klimaatmodule duurt tien lessen van elk 50 minuten. Alle lessen zijn opgenomen op video en getranscribeerd. Van de gesprekken tijdens groepswork, tussen de leerlingen en met de docent of onderzoeker, is een digitale audio-opname gemaakt. Er zijn schermregistraties gemaakt als de leerlingen met de computer werken (Camtasia Studio 3). De antwoordenboekjes van alle tien leerlingen zijn na afloop gekopieerd. De leerlingen hebben na afloop een vragenlijst ingevuld om inzicht te krijgen in hoeverre zij het betreffende onderwerp gewaardeerd hebben, het onderwijs betekenisvol voor hen was en of zij productief konden bijdragen.

4.2.3 Het voorbereidingstraject met de docent

Een belangrijk doel van de voorbereidende besprekingen is om met Chris tot een gedeelde visie op modelleren te komen. In de eerste twee besprekingen wordt het gesprek hierover gestuurd door fragmenten uit lessen van Chris zelf, van Dirk, de kennismakingsles bij Chris en uit de lessen van de radioactiviteitsmodule. In het gesprek over de fragmenten krijgt de docent steeds eerst de gelegenheid om te reageren op wat hij gezien heeft. Vervolgens geeft de onderzoeker zijn eigen oordeel hoe het modelleringsproces in het fragment aan bod kwam. Waar dit relevant is, benoemt de onderzoeker hoe de uitvoering zijns inziens anders had gekund. Zowel aspecten van het docenthandelen als van de opzet van het lesmateriaal komen zo aan bod.

In de derde en de vierde bespreking kijken de docent en de onderzoeker naar de concrete vragen uit het lesmateriaal. Dit heeft enerzijds ten doel om de docent (opnieuw) kennis te laten maken met de vakinhoud en anderzijds om eventuele onduidelijkheden voor de docent te kunnen verhelpen. De onderzoeker neemt de rol van de docent op zich (en de docent die van de leerling), om zo concreet te demonstreren hoe de docent de leerlingbegeleiding op zich kan nemen. Een groot deel van de tijd van de derde bespreking wordt besteed aan de mogelijke leerlingbijdragen voor het kwalitatieve 2-laagsmodel, terwijl in de vierde bespreking de toenemende onzekerheid in de IPCC-voorspellingen, de overgang naar het computermodelleren en het sneeuwmodel aan bod komen.

Uit de besprekingen blijkt Chris zijn docenttaak als ‘gedelegeerd opdrachtgeverschap’ te ervaren. Hij vindt dit ongemakkelijk, omdat hij vindt dat hij zelf de verantwoordelijkheid voor het onderwijsproces heeft – en dat dit ook niet thuishoort bij de onderwijsontwerper. De snelheid waarmee hij als docent moet reageren laat bovendien geen tijd om tot een overwogen handelen te komen: “ik ben de luchtverkeersleider van een muggenzwerm”. De onderzoeker benadrukt het belang om van tevoren zo goed mogelijk in te schatten wat er in bepaalde omstandigheden kan gebeuren. Desondanks verlopen de gesprekken over concrete lesactiviteiten moeizaam, alsof de docent ook niet van tevoren wil overwegen hoe die activiteiten optimaal kunnen verlopen. Over zijn eigen lesgeven toont Chris zich tevreden, waardoor hij geen reden ziet tot veranderingen die de ontwerper voorstelt naar aanleiding van zijn eigen lesgeven.

In de besprekingen is een aantal uitgangspunten te identificeren die de docent en de onderzoeker delen: (1) er moet ruimte zijn voor de leerlingen om eerst het

conceptueel model te ontwikkelen voordat zij een computermodel gaan maken, (2) het is belangrijk om de leerlingen te laten bijdragen, en (3) daarvoor is het belangrijk dat leerlingen de rode lijn van de module en de opgaven inzien. Desondanks zitten de docent en de onderzoeker niet op één lijn over het ontwerpontwerp en hebben zij geregeld een verschillende insteek in het gesprek. De onderzoeker snijdt de achterliggende visie aan en benadrukt de momenten waar de leerlingen de verhaallijn kunnen sturen. De docent stelt verbeteringen aan het ontwerp voor om de leerlingen zo zelfstandig mogelijk te laten werken, maar die tegelijkertijd de inhoud zodanig vastleggen dat er geen sturing meer nodig is. De docent geeft herhaaldelijk aan dat hij het doel van de vragen van de onderzoeker niet inzielt, terwijl deze geen mogelijkheid ziet om de voorstellen van de docent te verbinden met het ontwerp. De onderzoeker heeft daardoor het gevoel geen overeenstemming te bereiken over 'goed modelleeronderwijs'. Niettemin geeft de docent op het einde van de vier besprekingen aan met het materiaal te kunnen werken.

4.2.4 Eerste episode: globale vraagstelling complexe dynamische modellen

Het doel van de eerste episode is om met de leerlingen een motiverend en richtinggevend leerdoel vast te stellen voor de gehele lessenreeks en om dit vervolgens in te perken tot een concrete vraagstelling voor de eerste cyclus.

Wijzigingen in het beoogd lesverloop

Een probleem in het eerste ontwerp was dat de aandacht van de leerlingen teveel gericht werd op de exacte waarde van de gevonden uitkomsten, in plaats van op het verwerven van inzicht in de werking en de betrouwbaarheid van zulke modellen. In het herziene ontwerp is de leervraag daarom toegespitst op het identificeren van bronnen van onzekerheid in modelvoorspellingen.

De opzet hiervoor is om de leerlingen zich te laten verbazen over de toegenomen onzekerheid in de temperatuurvoorspellingen uit het derde IPCC-rapport ten opzichte van die uit het eerste rapport (IPCC, 1990, 2001). Daarbij blijkt dat de gerapporteerde onzekerheidsmarges in het rapport van 2001 groter zijn dan die uit 1991. Deze toename is pas verrassend als leerlingen hiernaar kijken vanuit de verwachting dat een vollediger model nauwkeuriger voorspellingen oplevert. Alvorens de IPCC-voorspellingen te vergelijken moet deze verwachting benoemd zijn. Daartoe opent de les met hetzelfde journaalfragment als in de eerste ronde. De docent vraagt de leerlingen nu achtereenvolgens

- of zij zelf denken dat het klimaat betrouwbaar voorspeld kan worden;
- hoe zij menen dat wetenschappers dit doen;
- waarop vertrouwen in modelvoorspellingen gebaseerd wordt;
- hoe de betrouwbaarheid van modelvoorspellingen vergroot kan worden.

Met de eerste twee vragen wordt er onderscheid gemaakt tussen wat leerlingen persoonlijk vinden en wat wetenschappers nastreven. Zo hopen we te voorkomen

dat eventuele sceptische leerlingideeën interfereren met het verdere lesverloop. Het doel van de derde en vierde vraag is om de leerlingen de benodigde notie te laten expliciteren dat een completer model betrouwbaarder is.

De docent kondigt aan dat de leerlingen, om inzicht in de werking en de betrouwbaarheid van complexe dynamische modellen te krijgen, zelf de temperatuur op aarde gaan modelleren. De verdere probleemverkenning verloopt grotendeels zoals in het eerste ontwerp. De vraagstelling voor de totale module wordt net als in het eerste ontwerp het voorspellen van de globaal-gemiddelde temperatuur op aarde in 2200. Aan de hand van een woordweb identificeren de leerlingen de noodzaak om met de belangrijkste invloeden te beginnen, en perken zij deze in eerste instantie in tot alleen de bijdrage van de zon.

De docent stelt een vraagstelling voor de eerste cyclus vast. Deze verschilt nu iets van die in de eerste ronde. Toen luidde de onderzoeksvraag voor het eerste model of daarmee de huidige temperatuur op aarde verklaard kan worden. Door de vraag zo te formuleren konden de leerlingen bij het specificeren van het model uitgaan van de huidige temperatuur en zo de grootte van de uitstraling al bepalen. Het verschil tussen de in- en uitstraling vormde vervolgens een motief om een Powersimmodel te ontwikkelen. Nu luidt de gewenste vraagstelling welke temperatuur voorspeld wordt met een model waarin alleen rekening gehouden wordt met de bijdrage van de zon. De temperatuur is nu een te bepalen variabele.

Analysekader

De aanleiding voor de module verschilt van die in het eerste ontwerp. Beoogd wordt dat leerlingen zelf gaan modelleren om inzicht te krijgen in bronnen van onzekerheid. De introductie is er daarom op gericht om leerlingen zich af te laten vragen hoe onzekerheid in een modelvoorspelling kan toenemen als een model verbeterd wordt.

De analysevragen voor deze cyclus zijn:

1. Wordt het betrouwbaar voorspellen met complexe dynamische modellen zodanig geproblematiseerd dat dit een motief geeft om zelf te gaan modelleren?
2. Is er sprake van een voor leerlingen betekenisvol proces?

Uitvoering

Chris start de lessenserie met het vertonen van het journaalfragment waarin een supercomputer na maanden rekenwerk bevestigt dat het in de toekomst warmer wordt. Aansluitend vraagt hij of de leerlingen de berichtgeving over klimaatverandering geloven. Deze vraag was bedoeld om eventuele sceptische leerlingideeën boven tafel te krijgen, maar van zulke ideeën blijkt niets: in plaats daarvan wijzen de leerlingen op de grote overeenstemming tussen onderzoekers en de deskundigheid van de onderzoekers. Chris vraagt wat klimaatwetenschappers doen om hun modellen beter te maken:

1. **D:** nee maar kijk, als [//7] nou zegt van twee jaar geleden was er ook zoiets, want dit is al drie jaar oud, en er komen dan meer van die

krantenberichten, wat hebben ze dan in die tussentijd gedaan? De heren en dames wetenschappers?

2. **I17:** ik denk dat ze nog wel even hebben door-onderzocht.
3. **D:** maar hoe doe je dat dan?
4. **I10:** met een supercomputer.
5. **I15:** met een weerballonnetje.
6. **I17:** en metingen gewoon, in de tussentijd, van de opwarming, drie jaar lang.
7. **D:** juist. Dus ze hadden twintig jaar geleden hadden ze iets berekend, en dan..?
8. **I15:** gaan ze kijken of..
9. **I17:** want klimaatverandering valt toch zeg maar over dertig jaar, en dit al weer een tiende van zon periode waarin klimaatverandering gemeten wordt. Dus dan kun je al weer meer..
10. **I10:** steeds nauwkeuriger.
11. **I19:** kijken of het klopt volgens de berekeningen.

Fragment uit het klassengesprek over de betrouwbaarheid van modellen. Les 1: 21'

De leerlingenbijdragen gaan vooral over het toetsen van modelvoorspellingen aan empirische resultaten. De verwachting dat de modeluitkomsten daarbij steeds nauwkeuriger worden, is hier al duidelijk te herkennen.

Over hoe die modelvoorspellingen tot stand komen is nog niets gezegd. Als de docent hier naar vraagt, blijkt dat leerlingen in hun eerste reacties denken aan extrapolatie van historische trends:

1. **D:** maar hoe kunnen ze dan voorspellen dat het klimaat eh.. volgend jaar een graad warmer is dan nu of zo? Of over twee jaar?
2. **I15:** omdat ze waarschijnlijk hebben gekeken naar de geschiedenis.
3. **I10:** want je kijkt eerst naar wat er achter je gebeurd is, naar wat er gebeurd is, en dan kun je er van uit hoe het doorgaat zeg maar, voor een bepaalde periode.
4. **D:** ja, maar dat kan je dus alleen doen als je een paar jaar geleden al begonnen bent. En als je zegt van het gaat nu door, dan verwacht ik dat en dat en dat.
5. **I17:** het KNMI heeft al aardig wat metingen en dan kun je daar bovenop nog dingen die je weet met de albedo en zo.

Toch zijn er ook leerlingen die beïnvloedende factoren noemen, hetgeen mechanismen veronderstelt:

6. **I16:** het klimaat verandert ook, ook zonder dat de mens wat doet.
7. **D:** hoe dan?
8. **I16:** ik bedoel, er zijn altijd warme periodes en koude periodes geweest.
9. **D:** ja.
10. **I10:** hangt ook af van de aardas, en de aardbaan.
11. **I18:** een klein beetje meer CO₂, en huppakee.
12. **D:** hoe kom je daar aan [I10], aan die moeilijke..

13. **II10:** aardrijkskunde.
14. **D:** is dat van die meneer Kroonendinges?
15. **II1:** ja, en van meneer Van de Berg.
16. **D:** nou, dan beginnen we bij meneer Van de Berg. Dan doen we het anders dan in het boekje staat. Wat hebben we dan.. wat moet ik dan tekenen, als ik een tekening maak?
17. **II10:** de vorm van de aardbaan.
18. **D:** de aardbaan?
19. **II10:** ja, hij is niet rond maar het is een ellips. De ene keer ben je dichter bij de zon dan..
20. **D:** wanneer ben je het dichtste bij de zon? In de winter. Maar wat voor invloed heeft dat op het klimaat?

Fragment uit het klassengesprek over de praktijk van het klimaatvoorspellen. *Les 1: 24'*

Er wordt geen onderscheid gemaakt tussen de twee typen leerlingbijdragen. In het vervolg op het fragment evalueert de docent het voorstel van leerling 10 om te kijken naar de vorm van de aardbaan. Daarmee gaat hij verder op het idee dat een mechanisme te expliciteren valt.

Er is nog geen kader ontwikkeld om de bijdrage te kunnen beoordelen in het licht van de doelstelling van het model. De docent laat doorklinken dat de aardbaan niet is wat hij zoekt:

1. **D:** “De vorm van de aardbaan rond de zon is enigszins ellips-vormig. Daardoor staat de aarde soms verder weg van de zon en is de stralingsdichtheid lager.” En hoe vaak wisselt dat? Per dag, of per 20000 jaar?
2. **II1:** dat staat er niet bij. Maar waarschijnlijk per heel erg lang.
3. **D:** per heel weinig, he? Maar oke.

Fragment uit het klassengesprek over de invloed van de aardbaan. *Les 1: 26'*

Als Chris aankondigt dat hij aan een situatieschets gaat beginnen (zie het hiervoor gaande fragment, r. 16) laat hij het onderwijsontwerp los. De toegenomen onzekerheid in de IPCC-voorspellingen blijven in deze episode verder onbesproken. Ook het woordweb, dat moest leiden tot de identificatie van de zon als belangrijkste warmtebron, wordt overgeslagen.

Evaluatie

De eerste analysevraag is of het betrouwbaar voorspellen met complexe dynamische modellen zodanig geproblematiseerd wordt dat dit een motief geeft om zelf te gaan modelleren. Geconcludeerd kan worden dat het klassengesprek niet tot een inhoudelijk motief heeft geleid om een probleem modellerenderwijs op te lossen. Het is echter niet na te gaan in hoeverre het ontwerp daartoe al dan niet functioneert omdat een groot deel van het ontwerp niet is uitgevoerd.

De tweede analysevraag is of het proces betekenisvol wordt voor de leerlingen. Behalve dat een motief om zelf te gaan modelleren niet benoemd is, ontbreken ook

de inperking tot de globaal-gemiddelde temperatuur in 2100 en een vraagstelling voor de eerste cyclus. Met de situatietekening begint de docent zonder overgang aan het eerste model. De probleemverkenning is daarom niet doelgericht geweest.

4.2.5 Tweede episode: opstellen van een eerste eenvoudig model

Om de huidige temperatuur op aarde te verklaren wordt in deze episode een eerste model, het 1-laagsmodel, ontwikkeld.

Wijzigingen in het beoogd lesverloop

Een doel van de ontwerpherziening was om de leerlingen meer verantwoordelijkheid te geven voor de inhoudelijke voortgang van het modelleringsproces, door vooral het proces te sturen. Het modelleringsproces in deze eerste cyclus moet daarom een voorbeeldfunctie vervullen voor de volgende cycli, waarin vooral door middel van proces-aanwijzingen gestuurd wordt.

Het herontwerp is opgebouwd volgens de modelleringsfasen zoals die zijn uitgewerkt in hoofdstuk 2:

- probleemverkenning en analyse van de situatie, resulterend in een onderzoeksvraag en een (kwalitatief) model;
- specificatie van benodigde grootheden en relaties, resulterend in een model dat doorgerekend kan worden;
- modelonderzoek, resulterend in inzicht in de modeluitkomsten en modelgedragingen als gevolg van de 'speelruimte' in de modelinput;
- modelevaluatie, resulterend in een richting voor het vervolg.

Het is nu de taak van de docent om in een klassengesprek een doelgericht modelleringsproces vorm te geven en dit proces te expliciteren. De verbindende tekst tussen de opgaven is uit het lesmateriaal gehaald, maar de opgaven die het proces sturen zijn in deze cyclus nog wel inhoudelijk uitgewerkt.

Een eerste voorwaarde voor een doelgericht modelleringsproces is dat de te ondernemen activiteiten bijdragen aan het bereiken van het gestelde doel. In het eerste ontwerp was dit niet altijd het geval. Daarom is een aantal activiteiten gewijzigd of verdwenen. Om vast te stellen dat het 1-laagsmodel van de aarde tekort schiet is een computermodel niet noodzakelijk. Daarom wordt in deze cyclus geen Powersimmodel gemaakt, maar berekenen de leerlingen met de hand een oplossing voor de evenwichtsvergelijking. Deze waarde hangt niet af van de warmtecapaciteit, dus die wordt ook niet berekend. De albedoschatting blijft wel nodig, maar anders dan in de eerste ronde schat iedere leerling nu een boven- en een ondergrenswaarde. Elke leerling moet zo verantwoordelijkheid nemen voor zijn of haar eigen onzekerheidsmarge in de modeluitkomst.

Analysekader

De wijzigingen in het beoogd verloop geven aanleiding tot de volgende analysevragen bij deze cyclus:

1. Is er sprake van een voor leerlingen betekenisvol modelleringsproces?
2. Wordt er productieve constructieruimte gerealiseerd?
3. Wordt het modelleringsproces zodanig geëxpliciteerd dat het als voorbeeld kan dienen voor de volgende cycli?

Uitvoering

De eerste cyclus duurt van les één tot in les drie.

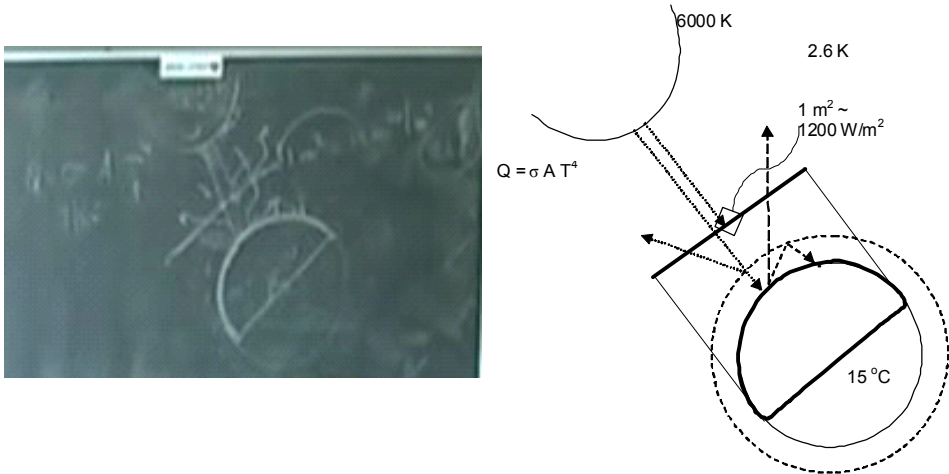
In de voorgaande episode is geen concrete vraagstelling geformuleerd, maar eindigden we niettemin met eerste ideeën voor een mechanisme voor de temperatuur op aarde. In het vervolg hierop stelt Chris opnieuw een exploratieve vraag, waarmee het gesprek de voorgaande lijn weer loslaat.

1. **D:** dus eh.. waar hebben ze het eigenlijk de hele tijd over, als ze het over het broeikaseffect hebben?
2. **lln:** CO₂.
3. **D:** CO₂? Uitstoot?
4. **ll8:** ja. Het versterkend broeikaseffect.
5. **D:** en wat.. waarvan raken ze altijd in paniek? Wat is de uitkomst?
6. **ll8:** dat de poolkappen van de aarde smelten.
7. **ll4:** de ozonlaag eh..
8. **D:** de uitkomst?
9. **lln:** opwarming.
10. **D:** opwarming. Naar welke temperatuur?
11. **ll9:** en dat de zeespiegel stijgt.
12. **ll1:** meer opwarming van langgolvlige straling.
13. **D:** ja. Dus nou ga ik een bolletje tekenen. Wat is dit?
14. **ll7:** een bolletje.
15. **ll1:** de aarde.

Fragment uit het klassengesprek over het effect CO₂. *Les 1: 27'*

De leerlingen noemen een aantal gevolgen van het broeikaseffect. Chris reageert op een leerlingopmerking over 'opwarming', hij vraagt naar welke temperatuur (r. 10). Dit zou een opstapje kunnen zijn naar het doel van het eerste model, maar hij krijgt hierop geen reactie. Daarop begint Chris een situatieschets (r. 13).

Op voorstel van de leerlingen tekent hij de atmosfeer, de zon, en kort- en langgolvlige straling (Figuur 20). Op de vraag van Chris wat in de tekening opwarming veroorzaakt, geven de leerlingen kwalitatieve verklaringen voor de opwarming van de aarde ten gevolge van CO₂: een leerling suggereert opwarming door terugkaatsing aan de atmosfeer, twee andere leerlingen weten dat CO₂ in de atmosfeer de uitgezonden warmtestraling absorbeert. In deze leerlingideeën over relevante mechanismen wordt nog geen onderscheid gemaakt tussen temperatuur en temperatuurverandering. De tekening is vooral een objectgeoriënteerde weergave van het systeem. De stap naar de grootheden en relaties tussen grootheden die nodig zijn voor het eerste model wordt niet gemaakt.



Figuur 20. Bordtekening en reconstructie (rechts) ten behoeve van de ontwikkeling van het eerste model. Bovenin staat de zon, onderin de aardbol. Om de aarde is de atmosfeer weergegeven (stippellijn). Van de aardbol is het bestraald oppervlak met een dikke lijn gemarkeerd. In de dwarsdoorsnede van de energiebundel is aangegeven hoeveel vermogen een vierkante meter ontvangt.

Om, uitgaande van de situatieschets in Figuur 20, verder te kunnen poneert de docent nu het benodigde probleem.

1. **D:** als de aarde nou een klont steen is, met ijzer en nikkel en steen.
Gewoon, silicaten. Hoe warm wordt die, omdat die zon er is?
2. **II7:** eh.. hoe warm is het?
3. **II5:** best wel warm.
4. **D:** vanochtend was het twee graden.
5. **II7:** zeg eens kamertemperatuur?
6. **D:** twintig graden.
7. **II7:** nee, wel er wat onder.
8. **II1:** zestien.
9. **II7:** overal is het..
10. **D:** hier in Nederland is het gemiddeld..?
11. **II7:** hier in Nederland is het gemiddeld dertien. Ik zeg maar wat.
12. **D:** en is dat het gemiddelde over de hele wereld?
13. **II1:** over de hele wereld gemiddeld is het vijftien graden of zo.
14. **D:** nee, maar even beredeneren. Kan het gemiddeld op aarde onder nul wezen?
15. **II1:** nee.
16. **D:** kan het boven de veertig zijn?
17. **II1:** nee.
18. **D:** want?
19. **II7:** omdat het bijna nergens tegelijk.. ja er zijn wel plekken waar het veertig is, maar niet veel.

- 20. **Il5:** het gebeurt niet vaak.
- 21. **D:** als jij nou veertig graden bent, wat gebeurt er dan?
- 22. **Il:** dan ga je dood.

Fragment waarin de docent het model inperkt tot alleen de bijdrage van de zon. *Les 1: 30'*

De docent vraagt in r. 1 naar de temperatuur van een kale aarde, maar in het vervolg van het fragment spreken zowel de docent als de leerlingen over de mogelijke en wenselijke temperaturen op de werkelijke aarde. Het achterwege laten van de atmosfeer krijgt dus niet de betekenis van een modelmatige inperking. In het vervolg op het fragment concludeert Chris dat de huidige gemiddelde temperatuur rond de vijftien graden Celsius ligt en vraagt naar het mechanisme achter deze temperatuur. De inperking tot de invloed van de zon wordt dan onderwerp van gesprek. Is het voor de leerlingen plausibel dat de zon voor dit model de enige relevante warmtebron is?

- 1. **D:** wat is de bron?
- 2. **Il_n:** de zon.
- 3. **Il_n:** het binnenste van de aarde zelf.
- 4. **Il₉:** de kern. Magma.
- 5. **D:** de kern is geen magma. De kern bestaat uit nikkel en ijzer. Dat is gewoon een klomp metaal. Deels vast, deels vloeibaar. En daaromheen zit...?
- 6. **Il₉:** magma.
- 7. **D:** zit magma. En dat bestaat uit?
- 8. **Il₁:** gesmolten gesteente.

De leerlingen vinden radioactieve bronnen in de aarde ook belangrijk en maken dus geen duidelijk keus voor de zon als belangrijkste warmtebron.

- 9. **D:** gesmolten gesteente. En hoe kan dat dan voor warmte.. dat is toch.. hoe oud is de aarde? 4,6 miljard jaar. Een klont steen, he? Die van binnen warm is. 4,6 miljard jaar in een hele koude omgeving. Die gaat puntje puntje.
- 10. **Il_n:** afkoelen.
- 11. **D:** afkoelen. Die gaat alleen maar afkoelen. Tenzij..?
- 12. **Il_n:** tenzij die opgewarmd wordt..
- 13. **Il₇:** door de zon.
- 14. **Il₅:** van buitenaf.
- 15. **Il:** de dampkring.
- 16. **D:** dat is een. Dus dat is warmte komt van buitenaf. Of hij moet zelf warmte genereren.
- 17. **Il₅:** of z'n eigen warmte binnenhouden.

Leerlingen benoemen verschillende mogelijkheden om afkoeling tegen te gaan zoals het toevoeren van energie en het behouden van warmte.

- 18. **D:** maken. Want voor de rest staat die gewoon af te koelen.
- 19. **Il₇:** maar er moet energie toegevoegd worden toch?

20. **D:** nee. Hier kan een proces plaatsvinden waarbij energie oplevert. En in ieder geval komt er warmte van de zon.
21. **II7:** dus fusie. Kernfusie binnen de aarde.
22. **D:** nee, daar is het te koud voor. Maar binnenin, niet in deze laag maar in deze magmalaag, zitten wat radioactieve mineralen en die vervallen en daar komt warmte bij vrij. Maar vergeleken met de zon is dat niet zo gek veel. Wie kan uitrekenen.. wie kan zeggen hoe ik kan uitrekenen hoeveel warmte dat hier oplevert?

Fragment uit het klassenproces over de belangrijkste warmtebron. *Les 1: 32'*

Chris gaat ruimschoots in op de opmerking over warmte uit de aardkern, hetgeen nauw aansluit bij zijn eigen interesse. Hij besteedt echter nauwelijks aandacht aan een precieze verklaring voor de temperatuur in termen van energiestromen. De oorzaak van de afkoeling, temperatuurafhankelijke uitstraling, blijft onbenoemd hoewel het voor het benodigde mechanisme relevant is om deze te onderscheiden. De inbreng van de leerlingen in r. 12-19 suggereert dat zij ervan uitgaan dat (1) een (min of meer) constante temperatuur nodig is en (2) dit vereist dat er niet alleen maar energieverlies is, hetgeen in overeenstemming is met de benodigde inzichten. Het fragment eindigt met een vraag die een notie markeert: het is de eerste keer dat de docent het woord 'uitrekenen' gebruikt in verband met de activiteiten die de leerlingen gaan uitvoeren.

Aan het einde van de eerste les kijkt Chris met de klas vooruit aan de hand van de inhoudsopgave in het werkboek.

1. **D:** model 2, de werking van de atmosfeer. Wat betekent dat over model 1?
2. **II7:** dat die niet helemaal af is, dat er geen atmosfeer bijzit.
3. **D:** model 1 is zonder atmosfeer, model 2 is met atmosfeer. Want, wat is de functie van de.. nee, dat heb ik verkeerd gezegd.. wat is het gevolg van een atmosfeer?
4. **II1:** dat er leven mogelijk is.
5. **II7:** nou, ja, absorptie en..
6. **D:** dat er leven mogelijk is. Ja, dat is mogelijk.
7. **II10:** hoe meer er zonnestralen komen op de aarde, maar er wordt ook minder vastgehouden.
8. **II7:** ja, het gedeelte dat binnen zit wordt beter binnen gehouden, en het gedeelte dat buiten zit wordt beter buiten gehouden.
9. **D:** oke. En het nettoresultaat is dat het warmer of kouder wordt?
10. **II7:** warmer.
11. **II1:** constant.
12. **D:** misschien heft het elkaar op, of het wordt warmer wordt er gezegd.

Fragment uit het klassengesprek waarin de aarde zonder en met atmosfeer onderscheiden worden. *Les 1: 45'*

Door deze vooruitblik wordt klassikaal vastgesteld dat het eerste model onvoldoende zal zijn, zonder dat daar nog een (inhoudelijke) model-evaluatie voor nodig is. Wat betreft het effect van de atmosfeer houden de leerlingen er verschillende ideeën op na.

Aan het begin van de tweede les resumeert Chris het doel en de inhoud van het eerste model in een vraaggesprek met de klas. Hierdoor zijn we in de gelegenheid om na te gaan in hoeverre de benodigde noties op dit moment gerealiseerd zijn.

Hoewel het inperken vooraf niet als strategie benoemd is, kan de leerling in elk geval achteraf de reden benoemen om eenvoudig te beginnen.

1. **D:** wat is de.. als je nou terug gaat naar de inhoudsopgave, wat voor volgorde zit er dan in? Waarom staat er eerst aarde, en dan atmosfeer en dan..? Nee? Niemand? Waarom doen we eerst de aarde en dan pas met de atmosfeer er bij?
2. **II7:** omdat het steeds moeilijker wordt.

Ook andere keuzes en overwegingen worden door de leerlingen benoemd, hoewel de docent af en toe zeer sturende vragen stelt.

3. **D:** het wordt steeds moeilijker. En wat wil je eigenlijk berekenen? Wat ben je aan het doen?
4. **II7:** [...]
5. **II10:** hoe de aarde opwarmt.
6. **D:** hoe de aarde opwarmt. Oke. Heel concreet, wat meet je dan? Nee, eh.. wat bereken je dan?
7. **II10:** de energie die op de aarde komt en die er weer uit gaat.
8. **D:** ja, en dat resulteert in?
9. **II10:** opwarming.
10. **II7:** een netto-warmte.
11. **D:** een opwarming. Dus wat gaat er dan omhoog?
12. **II5:** de energie die er inzit.
13. **D:** nee, de energie die er inzit gaat.. oe, gaat die omhoog?
14. **II5:** nee, die..
15. **D:** ja, als het opwarmt.
16. **II9:** met de atmosfeer erbij.
17. **D:** maar ik wil een veel simpeler woord horen.
18. **II5:** temperatuur?
19. **D:** temperatuur. We gaan nu uitrekenen de temperatuur van de..?
20. **II5:** aarde.
21. **D:** aarde.
22. **II:** gemiddeld.
23. **D:** gemiddeld. Hoe gemiddeld?
24. **II5:** over de hele aarde. [...]
25. **D:** en welke temperatuur gaan wij nou uitrekenen?
26. **II9:** de gemiddelde temperatuur van dag en nacht?
27. **D:** de gemiddelde temperatuur van dag en nacht. Ja. Dus geen rekening houden met dag en nacht. Ja?

28. **II5:** o zo bedoelt u.
29. **D:** ja? Over de hele aarde. Nog eens?
30. **II10:** over de seizoenen.
31. **D:** precies. Zonder seizoenen, gewoon een gemiddelde temperatuur over de hele aarde. Geen rekening houden met dag en nacht, geen rekening houden met seizoenen, geen rekening houden met.. wat zei ik ook al weer? De plaats op aarde. Dus niet de winter in Siberië of de zomer in Turkije. Maar gewoon gemiddeld over de hele aarde. En wat was die gemiddelde temperatuur ook al weer?
32. **II11:** vijftien.
33. **D:** vijftien. Hadden we bedacht he? Heeft iemand achterin ergens gelezen wat het echt is?
34. **II4:** 288 Kelvin.
35. **II:** dus dat is..
36. **II9:** 15. Precies vijftien.
37. **D:** is dat al precies? Dat is helemaal mooi. Ja. En hoe gaan we dat nou berekenen, waar komt die temperatuur vandaan? Waar komt die warmte vandaan?
38. **II3:** van de zon.
39. **D:** van de zon, en de aarde straalt uit. Wat is nou de grote lijn van die berekening? Er komt warmte in en er gaat warmte uit. Hoe kom je dan bij vijftien uit?

Fragment waarin de opbrengsten van les 1 herhaald worden. *Les 2: 4'*

Dat een systeem met constante instraling zich naar een evenwichtstemperatuur ontwikkelt, is nog niet aan de orde; er wordt vanuit gegaan dat er een evenwichtstemperatuur heerst. In antwoord op de vraag van Chris waarmee het fragment afsluit (r. 39) stelt leerling 5 dat de temperatuur het resultaat is van het verschil tussen wat er in- en uitgaat. Chris stelt daar tegenover dat als er netto energie toegevoegd wordt, de aarde steeds warmer wordt.

1. **D:** die wordt steeds warmer. Dus wat is de truc van de berekening?
2. **II7:** dat die op een gegeven moment minder warmer wordt.
3. **D:** minder warmer wordt. Ja. Wat weet je uit de derde klas van al die warmtesommen? Wat is het eerste wat je opschrijft?
4. **II7:** dat die in evenwicht eh..'
5. [docent gebaart 'sst'.]
6. **D:** wat is het eerste dat je opschrijft bij die derdeklas sommen?
7. **II8:** Q. Q is m maal c..
8. **D:** ga nou maar even schudden aan je hoofd want dit moet er uit komen. [...]
9. **D:** nee. Q op is Q af.

Fragment over het berekenen van de evenwichtstemperatuur. *Les 2: 6'*

De opmerking van leerling 7 dat het minder warmer wordt (r. 2), biedt een goede ingang om de temperatuurafhankelijkheid van de uitstraling te benoemen en vervolgens het kwalitatieve gedrag van het model. De docent is echter op zoek naar de evenwichtsconditie en poneert deze.

De opgave in het werkboek om een probleemstelling te geven voor het eerste model wordt in de les klassikaal beantwoord (opgave 1 in het werkboek; les 2: 11'). De vraagstelling is voor de docent aanleiding om eerst met de klas te bespreken wat een model is. Ze komen uit op een omschrijving van een model als 'een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid'. Op basis daarvan wordt verantwoord dat het model niet alle mogelijke factoren bevat.

1. **D:** en wat gaan we in dat model stoppen om uit te rekenen de gemiddelde temperatuur van de aarde? Wat gaan we er wel in stoppen?
2. **II8:** de straling van de zon.
3. **II7:** zo min mogelijk.
4. **D:** ik had drie dingen, ik ga drie dingen vragen. Wat stoppen we er in, wat stoppen we er straks in en wat stoppen we er niet in?
5. **II10:** eerst de factoren die de grootste invloed hebben.
6. [...]
7. **II7:** aarde zon.
8. **D:** de zon. Dat is een. Twee. De aarde, want anders..
9. **II5:** de aarde [zonder atmosfeer].
10. **D:** wat doen we.. nee, pff.. hoe stoppen we de aarde er in? Hoe zien we de aarde voor ons [...], wat is de vorm van de aarde?

Fragment uit de bespreking van de probleemstelling van het eerste model. *Les 2: 15'*

Als antwoord op de vraag uit het lesmateriaal wordt dus benoemd dat alleen zon en aarde hier relevant zijn. Aan het eind van het fragment stuurt Chris opnieuw aan op een objectgerichte voorstelling door te beginnen over de vorm van de aarde. In het werkboek vermeldt alleen leerling 1 een onderzoeksvraag, namelijk "wat is de gemiddelde temperatuur op aarde als je alleen rekening houdt met inkomende en uitgaande straling". Het is een goed geformuleerde vraag, waarin met name het klassengesprek uit het begin van les 2 herkenbaar is.

In het lesmateriaal zijn vragen opgenomen om de voor de berekening benodigde gegevens te bepalen: achtereenvolgens de hoeveelheid zonne-energie die de aarde ontvangt, het albedo, het geabsorbeerd vermogen per vierkante meter aardoppervlak en een formule voor de uitstraling. Enkele leerlingen hebben geprobeerd deze opgaven zelfstandig te maken, als deel van het huiswerk, maar ze worden ook plenair gemaakt. Om de eerste opgave te beantwoorden, hoeveel zonne-energie de aarde ontvangt, hebben minstens twee leerlingen de formule voor de uitstraling gebruikt (leerling 9: "ik dacht, er stond maar één formule dus ik denk.."). De docent noteert daarom eerst de grootte van de uitstraling bij de huidige temperatuur, en gaat vervolgens verder met de werkelijke opgave. Als gezamenlijk berekend is hoeveel energie de aarde gemiddeld per vierkante meter ontvangt, ziet leerling 5 het verschil met de uitgaande straling.

1. **II5:** huh? He, psst. Dan komt er meer uit dan dat er..
2. **D:** oke? Dat komt er binnen.
3. **II5:** er gaat meer uit.
4. **D:** oh. Dat is lekker.
5. **IIIn:** haha.
6. [...]
7. **II10:** de wetenschappers hebben het fout, de aarde koelt af.
8. **II9:** meneer, volgens mij moet bij die ene.. oh nee, laat maar.
9. **D:** hebben we een foutje gemaakt? [...] Dit komt er in en dat gaat er uit. Toch? Dit valt er op en dat wordt uitgestraald.
10. **II10:** de aarde koelt af.

Fragment uit het klassengesprek volgend op de berekening van de in- en uitgaande energiestromen. *Les 2: 33'*

Leerling 10 trekt correct de conclusie dat de temperatuur in het model zal afnemen (r. 7, 10). De leerlingen dragen vervolgens allerlei beperkingen van het model aan. Leerling 7 benoemt daarbij dat “hoe meer factoren je meeneemt, hoe accurater het [model] wordt”, hetgeen de gewenste notie is waarmee de hoofdvraag voor de module gemotiveerd moest worden. De eerste beperking die de leerlingen noemen, is dat de atmosfeer ontbreekt. Hoewel leerling 1 aanvoert dat de atmosfeer een deel van de inkomende instraling zal reflecteren, zodat er nog minder het aardoppervlak bereikt, concluderen leerlingen 5 en 7 dat het uiteindelijke effect van de dampkring opwarmend moet zijn. Anders dan in de eerdere discussie over de werking van de atmosfeer bevestigt de docent nu wel dat het resultaat van de atmosfeer een hogere temperatuur is.

Het is al duidelijk dat dat de totale zonne-instraling te klein is om de aarde op temperatuur te houden, waardoor de resterende opgaven in feite niet meer nodig zijn voor de modevaluatie. In een klassengesprek worden deze niettemin nog gemaakt.

Om een boven- en ondergrens voor het albedo te schatten komen leerlingen met eigen aannames over de samenstelling van het aardoppervlak. Leerling 4 merkt op dat het grootste deel van het aardoppervlak oceaan is. Op basis hiervan bediscussiëren de leerlingen of 0.1 of 0.2 een redelijke ondergrens is. Eén leerling weet dat het albedo van Mars 0.15 is, en beargumenteert zo dat de aarde in ieder geval een hogere waarde moet krijgen. Voor de bovengrens gaan de leerlingen uit van de oppervlakken met de hoogste reflectiecoëfficiënten (sneeuw, wolken) en kiezen een grenswaarde die daar onder blijft. De docent noteert de gemaakte aannames en de resulterende range (0.2 – 0.6) op het bord.

In een laatste opgave wordt gevraagd om de benodigde modelvergelijkingen op te stellen. Daarin is de temperatuur een variabele in plaats van een bekende.

1. **D:** [*de uitstraling*] is 5,67 tien min acht maal 1 voor de grap en dan..?
2. **II4:** maal 288.
3. **II10:** maal T.
4. **II7:** maal T tot de vierde.
5. **II10:** want die wil je uitrekenen.

6. **II7:** je kunt niet zeg maar je onbekende invullen.
7. **II1:** oh, zo.

Fragment uit de klassikale bespreking van de modelvergelijkingen. *Les 3: 8'*

Niet alle leerlingen realiseren zich direct wat het verschil is met de eerdere berekening van de uitstraling (r. 2), waarin de temperatuur gegeven is, maar leerlingen 7 en 10 in elk geval wel (r. 3-6). Door de vergelijkingen nog eens te bespreken lijkt de docent erin te slagen dat meer leerlingen dit goed inzien (r. 7). De leerlingen berekenen nu de (veel te lage) temperatuur die het 1-laagsmodel voorspelt, waarop de docent aankondigt dat het toevoegen van de atmosfeer een opwarmend effect moet geven.

Hoe een evenwichtstemperatuur in dit 1-laagsmodel ontstaat, werd in de probleemverkenning al niet beredeneerd. Nu de leerlingen een evenwichtswaarde berekenen, is het ontstaan er van al helemaal niet aan de orde. De spreiding in uitkomsten als resultaat van de geschatte albedorange is in feite ook niet meer relevant omdat van tevoren al vast staat dat de maximale temperatuur in het model niet voldoet om de huidige temperatuur te verklaren.

Evaluatie

De eerste analysevraag is of het verloop van het modelleerproces in deze cyclus betekenisvol is geweest voor de leerlingen.

De leerlingen zijn actief betrokken in allerlei activiteiten: zij komen met verklaringen voor de temperatuur op aarde, zij hebben verwachtingen over de voorwaarden waaraan de modeltemperatuur moet voldoen, zij maken aannames om een modelparameter te schatten en zij evalueren het ontwikkelde model. Allerhande activiteiten uit het natuurwetenschappelijk modelleerproces zijn dus te herkennen en de beoogde producten zijn grotendeels gerealiseerd.

Niettemin vinden we in vrijwel alle fasen van de modelontwikkeling aanwijzingen dat deze op belangrijke punten niet doelgericht zijn verlopen. De docent geeft onvoldoende richting aan het modelleerproces en gaat herhaaldelijk in op bijzaken. Zo ontbreekt de probleemstelling, is het inperken tot een kale aarde geen strategische keuze maar gebeurt terloops en pas nadat de tekening gemaakt is. Bovendien stuurt de docent meerdere keren aan op een objectgerichte situatievoorstelling in plaats van een voorstelling in termen van grootheden en relaties tussen grootheden. Een andere aanwijzing is dat in de klassengesprekken het idee ontbreekt van een rekenmodel. Hoewel de docent herhaaldelijk spreekt over het berekenen van de temperatuur, is het onduidelijk of de leerlingen inzien hoe een (evenwichts)temperatuur volgt uit de besproken mechanismen. Bij het bepalen van de benodigde modelgegevens worden de leerlingactiviteiten gestuurd door de vragen in het lesmateriaal en door de beschikbare informatie, niet door een vooraf besproken probleemaanpak.

We moeten dus concluderen dat het modelleerproces in de eerste cyclus niet betekenisvol, althans niet doelgericht, is geweest, maar we kunnen daarbij wel opmerken dat de leerlingen achteraf globale overwegingen benoemen die het

verloop van het modellerproces hebben gestuurd. De leerlingen lijken het klassenverloop dus voldoende te kunnen volgen om samenhang te ervaren.

De tweede analysevraag is of er productieve constructieruimte is gerealiseerd. Feitelijk hebben de leerlingen in het lesontwerp alleen bij de albedoschatting mogelijkheid om eigen keuzes te maken, maar ook op andere plaatsen zouden leerlingen constructieruimte kunnen ervaren als de docent gebruik maakt van hun inbreng.

De bijdragen van de leerlingen worden door de docent serieus genomen en hebben zo grote invloed op het klassenverloop. De docent expliciteert echter veelal niet waarom hij op een bepaalde bijdrage voortbouwt (en op andere niet). Ook evalueert hij de inbreng niet in het licht van het modelleerdoel. Het serieus nemen van de leerlingeninbreng is daardoor een van de redenen waardoor het doelgerichte karakter van het modellerproces niet duidelijk is. Vanuit een modellerperspectief wordt de geboden constructieruimte dus niet productief, maar vanuit leerlingperspectief zal dit anders zijn ervaren.

De laatste analysevraag is of het modellerproces zodanig geëxpliciteerd wordt dat het als voorbeeld kan dienen voor de volgende cycli. Het (verloop van het) modellerproces wordt nergens onderwerp van gesprek: de te volgen strategie en de gewenste lijn van berekening worden niet geëxpliciteerd. Bovendien zijn de benodigde fysische processen en het modelgedrag niet beredeneerd. De cyclus krijgt daardoor niet de voorbeeldfunctie die ervan verwacht werd.

4.2.6 Derde episode: kwalitatieve uitbreiding van het startmodel

In een tweede modelleercyclus wordt de atmosfeer als een tweede laag toegevoegd aan het 1-laags model.

Wijzigingen in het beoogd lesverloop

Om een meer procesmatige sturing mogelijk te maken zijn de modelleerfasen in de tweede cyclus overeenkomstig gestructureerd als die in de eerste cyclus, maar anders dan in de eerste cyclus is niet inhoudelijk gespecificeerd wat deze modelleerfasen inhouden. Leerlingen moeten daarvoor teruggrijpen op de voorgaande modelontwikkeling. Door de leerlingen gelegenheid te geven om de modelleerstappen uit de eerste cyclus zelf toe passen op de modeluitbreiding verwachten we dat er meer productieve constructieruimte gerealiseerd kan worden. De rol van de docent is om dit te stimuleren door terug te verwijzen naar overeenkomstige fasen uit de eerste cyclus en om de kwaliteit van de opbrengsten te bewaken.

Uit de eerste ronde is gebleken dat leerlingen in de probleemverkenning met vage of foutieve ideeën over de werking van de atmosfeer kunnen komen, zoals dat de atmosfeer werkt als een deken of dat er opwarming is ten gevolge van terugkaatsing van aardse warmte-uitstraling aan de atmosfeer. De docent zal er voor moeten zorgen dat de leerlingen hun ideeën concretiseren tot een mechanisme in termen van fysische processen en dat de mogelijke bijdragen van de atmosfeer systematisch worden nagegaan. De leerlingen kunnen vervolgens de belangrijkste bijdrage aan de opwarming identificeren.

Om het model te specificeren bespreekt de docent met de leerlingen hoe en met welke informatie het model doorgerekend kan worden. De benodigde waarden en formules bepalen de leerlingen zelf. Anders dan in de eerste ronde schatten leerlingen nu ook een eigen range van waarden voor de mate van absorptie en emissie, ϵ . Een goede schatting verloopt analoog aan de albedoschatting in voorgaande cyclus. Het berekenen van de evenwichtstemperatuur betreft nu twee gekoppelde vergelijkingen, zodat de hulp van de docent nodig kan zijn om de gezochte temperatuur daadwerkelijk uit te rekenen.

Modelonderzoek vereist het exploreren van de modeluitkomsten. Elke leerling kan met zijn of haar eigen rangeschattingen voor α en ϵ een eigen temperatuurrange voorspellen. In een plenair gesprek kunnen zij concluderen dat het model de huidige temperatuur op aarde goed verklaart.

Anders dan in de eerste ronde wordt er nog steeds geen Powersimmodel gebouwd, omdat een reden hiervoor nog ontbreekt. Het ontstaan van een evenwichtstemperatuur kan wellicht een reden verschaffen; dit vormt het onderwerp van de volgende cyclus.

Analysekader

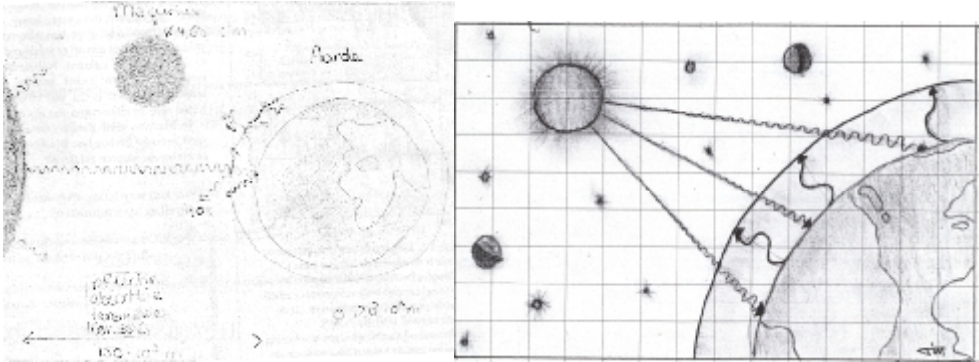
De wijzigingen in het beoogd verloop geven aanleiding tot de volgende analysevragen bij deze cyclus:

1. Is er sprake van een voor leerlingen betekenisvol modelleerproces?
2. Wordt er productieve constructieruimte gerealiseerd?
3. Wordt in deze cyclus het modelleerproces uit de eerste cyclus als voorbeeld gebruikt voor de modelontwikkeling?

Uitvoering

De tweede cyclus begint, nog voordat de eerste cyclus helemaal afgerond is, met een huiswerkopdracht voor les 3, en duurt tot en met les 4. Hoewel de precieze modeluitkomsten van het 2-laagsmodel dan nog niet berekend zijn, start de docent in les 5 met de volgende episode.

Het doel voor de modelontwikkeling is voldoende duidelijk geworden uit de evaluatie van het 1-laagsmodel: toevoeging van de atmosfeer aan het model moet leiden tot een hogere temperatuur. Net als in de eerste cyclus is het de bedoeling dat een situatietekening gemaakt wordt waaruit blijkt dat er een hogere evenwichtstemperatuur ontstaat. De docent vraagt de leerlingen om als huiswerk een tekening te maken van de aarde met atmosfeer. Hij formuleert de opdracht als “een plaatje [maken], een klein zonnetje, een aarde en een atmosfeer en die stralen hoe die lopen en hoe dat dan uiteindelijk kan zorgen dat er.. *[einde zin]*”. Vijf leerlingen hebben het huiswerk gemaakt. Overeenkomstig de voorbeeldtekening uit de eerste cyclus en de opdrachtformulering door de docent tonen de tekeningen allemaal een meer of minder gedetailleerde werelddbol, een atmosfeerschil en enkele stralengangen (zie Figuur 21 voor twee tekeningen).



Figuur 21. Tekeningen van aarde met atmosfeer, van leerling 1 (links) en leerling 10.

De docent maakt op basis van de leerlingtekeningen een bordschets van de aarde met atmosfeer. Op verzoek van de onderzoeker (gedurende de voorbespreking van de les) geeft de docent nu de aarde en de atmosfeer weer als balkjes, bedoeld om het globaal-gemiddelde karakter tot uitdrukking te brengen. Een tweede aspect van de beoogde weergave, namelijk dat de breedte van de pijlen correspondeert met de grootte van de energiestromen, laat de docent echter achterwege. De docent introduceert zijn tekening door aan te kondigen dat “we die mooie schilderijtjes van jullie een beetje scientific op het bord [gaan] zetten”. Hij geeft echter geen toelichting op de voordelen van deze weergave. De leerlingen zien deze dan ook niet in.

1. **D** [tekent twee lagen boven elkaar]
2. **II1**: meneer, dat is niet echt realistisch.
3. **D**: nee, maar dit is ok een model. Het is niet realistisch, we moeten het versimpelen.
4. **II1**: een model moet wel realistisch blijven.
5. **D**: een model moet realistisch blijven.
6. **II1**: anders wordt het helemaal..
7. **II7**: anders raakt [II1] in de war.
8. **II1**: ja, inderdaad.
9. **II10**:qua opzet, realistisch.
10. **D**: maar kunnen jullie nou jullie plaatje, met al die stralen en zo en de zon, vertalen naar zoiets.
11. **II1n**: ja.
12. **II7**: ik denk het wel. Die van ons wel.
13. **II8**: die van u is zo amateuristisch getekend.
14. **D**: ik teken ook nog even de zon er bij. Dit is de zon. Ja? Helemaal op schaal.

Fragment uit de klassikale bespreking van een schematisch modelldiagram. *Les 3: 12'*

Op aanwijzing van de leerlingen tekent de docent de stralengangen in. In principe bieden de leerlingtekeningen een aanknopingspunt om het verklarend mechanisme nader te laten benoemen (hoe verklaart absorptie door de atmosfeer, gesuggereerd in

de tekening van leerling 10, een hogere temperatuur aan het oppervlak), maar dit gebeurt niet.

De fysische betekenis van sommige stralengangen is nog niet altijd duidelijk. Zo geeft leerling 10 aan dat ten gevolge van de atmosfeer de warmtestraling niet langer kan verdwijnen. Dit lijkt ook zijn tekening te suggereren (Figuur 21, rechts). Als de docent om een toelichting vraagt, refereert de leerling aan zowel de absorptie van langgolvlige warmtestraling als de mogelijke reflectie daarvan aan de atmosfeer.

1. **II10:**nou, die langgolvlige straling wordt dus eh..
2. **D:** deze.
3. **II10:**die gaat niet meer weg.
4. **D:** die gaat niet meer weg?
5. **II10:**geloof ik. Die kan wel door de atmosfeer worden opgenomen en de kortgolvlige straling niet. Die langgolvlige straling wel.
6. **D:** ik verstond het gewoon niet. Dit kan..?
7. **II10:**kan wel door de atmosfeer worden opgenomen of teruggekaatst, of zo.
8. **D:** dus ik kan die er in tekenen. Oke. Ik doe hem dan nog iets door. En dan zo. [*tekent absorptiepijl de atmosfeerlaag in*]
9. **II10:**wordt het ook teruggekaatst?
10. **II1:** ja, dat weet ik niet.
11. **II10:**het blijft in elk geval op aarde, die warmte.
12. **II1:** tussen de aarde en de atmosfeer.
13. **II10:**tussen de aarde en de atmosfeer.

Fragment waarin een leerling het effect van de atmosfeer beschrijft. *Les 3: 14'*

In r. 5 spreekt leerling 10 van het opnemen van straling, hetgeen geïnterpreteerd kan worden als absorptie. In r. 9 onderscheidt hij echter niet duidelijk absorptie en reflectie. Van deze beide mogelijke interacties wordt niet benoemd hoe dit bijdraagt aan een hogere temperatuur aan het aardoppervlak, hetgeen ook uit de leerlingtekeningen niet blijkt. En hoewel leerling 10 het fragment begint met fysisch expliciete processen keert in de laatste regels het veel vagere idee terug dat de warmte tussen de beide lagen gevangen blijft (r. 11-13).

De uitstraling van warmte door de atmosfeer wordt niet expliciet door leerlingen genoemd. De docent voegt deze toe naar aanleiding van leerlingbijdragen die vooral over transmissie lijken te gaan:

1. **II9:** meneer, wordt het niet ook gewoon uitgezonden, een gedeelte van die straling? Of blijft het dan op aarde?
2. **D:** ja. Het antwoord is ja, maar ik weet niet of jij bedoelt waar ik aan denk. Maar het antwoord is ja. Waar dan precies? Welke straling wordt uitgezonden?
3. **II9:** ik bedoel de warmtestraling. Wordt die ook van de aarde uitgezonden, dus dat het niet.. het blijft toch niet allemaal op de aarde, of wel?
4. **D:** dat is dit [*wijst op emissiepijl bij de aardlaag*].
5. **II9:** ja.

6. **D:** dat blijft niet allemaal.. nee. Dus wat moet ik ook nog tekenen?
7. **II1:** zo door de atmosfeer naar buiten.
8. **D:** dan doen we dat zo, he? Of desnoods dit, doe maar zo. Net als die *[wijst op overeenkomstige pijlen bij aardlaag]*. Die gaat er in *[wijst op absorptiepijl bij aardlaag]*, en even later komt die er weer uit *[wijst op emissiepijl bij aardlaag]*. Dat mag best even duren.
9. **II2:** dat is langgolvig?
10. **D:** ja, vanaf nu, ja. Nog meer pijlen?

Fragment uit het klassengesprek over warmte-uitstraling in het model. *Les 3: 16'*

De docent tekent eerst, op voorstel van leerlingen 1 en 9, een transmissiepijl (r. 8: “dan doen we dat zo, he?”), maar maakt er vervolgens emissie van en wijst op de overeenkomst met de absorptie en emissie van straling bij de aardlaag (r. 8). Opvallend is dat de docent in de schets alleen de uitstraling richting het heelal aangeeft. Voor het opwarmend effect van de atmosfeer zou juist de uitstraling de andere kant op van belang zijn. De resulterende schets is weergegeven in Figuur 22.

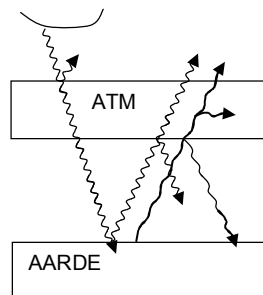
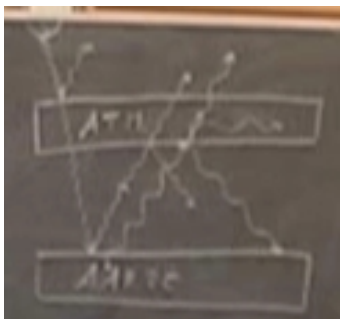
De docent vraagt de leerlingen om in de tekening de labels ‘absorptie’, ‘reflectie’ en ‘transmissie’ aan te geven. Nu wordt pas echt duidelijk dat de kortgolelige pijl die uit de atmosfeer omhoog wijst (zie de pijl rechtsboven in Figuur 23, verderop), emissie voorstelt:

1. **D:** en dit is..? Niet een van die drie.
2. **II10:**emissie of zoiets? Of bestaat dat niet?
3. **D:** ja.
4. **II7:** dat is weer nieuwe emissie, net zoals die ene die uit de aarde komt.
5. **II10:**en de zon.
6. **D:** wat.. oh, deze. Zullen we daar een E voor gebruiken? En dit is... Ja?

Fragment uit het klassengesprek over de betekenis van de uitgaande pijlen. *Les 3: 20'*

De overeenkomst tussen uitstraling door de atmosfeer en uitstraling door het aardoppervlak wordt hier opgemerkt door een leerling. Hoewel het belangrijkste opwarmende effect, de warmte-uitstraling van de atmosfeer naar de aarde, nog niet ingetekend is, antwoorden de leerlingen bevestigend op de vraag van de docent of de atmosfeer een opwarmend effect heeft.

Figuur 22. Bordtekening en reconstructie van de ‘scientific’ weergave het 2-laagsmodel.



1. **D:** Nou? En hoe werkt dit nou? Wordt de atmosfeer hier warmer van?
Wordt de aarde hier warmer van?
2. **II2:** dat blijkt..
3. **II:** ik hoop het.
4. **II2:** ja, [omdat die een groot deel van de warmtestraling..]
5. **II10:** ja, dat ligt eraan hoeveel die tegenhoudt.
6. **II:** hij gaat niet alles uitstralen.

Fragment uit het klassengesprek over de werking van de atmosfeer. *Les 3: 20'*

De plenaire verkenning van leerlingideeën resulteert dus in een eerste verklaring voor de hogere temperatuur. Deze verklaring verwijst alleen naar de vage notie van warmte vasthouden: er is geen directe verwijzing naar de zojuist benoemde processen. Zonder de houdbaarheid van de verklaring te evalueren geeft de docent opdracht om in koppels de opgave in het werkboek te maken over de analyse. Het doel van deze opdracht is om alle mogelijke interacties tussen de stralengangen en de atmosfeer systematisch te onderzoeken. Het is voor de leerlingen echter niet duidelijk wat deze analyse moet toevoegen aan wat zojuist plenair gedaan is.

1. **D:** Bladzijde negen en tien, opgave twee. Opgave twee. "Ga na wat er met de zoninstraling kan gebeuren. Wat zijn de mogelijke gevolgen wanneer deze de atmosfeerlaag tegenkomt, en in hoeverre zijn dit verklaringen voor de temperatuurverhogingen?"
2. [...]
3. **II2:** zeg maar dit herhalen wat we nu gedaan hebben, of niet?
4. **D:** ja maar werk dit nou even voor jezelf uit. Ik zag wenkbrauwen omhoog gaan achterin, dus het zal wel niet helemaal goed zijn. Ja?
5. **II2:** oh, nou.
6. **II9:** analyse van welk model?
7. **D:** dit. Dit 2-laagsmodel. Aarde en atmosfeer. Nee, maar dan ga je dat nou nog eventjes op een rijtje zetten. Dit 2-laagsmodel. Alle stralengangen in het 2-laagsmodel en dat je kan verklaren waarom het hier warmer wordt. Want als je de atmosfeer alleen maar ziet als iets dat de aarde alleen wat dikker maakt.. waarom zou het hier dan warmer worden? Of kouder. Als de aarde groeit of zo, gewoon he, dat er een schilletje omheen komt, waarom wordt hij dan warmer?

Fragment waarin de docent opdracht geeft tot analyse. *Les 3: 22'*

De docent probeert toe te lichten welke opbrengst hij verwacht zonder dat hij expliciteert wat er ontbreekt aan het model zoals dat tot nu toe geformuleerd is.

De leerlingen werken in koppels aan de gestelde opdracht uit het lesmateriaal. Uit de gesprekken tussen de docent en een aantal leerlingen blijkt dat het broeikasmechanisme nog volstrekt onduidelijk is voor de leerlingen. De leerlingen proberen de elementen uit de eerder gegeven verklaring 'op een rijtje te zetten'. Als de docent om toelichting vraagt, omschrijft leerling 10 de atmosfeer als 'een jasje'.

1. **II7:** o ja, wat we ook nog moeten zeggen is dat de atmosfeer waarschijnlijk makkelijker korte straling doorlaat dan lange straling want.. dat zal daar ook wel mee te maken hebben. Omdat zeg maar de aarde zet om van lang naar kort van kort naar lang.
2. **II10:**ja, de aarde warmt zichzelf op, eigenlijk.
3. **II7:** ja, uiteindelijk wel, maar..
4. **D:** hij warmt zichzelf op?
5. **II7:** nee, de aarde verliest minder warmte.
6. **II10:**hij heeft zeg maar een soort jasje om.
7. **II7:** ja een jasje [...].
8. **II10:**en er kan makkelijker straling door dat jasje dan dat hij z'n warmte kwijt kan.
9. **II7:** maar dat is omdat hij dus aankomt als kortgolvig en weggaat als langgolvig.

De docent probeert een preciezere verklaring uit te lokken; daartoe vergelijkt hij de werking van een atmosfeerlaag met die van een extra laag grond.

10. **D:** als het gewoon een jasje is..
11. **II8:** eigenlijk is het gewoon een broeikas.
12. **II7:** he, wat een goed gevonden..
13. **D:** nee maar als de atmosfeer.. wat is nou het verschil tussen een jas of een extra 100 meter grond boven de aarde?
14. **II7:** omdat.. die 100 meter grond heeft hetzelfde effect als die 100 meter grond daaronder.
15. **D:** ja.
16. **II7:** dus die straalt daarna weer keihard uit en dan krijg je weer zon aarde met min tien graden Celsius.
17. **D:** dus met die jas.. moet er meer zijn dan alleen maar dat de aarde groter wordt.

De aarde krijgt een min of meer 'magische' functie als omzetter van kort- naar langgolvige straling.

18. **II7:** die atmosfeer zet die straling niet om, maar de aarde wel. Zet hem om naar andere straling.

Fragment over het werkingsmechanisme van de atmosfeerlaag. *Les 3: 26'*

Ook al wordt er terecht opgemerkt dat langgolvige straling slecht doorgelaten wordt, het blijft onbenoemd wat er dan wel mee gebeurt. De vergelijking met 100 meter aarde zet ook niet aan tot een preciezere beschouwing van de atmosfeer: terecht merkt leerling 7 op dat de aarde dan dezelfde temperatuur krijgt als in het eerste model (r. 16).

Omdat het gesprek niet tot het gewenste resultaat leidt, doet de onderzoeker een poging. Hij vraagt expliciet naar de werking van de jas.

1. **O:** ik bedoel, waar blijft die energie uiteindelijk die de aarde uitstraalt? Jij zegt, het is een jas die houdt warmte vast. Wat is precies de werking van een jas? [...]

2. **II7:** een jas is anders dan een atmosfeer want een jas die houdt de warme lucht gewoon binnen. Die zorgt gewoon dat er een laag lucht binnen zit zoals bij elke isolerende..
3. **O:** maar als jij warmer wilt zijn, dan moet jij meer energie hebben.
4. **II7:** dan maak je de lucht warm, en dat wordt dan binnengehouden door de jas.
5. **II10:** en die lucht warmt dan weer de aarde op.
6. **II7:** en de aarde warmt gewoon de atmosfeer op en die blijft binnen omdat de atmosfeer aan de aarde vast zit.
7. **D:** de lucht warmt de aarde op, ja.

Fragment over de werking van een jas. *Les 3: 30'*

In r. 2 zegt leerling 7 weliswaar dat de atmosfeer anders is dan een jas, maar het enige verschil dat uit de toelichting blijkt, is dat de atmosfeer aan de aarde vast zit terwijl de lucht in de jas binnengehouden wordt door de jas. In r. 5 merkt leerling 10 op dat de opgewarmde lucht op zijn beurt de aarde weer opwarmt. Dit idee lijkt een aanknopingspunt te bieden om het gezochte mechanisme ter sprake te brengen. De onderzoeker haakt hier op in met de vraag of de luchtlaag dan warmer moet zijn dan de aardlaag. De leerlingreacties lijken ingegeven door een idee van gradiëntgedreven warmtetransport (diffusie, geleiding):

1. **O:** moet de lucht dan warmer zijn dan de aarde?
2. **II10:** eh..
3. **II7:** nou ja, om iets op te warmen moet het doorgaans wel een hogere temperatuur hebben.
4. **II8:** haha.
5. **D:** nee, laat hem even zelf denken. Moet de lucht warmer zijn dan de aarde? Rhetorische vraag, het antwoord is nee.
6. **O:** nou, retorische vraag? [II7] vindt van wel, [II8] volgens mij ook.
7. **II8:** nee, niet helemaal.
8. **II7:** om iets op te warmen, dat is toch [..]
9. **II8:** opwarmen of warm houden? Dat is wel een verschil.

De docent poneert het gezochte antwoord (r. 5), en doet vervolgens moeite om aannemelijk te maken dat alles warmte uitstraalt als het een temperatuur heeft.

10. **D:** steek je hand eens op. Steek je hand eens op. Niet aanraken, he. [*plaatst zijn hand vlak voor die van II10.*] Je hebt van die mensen die zeggen voel je magnetische straling.
11. **II10:** ik voel je warmte. [...]
12. **D:** wie van ons tweeën is het warmst? Redelijkerwijs?
13. **II10:** ik heb altijd hele koude handen.
14. **D:** oke, maar.. dat zal niet veel uitmaken he.
15. **II10:** maar als ik warmer zou zijn dan zou ik uw warmte niet voelen, denk ik. Dan zou ik denken [dat het wat] kouder was.
16. **D:** nee, want ik straal uit.
17. **II10:** oh.

18. **D:** jij ook.
19. **II7:** [...]
20. **D:** en dat is geen geleiding. Geen stroming. Dat is straling. Dus. Moet je warmer zijn dan de aarde om de aarde.. [dadelijk denkt] oh lekker warm?
21. **II10:**nee.
22. **D:** maar je moet wel warmer zijn dan..?
23. **II10:**oh, oke.
24. **II7:** de atmosfeer.
25. **D:** [dan 0 Kelvin]

Fragment waarin de docent warmtestraling uitlegt. *Les 3: 32'*

In tegenstelling tot wat Chris hem wil laten geloven veronderstelt leerling 10 dat de stralingswarmte niet voelbaar is voor het warmste object (r. 15). De docent gaat niet in op deze tegenwerping.

Na het gesprek met dit groepje leerlingen vraagt de docent nog eens plenair hoe de leerlingen de opwarming verklaren. De leerlingreacties zijn geheel analoog: leerling 5 geeft als uitleg dat de atmosfeer als een jas werkt. De docent vraagt nogmaals wat het verschil is tussen de luchtlaag en de 100 meter extra grond. Leerlingen 3, 4 en 5 benoemen dat de extra grond dezelfde uitstraling houdt als in het eerste model. Leerling 5 benoemt de isolatie van de luchtlaag, leerling 3 dat de warmte ertussen blijft. Aan de lucht wordt een isolerende werking toegekend die niet nader wordt gespecificeerd.

In de discussie tot nu toe worden nu en dan wel fysische processen geopperd, maar de gevolgen voor de energiestromen en interacties in de eerder gemaakte modelschets blijven onbenoemd. Dit verandert als de docent in de loop van de discussie op de uitgaande stralengangen in de tekening wijst:

1. **D:** op het moment dat je een atmosfeer hebt met lucht, dan kan dit..
2. **II5:** weerkaatst binnenblijven.
3. **D:** weerkaatst binnenblijven. Ja.. maar als het twaalf keer zo op en neer gaat en op een gegeven moment eruit fietst, dan ben je het ook kwijt.
4. **II1n:** ja maar [...]
5. **II7:** er wordt wel steeds een beetje geabsorbeerd door de aarde, volgens mij.
6. **D:** ja, dat is waar. Er kan elke keer weer een beetje geabsorbeerd worden. Ja dat is allemaal waar.
7. **II7:** dus dan is het veel [minder dan die twaalf keer stuiten.]
8. **II4:** dus hij krijgt veel meer warmte dan wanneer je het in een keer kwijt bent.

Fragment uit de klassikale bespreking van de werking van de atmosfeer. *Les 3: 34'*

Leerlingen 4, 5 en 7 verklaren de opwarmende werking van de atmosfeer nu uit verbeterde absorptie van de zonne-instraling door herhaaldelijke reflectie. De verklaring is een vooruitgang ten opzichte van eerdere verklaringen, omdat ze

verwijst naar een fysisch mechanisme. Het voorgestelde mechanisme wordt niet geëvalueerd; dan had kunnen blijken dat zelfs bij volledige absorptie de hoeveelheid zonne-instraling nog altijd kleiner is dan de uitstraling van het aardoppervlak bij de huidige globaal-gemiddelde temperatuur, zoals leerling 5 al had opgemerkt bij de evaluatie van het 1-laagsmodel.

De analyse en de verklaring voor de opwarmende werking van de atmosfeer worden pas naar een hoger plan getild als de docent specifiek emissie door de atmosfeer thematiseert, door eerst te vragen waar in de modeltekening absorptie door de atmosfeer optreedt en vervolgens naar het gevolg voor de temperatuur van de atmosfeer. De leerlingen antwoorden dat de atmosfeer zal gaan uitstralen en dat de uitstraling ook richting de aarde gaat. Aan de bordtekening wordt daarom ook een emissiepijl naar beneden toegevoegd. De relevante energiestromen zijn nu dus geïdentificeerd. Ook in het klassengesprek zijn de eerste leerlingreacties dat de temperatuur van de atmosfeer hoger moet zijn dan die van de aarde om een opwarmende werking te kunnen hebben. Het is voor sommige leerlingen moeilijk te begrijpen dat de koude atmosfeer warmte uitstraalt naar de aarde.

1. **D:** elk voorwerp dat warmer is dan 0 Kelvin..
2. **ll4:** straalt uit.
3. **D:** straalt uit.
4. **ll5:** dat is waar.
5. **ll7:** dat is waar, waarom zeg je dat dan niet.
6. **D:** ik begrijp het. Dus ik denk dat als de atmosfeer warmer is dan drie Kelvin, dat is het buiten, 2,6 of zo..
7. **ll3:** maar die stralen van drie Kelvin koelen toch nog steeds de aarde af?
8. **D:** nee.
9. **ll7:** het zijn geen stralen van drie Kelvin.

Om het idee 'energie van een koud lichaam' te verhelderen gebruikt de docent een metafoer. Temperatuurafhankelijke uitstraling interfereert echter met het intuïtieve idee van warmtetransport door geleiding.

1. **D:** kijk, als jij heel rijk bent en je gaat naar een heel arm land en je houdt gewoon je hand op en je gaat bedelen en je krijgt iets van een heel arm iemand, dan wordt je toch nog rijker.
2. **lln:** haha.
3. **ll3:** maar als je het warm hebt en je gaat onder een koude douche staan dan kan het water wel warmer zijn dan [de omgeving maar je zult wel afkoelen.]
4. **ll1:** dat is geen straling.
5. **lln:** [...]
6. **D:** nee, dan moet je naast de straal gaan staan..
7. **ll5:** en dan wordt je wel warm?
8. **D:** ja, dan wordt je wel warm. Als je geleiding en stroming uitschakelt, dan komt daar.. nee.
9. **ll1:** je straalt nog steeds meer uit dan je terugkrijgt.

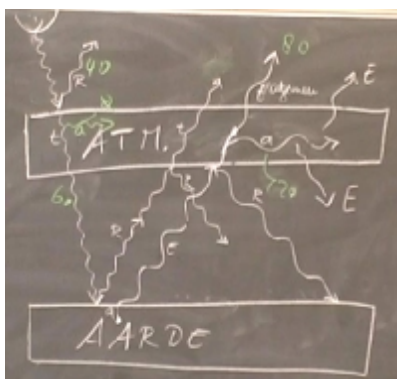
10. **D:** je impliceert dat het koude water koeler is dan de lucht in de badkamer. Maar als jij hierbuiten in het vacuüm staat, dan is het daar twee graden Kelvin, en je staat naast een douche van een graad Celsius.
11. **Il3:** dan wordt je niet warmer.
12. **D:** jawel. Want die warme douche straalt toch weer uit volgens die wet van Stefan-Boltzmann. Dat komt op jou en jij voelt en denkt ha lekker. Je kunt beter onder die koude waterstraal gaan staan dan gewoon in het helemaal niets. Ja?

Fragment uit de klassikale bespreking van warmtestraling door een koud lichaam. *Les 3: 36'*

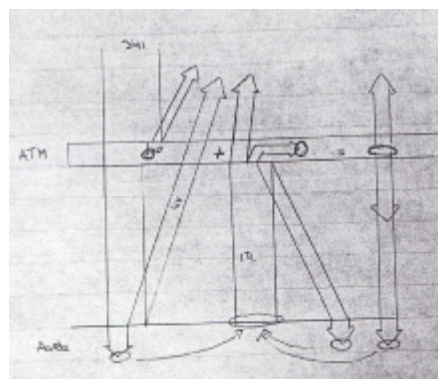
De docent probeert de vergelijking te verschuiven naar “staan naast een koude douche” versus “staan naast vacuüm van 2 K”. De discussie blijft daarmee op fenomenologisch niveau. Alleen leerling 1 verwijst in haar tegenwerping in regel 18 naar de samenstellende energiestromen: “je straalt nog altijd meer uit dan je terugkrijgt”. Gegeven deze opmerking zou het niet al te moeilijk moeten zijn om een analyse te maken van het opwarmend effect van de atmosfeer, door de situatie met en zonder atmosfeer te vergelijken in termen van energiestromen. Dit gebeurt echter niet. Voor de docent is de verklaring met het voorbeeld van de douche afgedaan; hij gaat door met het opstellen van de twee balansvergelijkingen.

Zowel de modeltekening als later de modelvergelijkingen stemmen op dit moment nog niet overeen met wat er in het ontwerp bedoeld was en vervullen dus ook niet volledig hun beoogde functie. Op verzoek van de onderzoeker komt de docent op beide terug aan het begin van les 4. De tekening wordt dan alsnog op de bedoelde manier op het bord gezet (zie Figuur 24). Uit de reacties van leerlingen is op te maken dat de gehanteerde conventies begrijpelijk zijn.

Figuur 23. Resulterende modelschets in les 3 voor de aarde met atmosfeer. R , t , a en E zijn de labels voor de processen reflectie, transmissie, absorptie en emissie. De getallen in de tekening zijn geschatte coëfficiënten voor deze processen.



Figuur 24. Modelschets van Il4 o.b.v. de bordtekening in les 4. De labels UV en IR verwijzen naar ultraviolette en infrarode straling. De omcirkelde start- en eindpunten van pijlen duiden aan hoe de grootte van stroompijlen aan elkaar gerelateerd zijn.



1. **D:** wat is het verschil? Tussen de plaatjes die jullie hebben gemaakt [*zoals in Figuur 21*] en dit plaatje?
2. **II7:** iets met kleur.
3. **II5:** daar is iets met breedte, ook.
4. **D:** iets met breedte. Hoe dikker de pijl, hoe groter de...?
5. **II7:** inval, of eh.. straling? Energiehoeveelheid?
6. **II5:** aantal? Hoeveelheid?
7. **D:** hoeveelheid van wat?
8. **II1:** zonne-energie.
9. **D:** zonne-energie, ja. Dit zijn plaatjes met alleen maar energie, en niet meer van die golflijntjes. Ja?

Fragment uit de bespreking van twee modeldiagrammen. *Les 4: 5'*

Bij het maken van de tekening verwijzen de leerlingen een aantal keer naar de breedte van pijlen ten opzichte van andere pijlen in de figuur (breder, smaller, of van gelijke breedte). Volgens de leerlingen maakt het niet uit dat de aarde als balk wordt getekend, omdat een vierkante meter oppervlak enerzijds een handige maat is en anderzijds het hier een gemiddeld stukje aardoppervlak betreft. Dit zijn redenen in overeenstemming met het ontwerp.

De interpretatie van de herziene modelschets lijkt geen problemen te geven, maar de zin ervan blijft onduidelijk.

1. **II9:** hadden we hier niet al eens een tekening een keer eerder van gemaakt?
2. **D:** hij heeft hem door.
3. **II9:** waarom maken we dan nog een keer deze tekening?
4. **D:** omdat dit de overstap is naar het computermodel. Dat je niet meer denkt aan die golven. Ik ben toch stiekem weer een beetje.. maar.. Nu denk je alleen nog maar in hoeveel energie komt er in. Gaat er doorheen. En wordt teruggeketst.

Fragment uit de bespreking over de herziene weergave van het 2-laagsmodel. *Les 4: 18'*

De docent benadrukt wat er weggelaten wordt en niet wat het voordeel is van deze weergave. Leerling 9 ziet de winst niet.

Er wordt niet geïnventariseerd welke waarden en formules nodig zijn om het model te kunnen doorrekenen. De docent neemt met de leerlingen de tekst met achtergrondinformatie door. Het schatten van de benodigde parameterwaarden gebeurt op initiatief van de docent op de momenten dat er op basis van de tekst een parameter geschat kan worden. Het schatten van de parameterwaarden levert geen onder- en bovengrenzen op, maar alleen puntschattingen. Deze waarden worden zonder nadere evaluatie in de bordtekening genoteerd, zie Figuur 23. De schattingen vallen voor de totale reflectie veel hoger uit dan bedoeld (dit wordt in les 4 bijgesteld) en voor de absorptie van warmtestraling door de atmosfeer veel lager.

De formules voor de uitstraling worden opgesteld bij het construeren van de twee balansvergelijkingen. De uitdrukking voor de uitstraling van de aarde neemt de docent

over uit het 1-laagsmodel, maar hij breidt deze uit met een nog onbekende constante epsilon. Voor de aardlaag is de uitstralingsformule gelijk aan die in het 1-laagsmodel. De atmosfeer heeft een dubbel zo groot uitstralingsoppervlak (zowel naar boven als naar beneden), maar straalt bij een gegeven temperatuur per vierkante meter minder warmte uit; hiervoor wordt een correctieterm 'epsilon' geïntroduceerd.

1. **D:** A [*de oppervlakte*] is 1. Er zit hier ook nog een epsilon in. Die zijn allebei 1.
2. **II10:** die hadden we al uitgerekend.
3. **I15:** wat is er nou weer met epsilon?
4. **D:** maakt niet uit. Als epsilon 1 is, wat kan jou het schelen.
5. **I17:** hou je muil, het is pauze.
6. **II10:** die hadden we al uitgerekend, dus dat was 390,1.

De docent poneert de parameter ad hoc. Voor de uitstraling van de atmosfeer krijgt ϵ vervolgens wel betekenis.

7. **D:** sigma, epsilon, A, A is 1, T tot de vierde. Sigma is sigma. Epsilon is.. dat weten we. Epsilon is.. sst. Wat zou epsilon zijn?
8. **I17:** even kijken. Je hebt een constante waarvan je niet weet wat die precies is dus dat is handig. Die sigma. Dus epsilon zal ook wel een waarde zijn waarvan je niet precies weet wat die is.
9. **D:** we weten niet precies wat die is, maar.. nee, wat is de functie van..
10. **II10:** vasthouding of zo. Van de..
11. **D:** laten we dat maar..
12. **I17:** dat ligt natuurlijk aan het materiaal. Een materiaaleigenschap.
13. **D:** zeg ik het goed?
14. **IIn:** absorptiecoëfficiënt.
15. **D:** als. Als. Als het materiaal in de atmosfeer veel warmte absorbeert, gaat het even later ook veel uitstralen. Absorbeert het weinig, zal het niet veel uitstralen.

Fragment met betrekking tot de introductie van epsilon. *Les 3: 48'*

In hoeverre de atmosfeer een perfecte straler is, wordt in het midden gelaten.

In de twee vergelijkingen die de docent opstelt, is de totale hoeveelheid zonneinstraling voor elke laag gelijk aan de som van de vier typen vermogensstromen, zodat de vergelijkingen als volgt op het bord komen te staan:

$$\begin{aligned} \text{atm: } 341 &= P_{t[60\%]} + P_{r[40\%]} + P_{a[0\%]} + P_{e[2 \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot A_{1'} \cdot T_{atm}^4]} \\ \text{aarde: } 60\% \cdot 341 &= P_{t[0\%]} + P_{r[\alpha \cdot 20\% - 60\%]} + P_a + P_{e[\sigma \cdot \epsilon_{1'} \cdot A_{1'} \cdot T_{aarde}^4]} \end{aligned}$$

De docent noteerde bij de vergelijkingen ook de coëfficiënt (het percentage) of de formule; in bovenstaande vergelijkingen zijn deze tussen [...] opgenomen. Er wordt niet goed boek gehouden van in- en uitgaande energiestromen. Ook de energiestromen van de twee lagen worden niet expliciet gekoppeld.

Samen met de situatietekening worden de balansvergelijkingen aan het begin van les 4 nogmaals opgesteld, nu correct. De docent en de leerlingen gebruiken de

getekende energiestromen in de bordtekening om naar te verwijzen als ze de vergelijkingen opstellen.

1. **D:** P-in is P-uit voor de atmosfeer. [115]. Wat is P in? Kijk naar dit.. het gaat over deze, he? 2-laagsmodel.
2. [...]
3. Wat komt er dan in?
4. **Il1n:** 341, toch?
5. **D:** waardoor wordt de atmosfeer opgewarmd?
6. **Il17:** door die transmissie en de..
7. **Il2:** door de aarde..?
8. **D:** puntje puntje van de aarde. Uitstraling vanuit de aarde. P uit.
9. **Il5:** reflectie. Reflectie gaat er meteen door heen.
10. **D:** dit. Waardoor wordt de atmosfeer opgewarmd? Door de uitstraling van de aarde en dat is dus het vermogen dat de aarde uitstraalt maal epsilon. En epsilon was..? absorptie. Ja?
11. [...]
12. Aarde. En dan mogen jullie aan het werk. In is uit.
13. **Il10:** maar we zijn toch nog niet klaar bij die atmosfeer? Of wel?
14. **D:** ja, ik denk het wel. Dat is gewoon die dingen optellen, die groene. Dat is in. De atmosfeer, dat is deze he? Ho. Deze maal epsilon, wordt die minder. Sorry. En dan kom je op deze uit.
15. **Il10:** en met die eerste pijl dan doe je niets?
16. **D:** nee, want deze was nul. En dat komt er niet in en dat gaat er doorheen.
17. **Il10:** oh, oke.
18. **D:** atmosfeer wordt alleen opgewarmd door dit kleine takje. De aarde. P in.
19. **Il2:** nou.
20. **D:** ik schrijf hem gewoon op. 1 min alfa maal P.. in den beginne wordt de aarde opgewarmd door dat wat de atmosfeer doorlaat. Ja? Transmissie door de atmosfeer. Maal 1 min alfa. Alfa is wat gereflecteerd wordt, zeg maar 30 procent. Dan 70 procent van dat spul komt in de aarde terecht. Plus de helft van wat uitgestraald wordt door de atmosfeer.
21. **Il7:** dat is die pijl die straks terug [...]
22. **D:** ja. En waardoor koelt de aarde af? Sigma maal T tot de vierde.

Fragment waarin de modelvergelijkingen klassikaal opgesteld worden. *Les 4: 27'*

Er wordt gerefereerd aan de energiestromen met verwijzwoorden die op de tekening betrekken hebben (r. 1, 16) om te bepalen welke warmtestromen een opwarmend effect hebben (r. 9, 11, 21) en welke een afkoelend (r. 27), en om te kunnen concluderen of alle relevante stromen in de vergelijking staan (r. 15-20). Het is vooral de docent die naar de tekening verwijst, maar hij maakt zijn verhaal er wel transparant mee: hij verwijst er naar ter ondersteuning van de vergelijkingen die hij

opstelt en beargumenteert tegenover de leerlingen wat hij doet op basis van de getekende energiestromen.

Om de vergelijkingen op te lossen moet de vergelijking voor de ene laag in de andere gesubstitueerd worden. Dit is te moeilijk voor de leerlingen, maar de opgave wordt ook niet duidelijk verwoord.

1. **D:** nu aan jullie de vraag, is lastig hoor. Kun je dit heen en weer poetsen en er dan iets moois van maken? Probeer eens even?
2. **l14:** even heen en weer poetsen.
3. **l17:** je moet substitueren.
4. **D:** schrijf deze apart, deze. Ja, je moet substi-dingesen. Dus die. Druk.. die T atmosfeer zonder die vierde macht, schrijf T atmosfeer is huppeldepup. Ja? En dat ga je dan hier ergens invullen. Doe even. Pak even een blaadje papier, probeer even. Doe maar met potlood, want het zal wel fout gaan. Positieve motivatie. Neem een potlood.
5. [...]
6. **D:** we doen het tegelijk. Ik ga leiden. Schrijf op: T atmosfeer is.

Fragment waarin de docent opdracht geeft tot substitutie. *Les 4: 34'*

In plaats van een richting te wijzen voor het oplossen van de vergelijkingen schrijft de docent de oplossing van de vergelijking voluit op het bord. De leerlingen nemen dit over. De docent volgt de aantekeningen van het lesontwerp. Leerling 7 kan wel benoemen dat er gesubstitueerd moet worden, maar hij weet niet hoe dit moet gebeuren; hij concludeert verderop dat substitueren niet tot een oplossing zal leiden omdat de ene onbekende term in de andere ingevuld moet worden en dit vervolgens eindeloos herhaald.

Op het einde van les 4 staan er twee uitdrukkingen op het bord: één voor de temperatuur van de aarde als functie van de zonne-instraling, het albedo en ϵ , en één voor die van de atmosfeer als functie van de temperatuur van de aarde. In principe zijn ze dus klaar, maar hoewel alle gegevens bekend zijn, blijft de laatste stap, het uitrekenen, achterwege. Ook in les 5 worden deze twee temperaturen niet berekend, maar gaat de docent verder met het gebruik van de computer. De waarden worden pas na enkele lessen gevonden met behulp van een computermodel.

Evaluatie

De eerste analysevraag is of het modelleringsproces voor de leerlingen betekenisvol verloopt.

Er is voor deze cyclus geen expliciete vraagstelling geformuleerd maar de aanleiding voor dit model was wel duidelijk. De leerlingen proberen immers op basis van de eerste bordtekening een (nog onjuiste) verklaring te geven voor een hogere temperatuur aan het aardoppervlak. De leerlingen zijn actief betrokken in de constructie van de modeltekening van de 2-laags aarde. Deze tekening en de daarop gestoelde verklaring ontwikkelen zich in een aantal stappen tot hetgeen in het onderwijsontwerp beoogd is. In de uitvoering ontbreekt echter een duidelijke reden waarom steeds een volgende ontwikkeling nodig is; vanuit leerlingenperspectief lijkt

het conceptueel model steeds af te zijn. De modelspecificatie wordt door de docent gestuurd uitgaande van de achtergrondinformatie in het lesmateriaal. Er ontbreekt een lijn van berekening op basis waarvan duidelijk is welke waarden en relaties bepaald moeten worden. In tweede instantie, als de beoogde modeltekening uiteindelijk op het bord staat, wordt ook het modeldiagram functioneel om de benodigde gegevens te identificeren. Het doorrekenen van de twee gekoppelde vergelijkingen is te moeilijk voor de leerlingen, maar het opstellen ervan lijkt inzichtelijk te zijn nu het modeldiagram ook daarvoor gebruikt wordt. Het lijkt er daarom op dat het nut van de ontwikkeling achteraf duidelijk wordt, maar het modellerenproces verliep weinig doelgericht.

De tweede analysevraag is of er productieve constructieruimte wordt gerealiseerd.

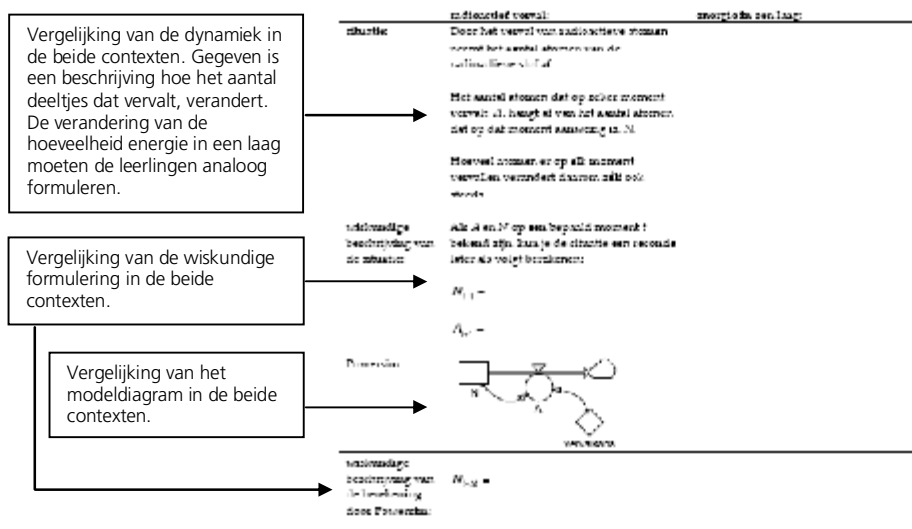
Om meer constructieruimte te realiseren is in het herziene ontwerp het modellerenproces in de klas veel belangrijker geworden; de leerlingen zouden ook zelfstandig delen van het proces moeten uitvoeren (hetzij individueel, hetzij in groepjes). De leerlingen nemen actief deel aan het klassenproces maar dragen geen verantwoordelijkheid voor het verloop omdat hun bijdragen (hetzij met betrekking tot de analyse, hetzij met betrekking tot het kwantificeren van de modelparameters) feitelijk niet beoordeeld worden op hun waarde. Productieve constructieruimte wordt daarmee eigenlijk niet bereikt.

De laatste analysevraag is of in deze cyclus het modellerenproces uit de eerste cyclus als voorbeeld gebruikt wordt voor de modelontwikkeling.

Tijdens de probleemverkenning passen de leerlingen de deelprocessen die in de eerste cyclus zijn geïdentificeerd slechts ten dele toe om de werking van de atmosfeer te beschrijven. Zij vallen snel terug op globale analogieën en verklaringen (warmte vasthouden, warme jas, energie gevangen onder de atmosfeer). De docent is nog onmisbaar om de leerlingbijdragen te fysiciseren, hetgeen erin resulteert dat de analyse en de verklaring herhaaldelijk aangescherpt worden. Een verwijzing naar de eerste cyclus om de werking van de atmosfeer te specificeren ontbreekt echter.

Over het geheel gezien wijkt de sturing door de docent sterk af van wat er beoogd is. Als procesbewaker evalueert hij leerlingbijdragen onvoldoende en verwijst hij ook niet of nauwelijks naar de aanpak en bevindingen van de eerste cyclus. Dit kan er aan hebben bijgedragen dat de docent op een aantal momenten zelf belangrijke inhoudelijke input moest geven omdat deze niet van de leerlingen kwam.

De wijze waarop een modeltekening vorm krijgt, bepaalt voor een belangrijk deel met wat voor soort bijdragen de leerlingen komen. De tekening vervult dus een belangrijke rol in de probleemverkenning. De eerste tekeningen van de leerlingen zijn in lijn met de tekening zoals deze voor het 1-laagsmodel is opgesteld, terwijl de laatste tekening van het 2-laagsmodel de kwalitatieve verklaring voor de opwarmende werking en de modelspecificatie goed ondersteunt. Het lijkt daarom aannemelijk dat, als in de eerste cyclus een adequate modeltekening was gemaakt, ook de analyse in deze cyclus met meer kwaliteit zou zijn uitgevoerd.



Figuur 25. Overzicht van de opgave waarin de vergelijking gemaakt wordt tussen het model voor radioactief verval en de energie in een laag.

4.2.7 Vierde episode: computermodellen voor numeriek modelonderzoek

Om het modelgedrag te onderzoeken worden achtereenvolgens een 1- en 2-laags Powersimmodel gebouwd en getest.

Wijzigingen in het beoogd lesverloop

In het eerste ontwerp werd al vroeg in de lessenserie een computermodel gebouwd. Daarmee werd een evenwichtstemperatuur berekend die de leerlingen ook zonder computer konden vinden. Om het doelgerichte karakter van de modelleeractiviteiten te bevorderen is het bouwen van een computermodel in het herziene ontwerp uitgesteld tot het moment dat daar een echte aanleiding voor is, namelijk als het dynamische gedrag van het model ter discussie gesteld kan worden.

De docent problematiseert het niet-evenwichtsgedrag van het 2-laagsmodel (bijvoorbeeld door te redeneren dat als het aardoppervlak warmer wordt, dit dan meer uitstraalt, waardoor de atmosfeer opwarmt, waardoor de instraling op aarde toeneemt, waardoor het aardoppervlak nog warmer wordt). We verwachten dat de leerlingen kunnen redeneren over relaties in het model maar dat ze daaruit niet eenduidig kunnen besluiten hoe het model zich zal gedragen (bijvoorbeeld evenwicht, oscillatie). Op basis daarvan motiveert de docent het gebruik van de computer die, zoals de leerlingen bij radioactiviteit gezien hebben, de dynamiek van het systeem nauwkeurig kan doorrekenen.

Om gebruik te maken van de inzichten uit de radioactiviteitsmodule, waarin numerieke integratie en Powersim voor het eerst aan bod zijn gekomen, worden de

beide situaties met elkaar vergeleken. Het radioactiviteitsmodel is gegeven en van de leerlingen wordt gevraagd voor ieder element het overeenkomstige element uit het stralingsmodel te benoemen (Figuur 25). Het resultaat hiervan is een schets van een basisstructuur voor het stralingsmodel. Leerlingen bouwen dit modeldiagram zelfstandig uit tot in eerste instantie het 1-laagsmodel. Om het model volledig te specificeren schatten zij een waarde voor de warmtecapaciteit van de aarde. De leerlingen beschikken al over de benodigde gegevens om het model te testen. Vervolgens breiden de leerlingen hun 1-laags model zelfstandig uit tot een 2-laags model. Daartoe schatten zij ook een waarde voor de warmtecapaciteit van de atmosfeer.

Met het model wordt het dynamisch gedrag van de temperatuur onderzocht. Ten slotte kan definitief geconcludeerd worden dat het 2-laagsmodel de huidige temperatuur op aarde voldoende verklaart. De evaluatie gebeurt klassikaal, zodat de docent kan waarborgen dat de conclusies over het model en de richting voor het vervolg voor alle leerlingen duidelijk zijn.

Analysekader

Het onderzoekbaar maken van modelgedrag vormt de aanleiding om een computermodel te construeren van de 2-laagsaarde. Om eerst een 1- en vervolgens een 2-laags Powersimmodel te bouwen en te testen wordt expliciet teruggegrepen op het vervalmodel dat de leerlingen bij de radioactiviteitsmodule hebben gemaakt.

Het beoogd verloop geeft aanleiding tot de volgende analysevragen:

1. Wordt het modelgedrag zodanig geproblematiseerd dat dit een motief geeft om een computermodel te bouwen en het modelgedrag te onderzoeken?
2. Is er sprake van een voor leerlingen betekenisvol proces?
3. Wordt er productieve constructieruimte gerealiseerd?
4. Wordt er voor de ontwikkeling van het 1- en het 2-laags Powersimmodel teruggegrepen op de eerder geconstrueerde Powersimmodellen (eerst dat voor radioactief verval en later ook het 1-laagsmodel)?

Uitvoering

Na een plenaire introductie maken de leerlingen in tweetallen een computermodel. We bespreken het constructieproces van de Powersimmodellen voor de 1- en 2-laagsaarde (lessen 5 en 6 respectievelijk 6 en 8) vooral aan de hand van leerlingen 4 en 5. Het werk van andere leerlingen wordt besproken voor zover dit een beter of ander inzicht geeft in het proces.

Chris maakt de overgang naar computermodelleren voordat het 2-laagsmodel geëvalueerd is op de temperatuurrange die het voorspelt. Het redeneren over de wederzijdse beïnvloeding van de atmosfeerlaag en de aardlaag vormt volgens het lesontwerp een aanleiding voor het computermodelleren. In de uitvoering vraagt de docent eerst aan de leerlingen waarom zij denken dat een computer nodig is.

1. **D:** waarom gaan we dan dadelijk een computer pakken?
2. **II9:** als een constante verandert.
3. **D:** als een constante verandert, ja.

4. **II7:** precies. En als je dat steeds gaat zitten berekenen, dan duurt het best lang. Volgens mij zoiets.
5. **II9:** zelfs een supercomputer doet hier heel lang over.

De computer gebruiken voor veranderende omstandigheden. *Les 5: 4'*

Leerling 7 lijkt te stellen dat gedurende de verandering steeds het resultaat opnieuw berekend moet worden (r. 2, 4). Gegeven de evenwichtsberekening die de leerlingen in de vorige episode handmatig hebben verricht is het een logische gedachte dat je de computer kunt gebruiken om de evenwichtstemperaturen uit te rekenen voor een veranderende parameterwaarde. Even later gebruikt de docent hetzelfde argument voor computergebruik.

1. **D:** kijk, het CO₂-percentage in de atmosfeer was honderd jaar geleden 0,2 procent of zo. Tien jaar later 0,21 procent, 0,22 procent, 0,23. Nou zitten we op 0,3 procent. Of zoiets. Als je die getallen nou allemaal hebt. Zou je het dan leuk vinden om zo'n berekening twintig keer te doen?
2. **II1:** nee.
3. **D:** om nou uit te rekenen hoe warm het zou moeten zijn in 2008, 2009, 2010, 2011?
4. **II1:** nou, nee hoor.
5. **D:** nee. En dat kan die computer natuurlijk veel sneller doen dan jullie zelf. Ja?

De computer gebruiken voor herhaaldelijke berekeningen. *Les 5: 10'*

In deze episode zou het moeten gaan over het niet-evenwichtsgedrag van een model met gelijkblijvende parameterwaarden, maar het gaat hier om de berekening van verschillende evenwichtstemperaturen bij verschillende parameterwaarden. Of een evenwichtssituatie hier gepast is, staat niet ter discussie.

Even later brengt Chris alsnog het modelgedrag voor een niet-evenwichtssituatie ter sprake.

1. **D:** maar je ziet dat de temperatuur van de aarde beïnvloedt de temperatuur van de atmosfeer. He? Beïnvloedt elkaar. Als er nou ergens iets verandert.. [II1], wat is er?
2. **II1:** niets.
3. **D:** oke. Als er ergens wat verandert..
4. **II5:** verandert de temperatuur op aarde..
5. **II2:** heeft dat ook gevolgen voor de atmosfeer.
6. **II9:** niet perse.
7. **D:** en dat beïnvloedt weer de temperatuur van de aarde. Niet perse?
8. **II9:** als er bij de atmosfeer wat verandert, verandert er niets bij de aarde.
9. **D:** jawel. Als de atmosfeer warmer wordt, dan straalt hij meer naar beneden uit en dan wordt de aarde ook warmer. Dat hebben we gezien met al die pijlen. Maar stel dat je begint met een koude bol. En daar schijn je met de zon op, een lamp. Een kleine bol met een atmosfeer. Ja? En de evenwichtstemperatuur nu is tien graden van de aarde, pak em

beet. En van de atmosfeer nul of zo. Hoe gaat die temperatuur naar die tien graden toe van de aarde? Als je een grafiek maakt van de temperatuur van de aarde, van 4,6 miljard jaar geleden tot vandaag. Hoe gaat die naar die tien graden toe? Wat voor grafiek krijg je dan? Hoe heet dat?

10. **Il5:** een wortel?

11. **D:** een wortel blijft stijgen, he? Want de wortel van een heleboel is meer dan van wat minder. Asymptotisch, toch?

Fragment uit het klassengesprek over het systeemgedrag. *Les 5: 7'*

Leerling 9 (r. 6, 8) ziet nog niet in dat een verandering bij de ene laag een gevolg heeft voor de andere. De vraag van de docent leidt dan ook niet tot een gesprek over niet-evenwichtsgedrag. Chris benoemt de relevante beïnvloedingsrelatie vervolgens zelf (r. 9). In dit fragment wisselt Chris binnen één zin tussen een fictieve modelsituatie (begintemperatuur 0 graden) en historische werkelijkheid (de temperatuur 4,6 miljard jaar geleden). Vervolgens vraagt hij naar een globale temperatuurcurve van een koude aarde die opwarmt tot de huidige temperatuur. De globale vorm van de grafiek wordt intuïtief vastgesteld, dus zonder daarbij een beroep te doen op stapsgewijs redeneren.

In het vervolg op bovenstaand fragment doet de docent nog een poging om het modelgedrag te problematiseren.

1. **D:** ja? En stel je hebt een eh.. we weten allemaal dat CO₂ maakt de atmosfeer op een of andere manier wat warmer dus dan wordt de aarde ook wat warmer. Stel, je gooit in een keer een dosis CO₂ in de atmosfeer. Wat gebeurt er dan?
2. **Il4:** dan stijgt die.
3. **D:** dus we hadden dit, en dan? Gaat die zo omhoog?
4. **Il1n:** nee.
5. **D:** oh wacht, voor jullie zo he. Het gaat zo, en gaat die dan dit doen of gaat die..
6. **Il1n:** een klein beetje.
7. **D:** of gaat die zo?
8. **Il1n:** [...]
9. **D:** of zoekt die een nieuwe asymptoot op? Of gaat die schommelen?
10. **Il:** ik denk dat die een nieuwe asymptoot opzoekt.
11. **D:** als er iets verandert, zoekt die dan een nieuwe asymptoot op of gaat die misschien wel dit doen?
12. **Il2:** hij gaat niet dit doen.
13. **D:** dat het warmer wordt en warmer blijft worden.
14. **Il1:** nee.
15. **D:** dat de aarde in de fik vliegt.
16. **Il1:** er komt toch weer een evenwicht?
17. **Il7:** een nieuwe asymptoot.

18. **D:** een nieuwe asymptoot. Maar hoe gaat die naar een nieuwe asymptoot toe? Asymptotisch of schommelend? Snap je wat ik bedoel? Kan die er even doorheen schieten en dat die zichzelf corrigeert.

Fragment uit het klassengesprek over verschillende dynamische patronen. *Les 5: 9'*

De docent oppert verschillende mogelijke patronen voor het gedrag van het systeem, maar de intuïtie van de leerlingen dat er een nieuw evenwicht ontstaat, blijft onaangetast. Dit is niet verwonderlijk, want juist het stapsgewijs redeneren over het modelgedrag had hen gevoelig moeten maken voor de redelijkheid van de alternatieven. Het helpt natuurlijk ook dat de docent in het voorgaande fragment het goede antwoord had gegeven. Het redeneren met kwalitatieve veranderingsregels is in principe wel mogelijk, want in les 4 gebeurde dit nadat de docent vroeg wat er gebeurt als de atmosfeer warmer wordt.

1. **D:** teruggekaatst van de atmosfeer. En dat zat er niet in. Er zat een verband tussen die twee. De een beïnvloedt de ander. En als de atmosfeer warmer wordt, dan..?
2. **II9:** wordt de aarde ook warmer.
3. **D:** en dan gaat de atmosfeer meer uitstralen.
4. **II7:** krijgt de aarde meer straling.
5. **D:** naar boven en naar beneden.
6. **II5:** en dan warmt de aarde.
7. **D:** en dan wordt de aarde warmer. Ja?

Fragment waarin veranderingsregels worden toegepast. *Les 4: 8'*

Hoewel de redenering in die les niet verder voortgezet werd en de mogelijkheid van een steeds sterkere opwarming dus ook niet aan de orde kwam, lijkt dat op basis van een dergelijk fragment nog steeds een realistische mogelijkheid.

Als uitgangspunt voor de computermodelleeractiviteiten van de leerlingen zou het radioactiviteitsmodel gebruikt moeten worden. Een huiswerkopgave was om de vertaalslag te maken tussen elementen uit beide modellen (zie Figuur 25). Geen van de leerlingen heeft echter de opgave in het werkboek gemaakt. In de klassikale bespreking noemt leerling 7 als overeenkomst dat in beide gevallen het proces “vanaf heel lang geleden” gevolgd wordt. Als de docent doorvraagt, kan de leerling ook benoemen dat de afname minder werd.

1. **D:** ja, maar wat was.. kun je uitleggen hoe dat zat met die radioactiviteit? Je had een doosje, en daar zit wat radioactief materiaal in, en dan?
2. **II7:** dan ging die afbreken. Afhankelijk van de afbraak ging die weer anders afbreken.
3. **D:** ja. Kun je het nog simpeler uitleggen. Je hebt iets, je hebt honderd. Dan verdwijnt er per jaar..
4. **II7:** het werd, het werd steeds minder, en hoe minder het werd, hoe minder..
5. **D:** hoe minder ook de afname wordt

6. **II7:** hoe minder het minder werd.
7. **D:** in absolute zin dan, he.

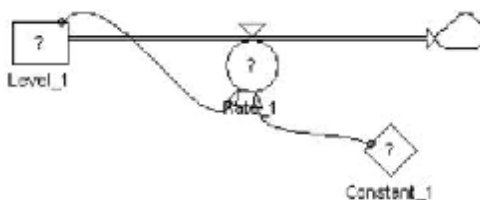
Fragment uit het klassengesprek over de afname van de radioactiviteit. *Les 5: 11'*

De procesbeschrijving van radioactief verval is door leerling 7 voldoende gespecificeerd om vast te stellen dat de opwarming van een aardlaag op vergelijkbare wijze doorgerekend kan worden; dit gebeurt echter niet. Chris besteedt voornamelijk aandacht aan de algemene betekenis van de Powersim-symbolen: het blokje is een voorraad, het rondje is een formule en een ruitje is een constante – de stroompijl zelf blijft buiten beschouwing – maar er wordt niet benoemd wat elk voorstelt in de huidige situatie. Geheel analoog hebben alle leerlingen in het ingenomen lesmateriaal deze begrippen in hun werkboek bij het afgedrukte Powersimplaatje vermeld, maar geen van hen heeft de overige gevraagde gegevens in de vergelijkende opgave benoemd.

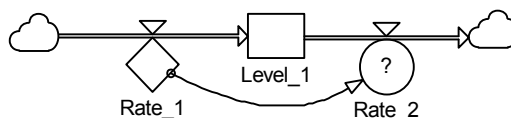
Een waarde voor de warmtecapaciteit van de aardlaag wordt onder leiding van de docent geschat. In de bijlage bij het lesmateriaal stond opgenomen dat hiervoor samenstelling (soortelijke warmte, dichtheid) en volume (dikte) van de aardlaag benaderd moeten worden. De leerlingen doen een gooi naar een diepte van de aardlaag waarop de invloed van de zon nog merkbaar zou zijn, maar de docent evalueert deze niet en vraagt ook niet naar een onder- of bovengrens. De gebruikte waarde (50 cm) is dus niet onderbouwd. Voor de samenstelling van de aarde wordt, net als eerder bij de albedoschatting, uitgegaan van 2/3 water en 1/3 land.

Constructie en doorrekenen van het 1-laags Powersimmodel – leerlingen 4 en 5

In de laatste 15 minuten van les 5 beginnen de leerlingen met de bouw van het 1-laags stralingsmodel op de computer. Bij de modelschets blijken de leerlingen nog problemen te hebben met de syntax van de modelleertaal, bovendien is de analogie tussen uitstraling en radioactief verval nog problematisch. Leerlingen 4 en 5 nemen om te beginnen de modelstructuur voor radioactief verval over uit het lesmateriaal (geen formules; zie Figuur 26). De leerlingen proberen de grootheden in het stralingsmodel te benoemen naar analogie met het radioactiviteitsmodel. In de plenaire voorbespreking van het computermodelleeren had de docent al duidelijk gemaakt dat de voorraad-grootheid 'energie' moet zijn. Leerling 4 vraagt zich af of de energie nu ook moet vervallen.



Figuur 26. Modeldiagram voor verval.



Figuur 27. De leerlingen definiëren de uitstroom even groot als de instroom.

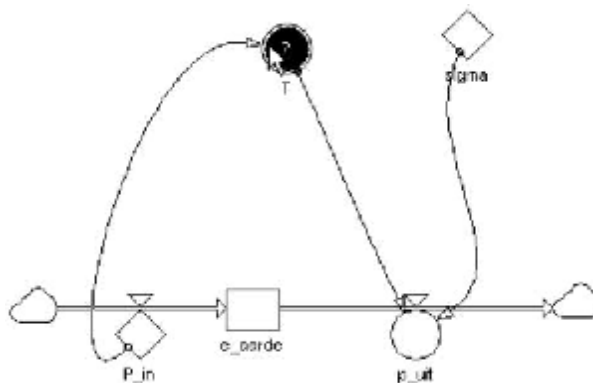
Het is leerling 4 dus nog niet duidelijk in welk opzicht het radioactief verval vergelijkbaar is met de energiebalans van de aarde.

Om de uitstroom te definiëren stellen ze dat de instroom gelijk moet zijn aan de uitstroom, en geven dit weer als in Figuur 27. Ze leggen dus de evenwichtsconditie op aan het systeem, in plaats van het computermodel te gebruiken om te laten zien dat er evenwicht zal ontstaan. Hier eindigt de les, waardoor het niet duidelijk is of de leerlingen deze fout zelf opmerken. De laatste toevoeging is waar-schijnlijk niet opgeslagen, want in de volgen-de les gaan de leerlingen verder met het model zoals weergegeven in Figuur 28. De zonne-instraling, een constante waarde van 341, legt hier de (constante!) instroom vast. De basisstructuur voor het model is hiermee gerealiseerd.

Het koppel krijgt hulp van leerling 11, die haar model al af heeft. Op haar aanwijzingen worden de objecten gelabeld. Ook geeft ze de, onjuiste, aanwijzing dat P_{uit} zowel reflectie als straling is dus dat ze vast twee rondjes (variabelen) moeten neerzetten. Later wijst de onderzoeker er op dat de reflectie niet als 'uitstroom' gerekend hoeft te worden, omdat het gereflecteerde deel niet eerst de laag ingaat. Om de uitstraling te specificeren vraagt leerling 4 aan de onderzoeker of de uitstraling "deze formule [is], die sigma maal T tot de vierde". Hij vraagt zich af hoe dit ingevuld moet worden. De onderzoeker legt uit dat de grootheid ' P_{uit} ' door middel van een relatiepijl afhankelijk gemaakt moet worden van een grootheid 'temperatuur'. De leerlingen voegen een grootheid 'temperatuur' in en maken deze afhankelijk van de instraling (Figuur 29). Als definitie gebruiken ze ' $P_{in} \times 30e6$ ' (30e6 is de plenair geschatte waarde voor de warmtecapaciteit). Met deze (onjuiste) definitie zijn alle modelvariabelen gespecificeerd. Het model wordt vervolgens gerund op verzoek van leerling



Figuur 28. Basisstructuur 1-laagsmodel.



Figuur 29. De temperatuur als functie van de energie-instroom.

5: "nou, laat hem eens lopen". Het resultaat is weergegeven in Figuur 30.

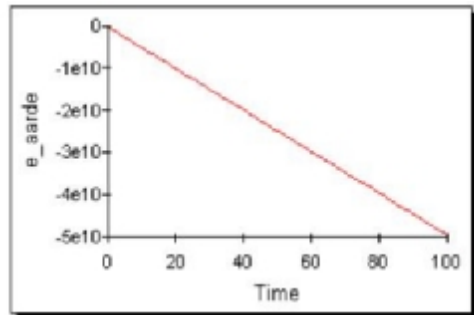
Er zijn geen verwachtingen benoemd, maar niettemin lijkt leerling 4 teleurgesteld dat de energie afneemt. Het (negatieve) bereik van de y-as wordt niet opgemerkt. Desgevraagd beargumenteert leerling 5, in overeenstemming met het getekende model, dat de temperatuur afhankelijk is van wat er binnenkomt. Hij relateert de temperatuur dus niet aan de energievoorraad.

De docent die langs-komt geeft aanwijzingen voor verbetering.

1. **D:** die gaat weg. En dit moet een rondje wezen. Hoe kun je daar nou zo'n ding [ruit: constante] maken, dit moet een rondje zijn.
2. **II4:** die is die 341.
3. **D:** ja, dat is niet constant.. oke oke, je mag 341, maar dan moet je wel keer 0,3 doen.
4. **II5:** maal 0,3?
5. **D:** maal albedo. Oke. Dit is de temperatuur.
6. **II4:** maar die weten we dus niet.
7. **D:** nee, maar die haal je hier uit.
8. **II5:** die moet dus hieraan gelinkt worden [voorraad].
9. **D:** dit is de formule he: $Q = m c \Delta t$. Dit is gewoon hoe warm die wordt. Dat wordt een rondje, dat is die. Dit wordt een voorraad, dat is die.
10. **IIIn:** ja.
11. **D:** dit is, m maal c, is de warmtecapaciteit van de aarde. Dat is een constante. Want als je dan Q deelt door de warmtecapaciteit dan heb je T.
12. **II5:** dus dan moeten we de E van de aarde..
13. **II4:** dus de E van de aarde moeten we delen door..
14. **D:** delen door de warmtecapaciteit. Dat is dit getal.

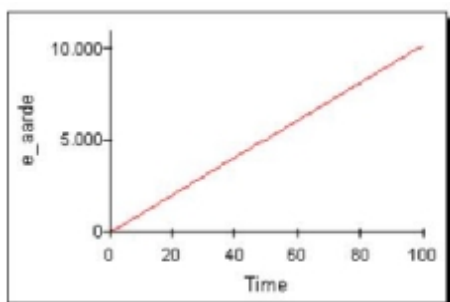
Fragment uit een bespreking van het modeldiagram. Les 6: 21'

De hulp van de docent bestaat uit handelingsaanwijzingen, een onjuiste formule voor de reflectie (albedo) en een relatie tussen warmte en temperatuur. De leerlingen vertalen deze formule naar de relevante grootheden in hun model, ze

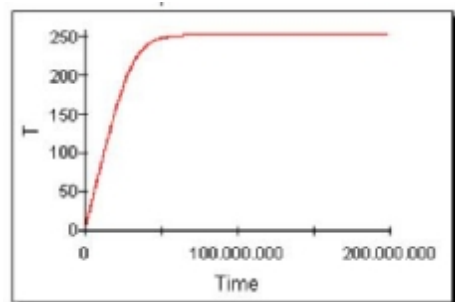


Figuur 30. Run van het model uit Figuur 29, met $T = P_{in} \times C$.

Figuur 31. Modelrun waarin de temperatuur afhankelijk is van de energievoorraad.



Figuur 32. Ontstaan van evenwicht.



passen hun model aan volgens de aanwijzingen van de docent en runnen het model opnieuw (Figuur 31). De verwachting van een stijgende lijn komt dit keer wel uit: “hé, dan gaat die in ieder geval wel weer omhoog.” De eindtijd en de tijdstap worden aangepast totdat het model een evenwicht oplevert (Figuur 32).

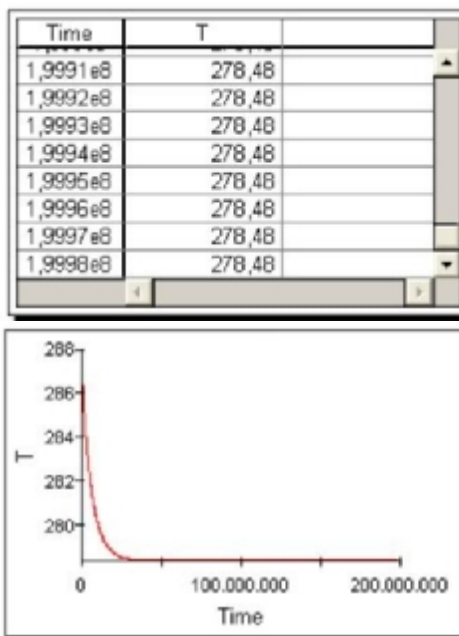
Leerling 11 merkt op dat zij een hogere evenwichtstemperatuur gevonden had. Naar aanleiding daarvan nemen leerling 4 en 5 de albedowaarde uit het model van leerling 11 over: 0,45 in plaats van 0,3. Doordat de instroom foutief gedefinieerd is als zoninstraling maal reflectie levert dit inderdaad een hogere evenwichtstemperatuur. Het koppel toont de resultaten aan de onderzoeker. De onderzoeker wijst er op dat de instroom verkeerd gedefinieerd is. Op verzoek van de onderzoeker definiëren de leerlingen een aparte constante ‘albedo’, waarmee ze vervolgens de instroom correct vastleggen. Daarmee zijn de leerlingen halverwege les 6 zover dat ze met hun 1-laagsmodel de beoogde uitkomsten vinden. De onderzoeker bevestigt dat het model correct is. De uitkomst wordt niet vergeleken met het eerder berekende evenwicht.

Naar aanleiding van het 1-laagsmodel vraagt de onderzoeker wat er gebeurt als de begintemperatuur hoger is dan de zojuist gevonden evenwichtswaarde. De leerlingen verwachten dan een verdere stijging.

1. **O:** Dus hij begint op 288, en hoe gaat je model dan verder?
2. **II4:** die zal dan nog verder gaan stijgen.
3. **O:** ja? Naar welke temperatuur? Kun je dat van tevoren bedenken?
Stapje terug: wat gaat er gebeuren waardoor die stijgt?
4. **II4:** door de energie die erin komt.
5. **II5:** en door de energie die die uitstraalt.
6. **O:** oke. Laten we eens kijken.

Als ze vervolgens in de modelrun (Figuur 33) zien dat de temperatuur juist daalt tot dezelfde evenwichtstemperatuur als in de vorige run relateren ze de daling correct aan een netto uitstroom.

7. **II4:** hij daalt een klein beetje.
8. **O:** en waar komt die op uit?
Op 278. Waarom stijgt die nou niet? Of beter nog: waarom daalt die nou?
9. **II5:** omdat die in feite meer uit staat te stralen..
10. **II4:** ..dan er inkomt.
11. **O:** precies. Hoe komt die nou bij die temperatuur?
12. **II4:** maximale wat hij kan halen door instraling.



Figuur 33. Modelrun met $T_0=288\text{K}$.

13. **II5:** dat heeft dus met die warmtecapaciteit te maken?
14. **O:** want als die temperatuur hoger is, dan wordt die uitstraling groter maar die instraling kan niet groter worden. Dus hij koelt.
15. **II4:** hij koelt gewoon weer af.

Voorspelling en verklaring van het modelgedrag bij een hoge starttemperatuur. *Les 6: 31'*

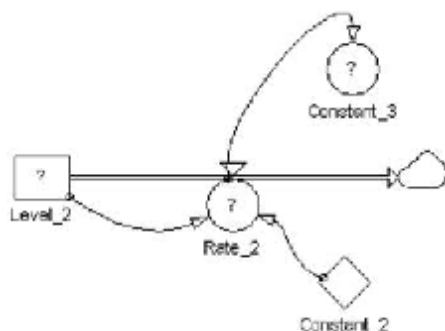
Constructie van het 1-laags Powersimmodel – leerlingen 1 en 2

Ook het modellerenproces van leerlingen 1 en 2 begint met het vervalmodel. Leerlingen 1 en 2 hebben moeite om van hier uit de basismodelstructuur voor het 1-laagsmodel te schetsen: net als leerlingen 4 en 5 zien ze niet onmiddellijk dat de uitstroompijl in dit geval de uitstraling voorstelt. De docent geeft een aantal globale vormaanwijzingen.

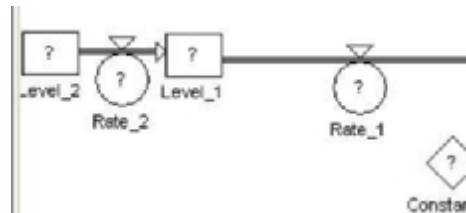
1. **D:** weet je niet wat je moet doen?
2. **II2:** nee, ik snap dat hele programma niet.
3. **D:** hierin [*de getekende voorraadgrootte: level_2 in Figuur 34*] moet zitten, de energie die in de aarde zit. De voorraad. Op basis daarvan kun je de temperatuur uitrekenen.
4. **II2:** ja, uiteindelijk wel ja.
5. **D:** dit is wat er dan bijkomt of afgaat. Een of ander formulekje.
6. **II2:** ja.
7. **D:** en alle constanten moeten erin zitten.
8. **II2:** ja, die eh.. dinges.
9. **D:** dus 341 moet ergens zitten. Die alfa, dat er zoveel procent gerefecteerd wordt.
10. **II2:** die albedo.
11. **D:** ja? En als je weet hoeveel joule er in de aarde zit en je weet dan de warmtecapaciteit..
12. **II2:** dan kun je de temperatuur uitrekenen.

Fragment over de globale modelstructuur. *Les 5: 37'*

Figuur 34. Uitstroom voorgesteld door de relatiepijl naar constant_3.



Figuur 35. Constructie van een instroompijl vanuit een tweede voorraad.



De leerlingen wagen een poging en in de structuur van het vervalmodel krijgt de uitstroompijl de betekenis van ‘instraling’. Als uitstraling wordt een extra variabele toegevoegd (*Constant_3* in Figuur 34), zonder dat deze invloed heeft op de energievoorraad.

In les 6 beginnen de leerlingen opnieuw met het tekenen van een voorraad met een uitstroom. Als de docent langskomt en naar de betekenis van het diagram vraagt, identificeert leerling 2 deze nu wel als voorraad energie en uitstraling. De docent merkt op dat in het model een instroompijl ontbreekt. Leerling 1 tekent deze vanuit een tweede voorraadgrootheid (Figuur 35). In onderstaand fragment vraagt de docent de leerlingen te benoemen wat er nu uitgedrukt staat.

1. **D:** zeg nog eens even wat wat is?
2. **l12:** nou, dat was de hoeveelheid energie van de aarde [*level_1*].
3. **D:** die er in zit.
4. **l12:** ja, die er inzit. Dit [*rate_1*] is wat er uitgaat, zeg maar.
5. **D:** ja.
6. **l12:** dat is wat er van de atmosfeer naar de aarde instroomt [*rate_2*].
7. **D:** nee, atmosfeer mag nog niet.
8. **l12:** o nee.
9. **D:** de zon.
10. **l12:** de zon, dan.
11. **D:** wat waren die rondjes?
12. **l12:** ja, de hoeveelheid dat die uitstraalt of zo.

Fragment waarin leerlingen hun modeldiagram uitleggen. *Les 6: 4'*

Leerling 2 geeft een consistente interpretatie van het getekende diagram. Met het idee dat de instroom voor de aarde vanuit de atmosfeer komt, volgt hij de lijn die ook in de klas is gevolgd. Als de docent dat voorstel verwerpt, geeft de leerling een nieuwe betekenis aan die voorraadgrootheid, namelijk ‘de energie van de zon’, hetgeen ook verdedigbaar is. De docent laat de extra voorraadgrootheid echter verwijderen zonder navolgbare argumentatie.

Net als bij leerlingen 4 en 5 verwijst de docent in zijn verdere uitleg vooral naar de vorm van de symbolen. Op basis van de regel dat bij een rondje een formule ingevoerd moet worden, gaat de docent met leerling 2 na dat er twee formules ingevoerd moeten worden (bij de instraling en bij de uitstraling) en welke dit moeten zijn. De docent wijst erop dat de zoninstraling en het albedo constanten zijn, waarvoor dus twee ruitjes geplaatst moeten worden. Evenzo wordt aan de hand van de formule voor de uitstraling de benodigde modelelementen vastgesteld. De leerlingen werken vervolgens zelfstandig verder.

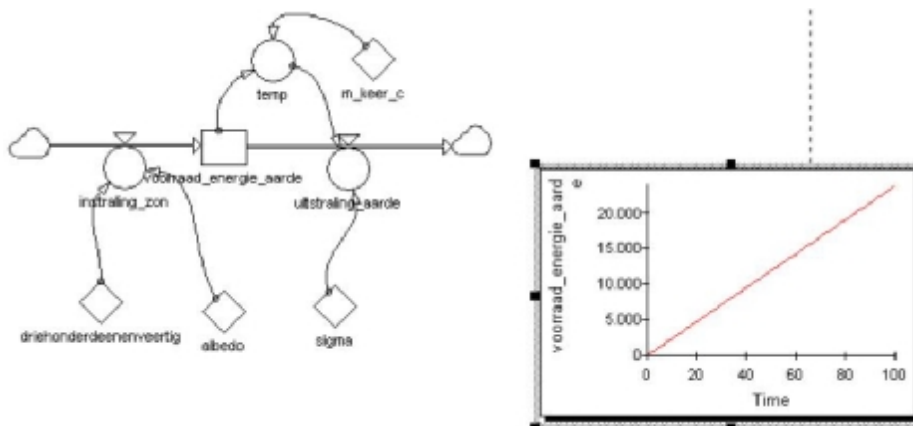
De temperatuur geeft de leerlingen problemen. Ze zoeken een passende formule om deze te definiëren. De enige formule die ze kunnen vinden, is de uitdrukking voor de evenwichtstemperatuur. Ze betwijfelen of ze deze hier moeten gebruiken, en daarom werken ze eerst verder aan het deel van het model dat al getekend is. Tien minuten later zijn ze weer toe aan de temperatuur. Al puzzelend vinden ze nu wel de juiste formule.

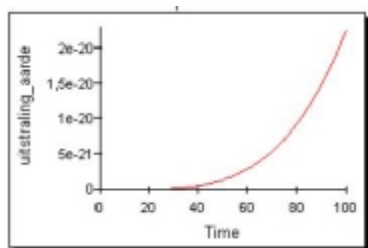
1. **II2:** maar hoe kom je van energie naar temperatuur? We kunnen $Q = m c \Delta T$ doen.
2. **II1:** nee [ik weet het niet].
3. **II2:** dat lijkt me zo raar, eigenlijk.
4. **II1:** jawel.
5. **II2:** maar het is op zich wel logisch. Want Q is energie, en m maal c nou ja die weet je. Wacht even, we kunnen hieruit [klikt level_1] hieruit kunnen we nog een formule van maken, he?
6. **II1:** nou, dat is gewoon een voorraad.
7. **II2:** dit is een voorraad energie. Hoe maken we hiervan nou de temperatuur?
8. **II1:** volgens mij is dit deze.
9. **II2:** ja, dat is hoe warm die nu is, zeg maar. [E_0 bij 288 K?] Dat is de.. ja, dat is de oppervlakte.. maal tien.. dit was de m maal c van de m maal c maal ΔT – formule. Dus je moet hier een voorraad. En hier moet je..
10. **D:** ik was net hier. Zijn jullie klaar?
11. **II2:** nee. Want we zitten nog even te bedenken hoe je van dit voorraadjie energie die je hier hebt..
12. **D:** naar de temperatuur?
13. **II2:** naar de temperatuur..
14. **D:** $Q = m c \Delta T$.
15. **II2:** toch gewoon, zeg maar.
16. [...]
17. **D:** dan moet je hier een rondje maken, en een ruitje.

Fragment uit het leerlinggesprek over de benodigde temperatuurdefinitie. Les 6: 16'

Leerling 2 komt op het idee dat het verband tussen energie en temperatuur in Powersim weergegeven kan worden door een nieuwe formule in te voeren in Powersim. De docent geeft weer een handelingsvoorschrift, zonder in te gaan op wat de leerlin-

Figuur 36. Eerste modelrun van leerlingen 1 en 2 met correct computermodel.





Figuur 37. Grafiek van de uitstraling.

gen al hebben uitgevonden. De docent loopt vervolgens verder, de leerlingen voltooien hun model en laten het doorrekenen (Figuur 36). Doordat het model alleen de eerste 100 seconden doorrekent, toont de grafiek alleen een lineair stijgend verband. De leerlingen vinden dat ze niets aan deze grafiek hebben omdat deze “alleen tot hier” loopt.

Het koppel maakt een tweede grafiek, nu van de uitstraling, en runt het model nogmaals (Figuur 37). Leerling 2 interpreteert de modeluitkomsten.

1. **II2:** ja, dit is T tot de vierde. Dit is gewoon wat die telkens uitstraalt. Hoe warmer de aarde wordt, hoe meer die uitstraalt. Dat geeft die nu gewoon weer. Hij geeft niet aan wat er daar gewoon komt [*beweegt met de muis over de wolk achter de uitstroompijl*].
2. **II1:** kan je dat niet slepen?
3. **II2:** nee, dat kan je niet slepen want je hebt dit [*klikt stroompijl*] en dan kan je dit niet.. dat lukt niet.
4. **II1:** met dat pijltje dan?
5. **II2:** ook niet. Maar ik snap nu dit wel, hoe het programmaatje werkt. Dat is wel fijn.
6. **II1:** ja.

Fragment over de modeluitkomst. Les 6: 28'

De modelexploratie verloopt dus niet erg doelgericht of inzichtelijk, maar leerling 2 geeft wel een correcte interpretatie van de grafiek.

Op aanwijzing van de docent maken de leerlingen vervolgens een grafiek van de temperatuur. Dit levert een vergelijkbare grafiek op als die van de energievoorraad. De docent laat hen vervolgens de benodigde looptijd schatten.

1. **D:** nou, heb je enig idee hoe lang het duurt voordat de aarde op temperatuur is als je uit.. dit is een koude aarde, he?
2. **II1, 2:** ja.
3. **D:** hoe lang het duurt als je dus de zon laat stralen hoe lang het duurt voordat hij op zijn temperatuur uitkomt van eh..
4. **II1:** meer dan 100 seconden, lijkt me.
5. **D:** ja.
6. **II2:** een behoorlijk tijdje, natuurlijk. Ja poe hebben we daar niet een of andere fijne formule voor?
7. **D:** nee. Nee, gewoon schatten.
8. **II2:** nou, je krijgt eh..
9. **II1:** nou, je kunt even kijken na 100 seconden dit is de temperatuur dat is 0,008. Dus we moeten iets van 1 miljoen seconden of zo iets.

Fragment waarin een leerling en de docent de benodigde looptijd schatten. Les 6: 29'

Anders dan bij veel andere interventies begint de docent hier wel een inhoudelijke redenering. Leerling 1 beantwoordt de vraag overeenkomstig het bedoelde schatproces, op basis van de modeluitkomsten; haar schatting van één miljoen seconden ligt in de juiste orde van grootte (ongeveer 50 miljoen). De docent laat de leerlingen uitrekenen dat 1 miljoen seconden minder is dan twee weken en concludeert dat dit niet realistisch is. Een simulatietijd van enkele jaren “moet lukken” volgens de docent. Hoewel zijn inschatting toevalligerwijs goed overeenkomt met de karakteristieke tijd van het model is deze alleen te begrijpen uit zijn ideeën over de werkelijkheid buiten het model. Het signaal aan de leerlingen is dat leerling 1 niet op een goede manier tot haar waarde kwam. De aanpassing van de simulatiesetup levert hier bij toeval het gewenste resultaat, zodat er geen aanleiding is om de aanpak van de leerling (een extrapolatie van modelgegevens) te confronteren met de aanpak van de docent (benaderen van realistische weergave).

De docent concludeert na het runnen van het model dat een lage evenwichtstemperatuur in overeenstemming is met de verwachting, en het model dus goed genoeg is. Net als bij leerlingen 4 en 5 wordt de uitkomst niet kwantitatief vergeleken met de eerder berekende evenwichtswaarde.

Constructie van het 2-laags Powersimmodel – leerlingen 4 en 5

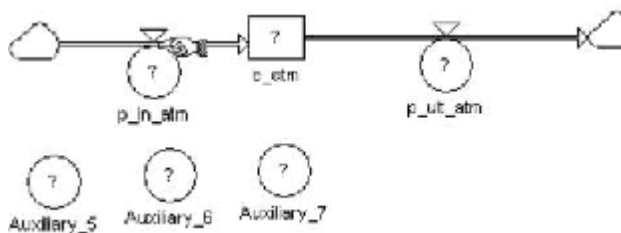
Leerlingen 4 en 5 construeren een basisstructuur analoog aan het 1-laagsmodel. Ze gaan dan eerst na welke formules voor de in- en uitstroom van de atmosfeer nodig zijn. Om alle benodigde ‘formule-elementen’ in te voeren plaatst leerling 4 alvast een aantal rondjes op het scherm. Op suggestie van leerling 11 maakt hij echter eerst de energievoorraad en de stroompijlen (zie Figuur 38). Leerling 5 vindt dit een logische stap, “want er komt iets in en er gaat iets uit”. Ze voeren een variabele ‘temperatuur’ in voor de atmosfeer, laten deze afhangen van de energievoorraad van de atmosfeer en verbinden haar met de uitstraling van de atmosfeer.

Het specificeren van de modelrelaties stuurt de verdere ontwikkeling van het modeldiagram.

Om de instroom van de atmosfeerlaag te definiëren redeneren de leerlingen dat er 341 Watt (de zoninstraling) de atmosfeer binnenkomt. Ze worden gecorrigeerd door leerling 11 die stelt dat de zoninstraling geen opwarming van de atmosfeer veroorzaakt.

Leerling 4 en leerling 5 maken vervolgens een verbinding van de warmte-uitstraling van de aarde naar de P_{in_atm} om daarmee de instroom te definiëren. De leerlingen vragen aan de onderzoeker welk deel van de warmtestraling geabsorbeerd wordt. De epsilon-

Figuur 38. De basisstructuur voor het 2-laagsmodel staat op het scherm, nadat eerst een ‘voorraadje’ model-elementen is geplaatst.



waarde die in les 3 plenair geschat is, komt dus niet in herinnering. De onderzoeker vraagt hen een onder- en bovengrens voor de absorptiecoëfficiënt epsilon te schatten op basis van de informatie in het lesmateriaal. Dit gebeurt niet meer gedurende de les, maar in de volgende les blijken de leerlingen wel een rangeschatting te hebben gemaakt (0,45 en 0,65). Hoewel leerling 4 daarmee correct de instraling van de atmosfeer definieert, heeft het koppel op dat moment nog geen duidelijk idee van de betekenis van epsilon.

1. **II4:** wat was die ook al..
2. **II5:** epsilon was de weerkaatsing.. nee, absorptie.. ik weet het niet meer.
3. **O:** staat die in je tekening?
4. **II4:** ja, die moet hier wel in staan. Dat is dus.. deze. Die was bijna 0, dus die gaat meteen door.
5. **O:** ja.
6. **II4:** deze is het.
7. **O:** oke. Dus het deel..
8. **II4:** dat.. langgolvig vanaf de aarde teruggestraald wordt en dat in de atmosfeer wordt opgenomen.

Fragment over de betekenis van de fractie 'epsilon'. Les 7: 9'

Leerling 4 tekent een relatiepijl van de uitstroom van de atmosfeer naar de instroom van de aarde, maar vraagt de docent hoe deze gedefinieerd moet worden. De docent geeft de benodigde formule. Om de uitstraling van de atmosfeer te definiëren is weer de constante van Stefan-Boltzmann nodig. Het lijkt voor leerling 4 onduidelijk of gelijke symbolen in verschillende formules dezelfde constanten zijn, want hij vraagt aan de docent of de twee sigma's in de beide formules voor de uitstraling dezelfde zijn.

Ten slotte heeft het koppel nog een waarde nodig voor de warmtecapaciteit van de atmosfeer om de temperatuur van de atmosfeer te definiëren. Het koppel weet niet welke waarde ze hiervoor moeten gebruiken en vraagt dit aan de onderzoeker. Deze vraagt hen naar de invloed van de warmtecapaciteit. Uit het gesprek dat hierop volgt, blijkt dat de leerlingen geen goed idee hebben wat de warmtecapaciteit doet: deze zou bepalen hoeveel de aarde kan uitstralen, omdat het een maat is voor de hoeveelheid energie die de aarde kan ontvangen. Leerlingen vatten de warmtecapaciteit dus als een inhoud op; een kleine warmtecapaciteit betekent een lage evenwichtstemperatuur.

De onderzoeker laat de leerlingen aan de hand van het 1-laagsmodel de invloed van verschillende waarden voor de warmtecapaciteit voorspellen, om deze vervolgens te testen en te verklaren. De leerlingen hebben al een 1-laagsmodel dat zodanig is ingesteld dat de temperatuur, startend van 288 K, naar een evenwicht afloopt. Ze maken in dit model de warmtecapaciteit twee keer zo klein. Tegen de verwachting van de leerlingen in blijft de evenwichtstemperatuur dezelfde. Ze merken echter niet op dat de starttemperatuur nu hoger ligt en het evenwicht eerder bereikt wordt. Ze gaan na wat het effect is als de warmtecapaciteit twee keer zo groot gemaakt wordt. De temperatuur stijgt nu naar dezelfde evenwichtswaarde. De leerlingen proberen dit te duiden.

1. **II4:** temperatuur blijft gelijk. Maar nu stijgt die. Dus nou.. komt er.. net daalde die. Net koelde die af. En nou.. warmt die op.
2. **O:** ja.
3. **II4:** dus.. hij krijgt meer energie binnen dan dat die uitstraalt, nu.
4. **O:** precies.
5. **II5:** in het begin.

De leerlingen geven een correcte beschrijving in termen van de fysische processen: er komt meer in dan er uit gaat, dus de temperatuur stijgt. De onderzoeker wil met de leerlingen nagaan hoe dit het resultaat is van de modelinvoer.

6. **O:** maar waarom.. waardoor wordt nou bepaald hoeveel die uitstraalt?
7. **II4:** door die warmtecapaciteit.
8. **O:** sorry. Wat staat er in je model? Wat zeg je tegen je computermodel, straal uit?
9. **II5:** eh.. wat er inkomt..
10. **O:** laat eens zien.
11. **II5:** en dan gedeeld door de warmtecapaciteit.

Leerling 5 doet een gooi naar de relatie tussen temperatuur en warmtecapaciteit (r. 9-11), de onderzoeker laat de leerlingen het dialoogvenster openen om te zien hoe deze gedefinieerd is.

12. **O:** dat is die. [*P_{uit} wordt opengelikt*]
13. **II5:** de temperatuur tot de vierde, maal de sigma, dus.
14. **O:** precies. Dat [*sigma*] is maar een of andere constante, daar doen we niet zoveel mee. Alleen de temperatuur bepaalt hoeveel die uitstraalt. Hoe warmer, hoe meer die uitstraalt.
15. **II4, 5:** ja.
16. **O:** en als die temperatuur nou heel laag is, dan straalt die ook niet veel uit.
17. **II5:** klopt, ja.
18. **O:** en als de temperatuur heel hoog is, dan straalt die heel veel uit.
19. **II4:** ja.
20. **O:** en wat bepaalt nou of die temperatuur hoog of laag is.
21. **II5:** de energie in..
22. **O:** precies. Hoeveel energie er in zit. En als je nou een hele grote warmtecapaciteit hebt en ik heb een vaste hoeveelheid energie, wat weet ik dan van m'n temperatuur?
23. **II5:** die gaat, ehm, omhoog?

Fragment over de invloed van de warmtecapaciteit. *Les 7: 28'*

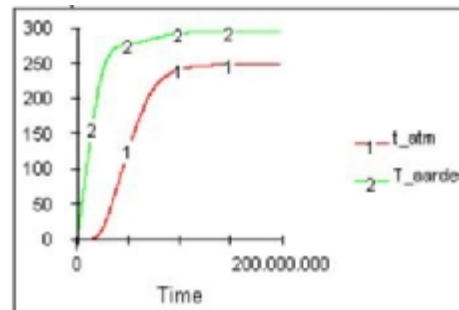
De leerlingen zien dat het model steeds dezelfde evenwichtstemperatuur geeft, maar dat het traject naar evenwicht toe wel verschilt voor verschillende waarden van de warmtecapaciteit.

Voor het 2-laagsmodel redeneren de leerlingen nu correct dat een kleinere warmtecapaciteit tot een hogere temperatuur leidt, maar ze volgen nog niet goed het dynamisch proces.

1. **II4:** dus de aarde wordt wat warmer, want hij [*de atmosfeer*] straalt meer uit. En de atmosfeer zelf zou [...].
2. **II5:** dat lijkt me.. ik weet niet of.. ik denk niet dat de atmosfeer [meer uitstraalt].
3. **O:** het wordt niet warmer? Of wat bedoel je?
4. **II4:** nee, dat de atmosfeer zelf afkoelt.
5. **O:** dat de atmosfeer zelf afkoelt. Oke. Maar hij doet het net zo als dat eh..
6. **II5:** ja, oke. Op een gegeven moment is die wel in evenwicht.

De leerlingen en de onderzoeker bekijken het resultaat door het model te runnen (Figuur 39).

7. **O:** nou, wat valt hier in op?
8. **II4:** dus, de temperatuur van de aarde is warmer dan de temperatuur van de atmosfeer.
9. **O:** oke, dat is één. Dat is fijn, dat willen we ook. Toch?
10. **II4:** ja.
11. **O:** of wil je dat eigenlijk niet? Dat kan ook nog.
12. **II4:** nee, dat wil je eigenlijk.
13. **O:** die van de aarde is ook warmer dan net zonder atmosfeer.
14. **II4:** ja, hij is nou 250.. nee, 2.. 300 Kelvin. Dat is dus 30 graden. Met dit albedo van 0.



Figuur 39. Resultaat van een modelrun door II4 en II5 met het 2-laagsmodel.

Fragment waarin de invloed van de warmtecapaciteit van de atmosfeer onderzocht wordt.

Les 7: 34'

De onderzoeker vraagt de leerlingen eerst om de werking van de atmosfeer te verklaren. De leerlingen komen niet direct met de warmte-uitstraling van de atmosfeer, maar door de ideeën van de leerlingen steeds te toetsen aan het conceptuele model en het modeldiagram wordt de correcte verklaring toch gevonden.

1. **O:** waarom kan zoiets kouds als de atmosfeer, 250 Kelvin, de aarde opwarmen?
2. **II5:** er komt ook extra warmte.. hij zorgt voor de extra energie.
3. **O:** waar zit dat dan, die extra..?
4. **II5:** want die zon zorgt natuurlijk toch al voor een [gedeeltelijke] opwarming van de aarde.
5. **O:** ja, ja natuurlijk.
6. **II5:** alleen een deel wordt meteen weer weerkaatst.
7. **O:** ja.
8. **II5:** maar dat neemt de atmosfeer ook weer op en daar straalt hij weer een deel van terug naar de aarde.

9. **O:** nou, we zeiden, wat die weerkaatst is weg.
10. **II5:** ja. O ja.
11. **O:** in ieder geval, dat stond in je tekening.
12. **II5:** maar in ieder geval, de aarde straalt weer wat uit.
13. **O:** ja.
14. **II5:** en een deel van wat de aarde uitstraalt..
15. **II4:** komt weer terug.
16. **II5:** komt weer terug. En dan warmt die dus twee keer op.

Fragment waarin leerlingen de werking van de atmosfeer uitleggen. *les 7: 38'*

In eerste instantie verklaart leerling 5 de opwarmende werking van de atmosfeer weer met extra weerkaatsing, dat wel onderdeel was van de kwalitatieve verklaring in les 4 maar hier niet gemodelleerd is (r. 1). Herhaaldelijke reflectie blijft ook een dominante verklaring (r. 5), maar uiteindelijk zijn de leerlingen in staat om de verbinding tussen de atmosfeer en de aarde aan te wijzen en de extra energiestroom te benoemen voor de opwarming (r. 10-14).

De onderzoeker laat de leerlingen nu een voorspelling doen voor het effect van een grotere warmtecapaciteit. De leerlingen volgen dezelfde redeneerstappen als ze zojuist hebben moeten maken: een kleinere warmtecapaciteit betekent een hogere uitkomst bij de breuk E/C , dus een hogere temperatuur en dus meer uitstraling. De voorspelling van de leerlingen is dan ook dat de temperatuur aan het aardoppervlak hoger zal worden. Het model wordt gerund om de voorspelling te testen.

1. **II4:** ai, blijft gelijk. Hij is ongeveer hetzelfde, heb ik het idee.
2. **II5:** hij is iets hoger toch? Nee.
3. **II4:** nee, hij is..
4. **II5:** hetzelfde. Er zit dus gewoon een bepaald evenwicht tussenin.
5. **O:** ja natuurlijk. Maar kun je dat nou begrijpen? Waarom doet die warmtecapaciteit nou niets? Want je zei net toch zelf, als die hier [*opent T_{atm}*]. kleine warmtecapaciteit, heb ik een hoge temperatuur.
6. **II4:** ja.
7. **O:** nou, dan gaat die dus ook veel uitstralen.
8. **II4, 5:** ja.
9. **O:** maar wat gebeurt er dan? Als er veel uitstraalt..
10. **II4:** dan komt er hier veel in.
11. **O:** dan komt er daar veel in. En hoe zie je dat in de grafiek, dat er veel inkomt?
12. **II4:** dat is dit toch? Er komt in een keer.. [*volgt met de muis het stijgen van de groene grafiek*]
13. **O:** ..meer bij.
14. **II4:** pats, erin.

Fragment waarin het modelresultaat geïnterpreteerd wordt. *Les 7: 40'*

Leerling 4 relateert nu correct de warmtecapaciteit aan de helling van de grafiek. Het ontstaan van het evenwicht wordt niet meer besproken, omdat de docent

overgaat tot een plenaire inventarisatie van de uitkomsten die zijn gevonden voor de temperatuur bij de verschillende albedo- en epsilon-ranges.

Constructie van het 2-laags Powersimmodel – leerlingen 1 en 2

De leerlingen 1 en 2 redeneren, net als het voorgaande koppel, dat de zoninstraling verandert door toevoeging van de atmosfeerlaag. De leerlingen kunnen deze redenering niet verder uitwerken in het modeldiagram omdat de onderzoeker vervolgens de aanwijzing geeft dat de atmosfeer eenzelfde structuur als het 1-laagsmodel moet krijgen, met een voorraadgrootte en een in- en een uitstroom. De leerlingen tekenen vervolgens een voorraadgrootte en een instroom voor de atmosfeer.

Het koppel heeft moeite om de temperatuur van de atmosfeer te definiëren. In plaats van een warmtecapaciteit in te voeren en deze te gebruiken zoeken de leerlingen naar een formule die past bij de basisstructuur die ze hebben getekend.

1. **II2:** wat komt er binnen bij die atmosfeer? Sowieso, temperatuur atmosfeer, wat is dat?
2. **II1:** ehm, dat is deze [*de uitdrukking voor de evenwichtstemperatuur als functie van T_{aarde}*].
3. **II2:** vierdemachtswortel van de temperatuur van de aarde tot de macht vier gedeeld door twee. Kunnen we invoeren. Want hier krijg je uiteindelijk die temperatuur uit.
4. **II1:** ja. Van de aarde, he.
5. **II2:** ja, nou die hebben we hier toch nodig?
6. **II1:** er komt niets in de atmosfeer.
7. **II2:** maar hij zal minder hier naar toe doorsturen [*naar instraling_zon bij de aarde*] dus je hebt hier.. even neerzetten. Atmosfeer. [...] Er was verder geen constante [*warmtecapaciteit*] bij de temperatuur van de atmosfeer, toch? Dat was toch de vierdemachtswortel van ehm..
8. **II1:** maar hier, deze [*einduitdrukking voor T_{aarde}*] hebben we ook niet gebruikt hoor.
9. **II2:** nee, maar we hadden al een andere voor de temperatuur van de aarde. Toch? Want wat hadden we.. o ja, dat was $Q = m c \Delta T$ hadden we daar. Maar moeten we niet ook $Q =$ nee dat hebben we nooit gebruikt. [*II1 maakt relatiepijl tussen temp_aarde en temp_atm*] Ja, en de temperatuur van de aarde gaat daar naar toe.

Fragment waarin het koppel een mogelijke temperatuurdefinitie bespreekt. Les 6: 39'

Door de temperatuur van de atmosfeer afhankelijk te maken van die van de aarde hebben de leerlingen een verbinding tussen de temperatuur van de aarde en de uitstroom van de atmosfeer. Ze hebben aarzelingen over de gebruikte relatie omdat de temperatuur dan niet op vergelijkbare wijze als in het 1-laagsmodel wordt gedefinieerd, maar ze realiseren zich niet dat de gevonden formule alleen de twee evenwichtstemperaturen aan elkaar relateert.

De instroom absorbeert niets van de zoninstraling en daarom overwegen de leerlingen de instroom weer weg te halen.

1. **II2:** wacht, de atmosfeer neemt bijna niets op van wat die de eerste keer zeg maar van de zon krijgt he.
2. **II1:** ja.
3. **II2:** dus dat is eigenlijk 0.
4. **II1:** ja.
5. **II2:** toch? Want hij reflecteert 40% en er gaat 60% door. Die kunnen we 0 laten. Dus heb je eigenlijk die niet nodig.
6. **II1:** nee, inderdaad.
7. **II2:** toch?

Dan bedenken ze dat de uitstraling van de aarde wel de atmosfeer in moet kunnen.

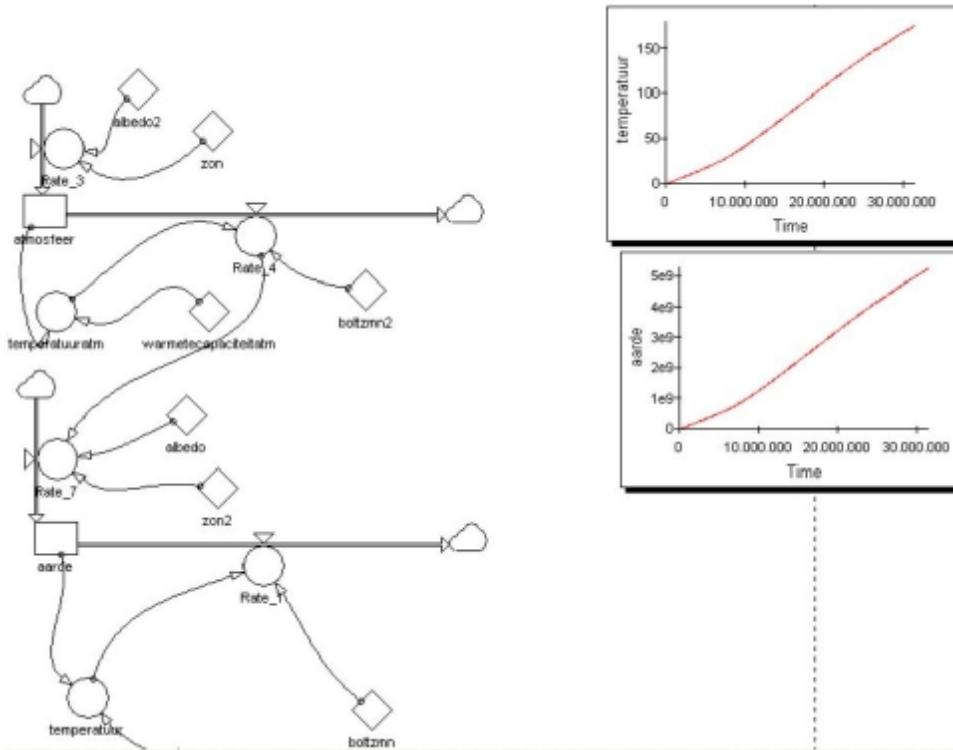
8. **II1:** ja, klopt. Ja, maar er komt natuurlijk wel vanaf de aarde wat, he?
9. **II2:** ja, dus dan kunnen we die *[temperatuur aarde]* toch daar *[instroom atmosfeer]* naar toe doen?
10. **II1:** ja maar dan krijg je natuurlijk.. die voorraad wordt dan wel anders.
11. **II2:** dan die die hier heeft. Ja, maar dat wordt dan gewoon meteen de temperatuur. Maar want je weet namelijk niet de hoeveelheid energie in de atmosfeer. Ik bedoel, dat weet je niet toch want we hebben niet iets uitgerekend van de soortelijke warmte van de atmosfeer. Dus ik ga er vanuit dat dat niet veel doet, zeg maar.

Fragment waarin het koppel het diagram van het 2-laagsmodel bespreekt. *Les 6: 41'*

Als ze de invoer bespreken, merkt leerling 1 op dat dit ook invloed heeft op de hoeveelheid energie. In tegenstelling tot wat er in het modeldiagram is uitgedrukt moet de temperatuur ook kunnen variëren. Op dit punt eindigt les 6. Er is geen opname van dit koppel uit les 7, door het vastlopen van de screencam.

Uitwerking en evaluatie van het 2-laagsmodel – leerlingen 6 en 10

Het koppel begint met het 2-laagsmodel dat in Figuur 40 is weergegeven. Wat opvalt is dat het model tweemaal een albedo heeft, tweemaal een constante van Boltzmann en tweemaal een zoninstraling; onduidelijk is waarom de leerlingen voor deze invoer kiezen. Misschien willen de leerlingen de elementen voor elke laag apart behandelen. In les 3 stelde de docent namelijk op deze wijze de evenwichtsvergelijkingen op: bij de atmosfeer komt 341 W aan zoninstraling binnen, waaraan reflectie, transmissie en absorptie gelijkgesteld moeten worden en bij de aardlaag komt het deel van de zoninstraling binnen dat de atmosfeer doorlaat: een tweede keer 'zoninstraling'. In dit model van leerlingen 6 en 10 hebben de twee albedo's bijvoorbeeld verschillende waarden: de atmosfeer een hoge (0,6: wolken), de aarde een lage (0,3: steen). Daarentegen hebben de leerlingen wel twee keer dezelfde waarde voor de zoninstraling gebruikt. Het kan ook op eenzelfde onduidelijkheid wijzen als leerling 4 had met de constante van Boltzmann: of een constante met meerdere rekengrootheden in Powersim verbonden kan worden.



Figuur 40. 2-laagsmodel van leerlingen 6 en 10 bij de start van les 7.

De instromen in het model zijn op een verkeerde manier gedefinieerd, als $\text{zoninstraling} \times \text{albedo}$. In het model heeft de instroom bij de aarde wel een relatie met de uitstroom van de atmosfeer, maar er is geen verbinding tussen de uitstroom van de aarde en de instroom van de atmosfeer. Het model heeft nog geen absorptiecoëfficiënt ε . De looptijd van het model is niet lang genoeg geweest om in de grafieken af te lezen op welke temperatuur het model eindigt.

De docent geeft aan het begin van les 7 plenair aan elk koppel de opdracht om, als het 2-laagsmodel in Powersim af is, de vier evenwichtstemperaturen te berekenen die horen bij de vier combinaties van minimale en maximale waarden voor het albedo en ε . Tijdens het groepswerk vraagt de docent aan leerlingen 6 en 10 welke waarde voor ε zij ingevoerd hebben. Hierdoor realiseren zij zich dat deze nog ontbreekt in het model. Ze geven er geen blijk van te weten wat ε voorstelt.

De docent gaat in zijn begeleiding de ingevoerde formules en constanten langs en schrijft voor wat de correcte uitdrukkingen zijn. Zo constateert hij ook dat de verbinding tussen de uitstroom van de aarde en de instroom van de atmosfeer ontbreekt; dit merkt hij niet op aan de hand van het modeldiagram. Verder stelt hij vast dat de looptijd van het model te kort is en laat de leerlingen bij de setup dezelfde looptijd invoeren als andere koppels gebruiken.

Het koppel heeft dan een model dat door de docent is goedgekeurd. De docent heeft namelijk alle formules en waarden gecontroleerd. Het model heeft echter nog steeds twee albedo's. De docent heeft wel geëist dat de twee waarden even groot moeten zijn (ze moeten immers dezelfde constante voorstellen), maar hij definieerde vervolgens de instroom van de atmosfeer niet alleen met de uitstraling van de aarde maar ook met het gereflecteerde deel van de zoninstraling – alsof de aan het aardoppervlak weerkaatste zonne-energie geabsorbeerd zou worden door de atmosfeer.

De leerlingen runnen hun model met de verschillende combinaties van onder- en bovengrenzen van de reflectie- en de absorptiecoëfficiënt. Ze vinden andere waarden voor de evenwichtstemperatuur dan de leerlingen 7 en 9, hoewel beide koppels claimen hetzelfde model gemaakt te hebben. Zowel de leerlingen als de docent realiseren zich dat de uitkomst dezelfde zou moeten zijn. De docent vraagt hen om hun simulatiesetup te vergelijken: “timestep en stoptime, zijn die hetzelfde? Heb je ‘m allebei op Euler staan of zo?”. Hij licht niet toe wat het effect zou kunnen zijn op de uitkomst van een verschillende instelling; hij lijkt zelf niet goed te begrijpen wat deze instellingen doen.

Afronding tweede modelleercyclus

In les 8 verzamelt de docent op een vel papier de vier gevraagde waarden (de vier evenwichtstemperaturen bij de vier combinaties van minimale en maximale waarden voor het albedo en epsilon) van drie koppels. Allemaal hebben zij verschillende waarden, maar de uitkomsten worden niet meer geëvalueerd. Sommige modellen bevatten nog fouten, die niet meer opgespoord worden.

De docent geeft opdracht om het model te tunen op een waarde van 288 Kelvin. De docent schrijft van alle vier koppels de gebruikte parameterwaarden voor het albedo en de absorptiecoëfficiënt ook op het vel papier. Op één koppel na gebruiken alle leerlingen waarden die binnen de geschatte ranges vallen. Hoewel twee koppels eenzelfde epsilonwaarde gebruiken met een verschillend albedo om op dezelfde eindtemperatuur te komen, worden ook deze computermodellen niet meer geëvalueerd. De boodschap die de docent aan de verschillende uitkomsten verbindt, is dat ‘verschillende modellen verschillende voorspellingen doen’.

Uit de inventarisatie van de gevonden temperatuurranges blijkt het 2-laagsmodel de huidige temperatuur op aarde goed te kunnen voorspellen, hoewel het modelgedrag geen rol speelt in de evaluatie. De uitkomsten van het model worden niet gekoppeld aan de rode lijn voor de module. Hier had de docent ook weinig mogelijkheid toe, omdat deze aan het begin van de module nog niet is benoemd. Op verzoek van de onderzoeker wordt daarom in de volgende les de rationale achter de module alsnog besproken.

Evaluatie

De eerste analysevraag is of het modelgedrag zodanig geproblematiseerd wordt dat dit een motief geeft om een computermodel te bouwen en het modelgedrag te onderzoeken.

De leerlingen achten de computer handig voor het uitvoeren van veel rekenwerk, maar waaruit dat rekenwerk bestaat wordt niet gespecificeerd. Het modelgedrag wordt door de docent wel gethematiseerd, maar het resulterende systeemgedrag wordt intuïtief vastgesteld. Met name ontbreekt dat het resulterende patroon onderbouwd wordt door te redeneren met kwalitatieve veranderingsregels. Er ontstaat geen onzekerheid over het modelgedrag en dit geeft dus geen motief voor het bouwen van de computermodellen.

Hoewel de overgang naar computermodelleren wordt gemotiveerd als het vergemakkelijken van het rekenwerk, wordt niet nagegaan hoe het niet-evenwichtsproces verloopt. Als een computermodel gecontroleerd is door de docent en een bruikbare setup is ingesteld (veelal middels proberen en variëren) hebben alle verdere modelruns betrekking op het genereren van resultaten (en niet zozeer op modelonderzoek). Het bepalen van de (range aan) evenwichtstemperaturen met het 2-laags Powersimmodel is voor hen voldoende beantwoording van de vraagstelling. In het modelonderzoek komt het verklaren van het modelgedrag dan ook niet aan bod, behalve daar waar de onderzoeker er naar vraagt. Het kwalitatief redeneren over het modelgedrag verloopt dan moeizaam.

De tweede analysevraag is of het verloop betekenisvol is geweest voor de leerlingen.

Het lijkt de leerlingen niet vreemd om een computermodel te gaan maken: ze hebben ervaren dat het oplossen van de modelvergelijkingen moeilijk is (hetgeen de computer van hen overneemt) en de leerlingen zijn er op gericht om de huidige globaal-gemiddelde temperatuur te bepalen. Ze hebben dus een redelijk doel voor ogen en werken daar doelgericht naar toe, maar dit doel stemt niet overeen met het doel dat met het lesontwerp beoogd is. Het gewenste motief om een computermodel te maken is niet benoemd en ook ontbreekt de overeenkomst met het modelleren van radioactief verval. Het lijkt daarom voor de leerlingen niet inzichtelijk om te starten vanuit het radioactiviteitsmodel. Er zijn bovendien geen concrete aanwijzingen dat numerieke integratie herkend is als de benodigde rekenwijze om het model door te kunnen rekenen; leerlingen gebruiken af en toe ook evenwichtsvergelijkingen terwijl de verandering per tijdstap nodig is.

De derde analysevraag is of er productieve constructieruimte is gerealiseerd.

De leerlingen drukken hun ideeën over het fysisch mechanisme in de beide stralingsmodellen uit in Powersim. Fouten die worden gemaakt in de basisstructuur van het 1-laagsmodel zijn vooral gerelateerd aan een onjuist gebruik van de Powersim-syntax, maar de leerlingen kunnen al snel een correcte interpretatie geven van de diagrammen die zij bouwen. Bij het construeren van het 2-laags Powersimmodel laten de leerlingen zich veelal weinig leiden door de conceptuele modellen die zijn ontwikkeld. De elementen uit het conceptueelmodel vinden niet vanzelfsprekend hun weg naar het computermodel; de leerlingen zijn veeleer spaarzaam met het toevoegen van modelvariabelen. Des te meer gaan de leerlingen uit van de beschikbare formules, hetgeen de leerlingen af en toe op de verkeerde weg brengt omdat sommige ideeën uit het conceptueel model nog onvoldoende beheerst worden, met name de fractie ε en de warmtecapaciteit.

Evaluatie van eigen modelkeuzes is een belangrijk element van productieve constructieruimte. Door de begeleiding van de docent, de onderzoeker en leerling 11 krijgen de leerlingen weinig gelegenheid om hun eigen aanpak serieus te volgen en te beoordelen: zij worden snel gecorrigeerd als zij een richting opgaan die afwijkt van wat beoogd is en daarbij wordt precies voorgeschreven wat er moet gebeuren. De leerlingen zelf beoordelen hun eigen modellen ook nauwelijks of niet; dit laten zij over aan de docent. Om hun computermodellen te beoordelen zouden de leerlingen idealiter nagaan of zij het conceptueel model volledig gerepresenteerd hadden; in de praktijk wordt vooral gekeken of alle formules gebruikt zijn. Herhaaldelijk verwarren de leerlingen de benodigde vergelijkingen voor een dynamische beschrijving met de balansvergelijkingen voor de evenwichtssituatie. Voor de docent zijn de vormelementen uit het Powersimdiagram belangrijke aanknopingspunten voor verbetering.

Niet alleen zijn er geen verwijzingen naar het conceptueel model om het modeldiagram te evalueren, ook wordt het model veelal gerund zonder expliciete verwachtingen. Toch zijn zowel de docent als de leerlingen met name gericht op het verkrijgen van een correct resultaat. De uitkomsten van het 1-laagsmodel worden echter niet vergeleken met de eerder berekende evenwichtstemperatuur. Het model is goed genoeg als de leerlingen van de docent of van de onderzoeker te horen krijgen dat ze kunnen beginnen aan het 2-laagsmodel. Al met al is er dus nog weinig productieve constructieruimte gerealiseerd.

De laatste analysevraag is of er voor de ontwikkeling van het 1- en het 2-laags Powersimmodel wordt teruggegrepen op de eerder geconstrueerde Powersimmodellen.

Zoals bedoeld bouwen de leerlingen voort op het modeldiagram van radioactief verval. Verwacht was dat leerlingen, na het maken van de radioactiviteitsmodellen, redelijk gemakkelijk Powersim kunnen gebruiken. Aanvankelijk hadden de leerlingen echter geen goed begrip van de stroompijlen en zij konden het modeldiagram niet onafhankelijk interpreteren van het radioactief verval. De analogie tussen de twee situaties wordt ook niet geëxpliciteerd, waardoor het omwerken van het vervalmodel tot een stralingsmodel minder inzichtelijk gaat dan gewenst. Het begrip van Powersim verbetert echter snel; voor de ontwikkeling van het 2-laagsmodel zijn er wat dit betreft geen obstakels meer. De basisstructuur van het 1-laagsmodel vormt bij alle koppels het uitgangspunt voor het 2-laagsmodel, maar in de details van het diagram (de temperatuur, de uitstraling) volgen leerlingen eerder hun eigen ideeën.

4.2.8 Vijfde episode: modeluitbreiding met een in de tijd variërende modelparameter

Het doel van de vijfde episode is een model te ontwikkelen waarin verandering van de temperatuur afhankelijk is van verandering in de CO_2 -concentratie.

Wijzigingen in het beoogd lesverloop

Volgens het onderwijsontwerp zou het richtinggevend motief voor deze cyclus moeten zijn: begrijpen hoe een geavanceerder model grotere onzekerheden kan opleveren. Dit motief is nog niet opgeroepen omdat de algemene probleemstellingsfase aan het begin van de module goeddeels is overgeslagen. Op verzoek van de onderzoeker voert de docent daarom opnieuw de probleemstellingsfase uit als introductie op de twee komende modelleercycli, CO₂-scenario's en sneeuw-albedo-feedback.

De procesmatige sturing van de nieuwe modelleercyclus krijgt vorm door de leerlingen hun eigen onderzoek te laten plannen en de benodigde gegevens te verzamelen. In het lesmateriaal wordt de leerlingen daarom gevraagd om een plan van aanpak te schrijven voor het modelleren van de temperatuur als gevolg van een veranderende CO₂-concentratie. In het lesmateriaal is benoemd welke aspecten daarin aan bod moeten komen: een vraagstelling voor de cyclus, de benodigde gegevens, een testcriterium voor het model en een beslissing of een computermodel nodig is. Op basis van de ervaringen van de leerlingen uit de voorgaande cycli verwachten we dat zij voldoende kennis van het modelleerproces en van de concrete context hebben verworven om deze vragen te beantwoorden. De taak van de docent is om te bewaken dat deze elementen in de leerlingplannen aan bod komen en dat ze met voldoende kwaliteit zijn uitgewerkt om de verdere modelontwikkeling en het modelonderzoek te sturen.

Om de leerlingen hun inschatting of een computermodel nodig is te laten beoordelen, wordt in het lesmateriaal de gevoeligheid van het model aan de orde gesteld. Aan de hand van opdrachten in het lesmateriaal onderzoeken de leerlingen hoe snel hun model zich herstelt van een instantane verandering in de CO₂-concentratie (ter grootte van de verandering sinds de Industriële Revolutie) en hoe groot de invloed is van de onder- en bovengrenzen die de leerlingen geschat hebben voor de warmtecapaciteiten van beide lagen.

Om de leerlingen in vergelijking met het eerste ontwerp meer constructieruimte te laten is in het lesmateriaal geen toekomstscenario van de CO₂-concentratie gegeven, maar construeren en beargumenteren de leerlingen elk twee CO₂-scenario's om het model mee door te rekenen. De docent zorgt er voor dat bij een plenaire bespreking van de modelresultaten steeds duidelijk is op welk scenario het is gebaseerd en welke aannames daaraan ten grondslag liggen. Bij de evaluatie van de modelresultaten kunnen de docent en de leerlingen daarna de volgende bronnen van onzekerheid identificeren: geschatte parameterwaarden zoals het albedo en de absorptie- en emissiecoëfficiënt, geparametriseerde relaties zoals tussen de CO₂-concentratie en ϵ , en verschillende inschattingen van de toekomstige omstandigheden zoals de CO₂-uitstootscenario's. Deze verklaren echter niet waarom een geavanceerder model een grotere spreiding in uitkomsten kan geven. Hiertoe introduceert de docent de laatste cyclus.

Analysekader

De analysevragen bij deze cyclus zijn:

1. Is er sprake van een betekenisvol proces?
2. Wordt er productieve constructieruimte gerealiseerd?
3. Wordt het betrouwbaar voorspellen met complexe dynamische modellen zodanig geproblematiseerd dat dit een motief geeft om zelf te modelleren?
4. Wordt de opzet van de eerste twee cycli als voorbeeld gebruikt om de modelontwikkeling te plannen?

Uitvoering

De docent start de oorspronkelijke probleemverkenning door te vragen wat wetenschappers doen om steeds betere voorspellingen te maken.

1. **D:** hoe kun je het [*de modelvoorspellingen*] nog beter maken?
2. **Il1:** supercomputer.
3. **D:** waarom?
4. **Il4:** omdat je dan nog kleinere timesteps of zo kunt nemen.
5. **D:** nog kleinere timesteps, dat zou kunnen.
6. **Il4:** waardoor je het nog nauwkeuriger krijgt.
7. **D:** je krijgt de grootste computer van Shell tot je beschikking en dan hup flats klaar.
8. **Il4:** dan heb je een nauwkeurigere waarde.
9. **D:** dan heb je hem sneller en iets nauwkeuriger. Oke. Kun je nog meer verzinnen?
10. **Il5:** misschien het model nog wat ingewikkelder maken.
11. **D:** het model ingewikkelder maken. [*Il7*], dat lijkt me wat voor jou.

Fragment uit de klassikale bespreking over modelverbetering. *Les 8: 20'*

Leerlingen komen met twee reacties om betere modelvoorspellingen te krijgen. De genoemde supercomputer (r. 2) lijkt in eerste instantie een ludiek bedoelde opmerking, verwijzend naar het journaalfragment dat aan het begin van de lessenserie getoond is, maar leerling 4 heeft er ook een onderbouwing voor (r. 4, 6): op een snellere computer kun je kleinere timesteps nemen, waardoor de uitkomst nauwkeuriger wordt. De docent bespreekt deze bijdrage niet inhoudelijk. De tweede reactie is in lijn met wat in het ontwerp beoogd is, namelijk het toevoegen van meer factoren aan het model. De docent gaat op deze bijdrage verder, hetgeen dit idee impliciet goedkeurt.

In het vervolg op het fragment refereert leerling 7 aan een van de beperkingen in het conceptueel model dat het om een zwarte aarde zou gaan en suggereert – wellicht op basis van zijn ervaring met het eerste lesontwerp – om sneeuw te gaan modelleren. De docent gaat nog een aantal beperkingen na, die in een complexer model ongedaan gemaakt zouden kunnen worden. De leerlingen benoemen nog het dag- en nachtritme en het weer; zelf benoemt de docent het verschil tussen verschillende klimaatgordels. Hij gebruikt de toenemende complexiteit van

modellen echter niet om aan de orde te stellen of en zo ja hoe met deze uitbreidingen de onzekerheid in modelvoorspellingen toeneemt.

De docent introduceert het thema onzekerheid aan de hand van een figuur in het werkboek, maar behandelt dit onafhankelijk van het voorgaande. De figuur in het werkboek wordt verkeerd gelezen, omdat de docent de verschillende broeikasgasscenario's interpreteert als runs van verschillende modellen. Hij vraagt de onderzoeker wat er aan de leerlingen gevraagd moet worden, waarna hij ad hoc de onderzoeker het globaal motief voor het verdere modelleren laat expliciteren aan de hand van de spreiding in modeluitkomsten in de figuur.

1. **O:** wat mag je nou van wetenschappers verwachten... wat krijg je nou te zien als wetenschappers hun modellen verbeteren?
2. **I17:** dan gaan ze dichter bij elkaar komen.
3. **I15, 8:** minder range.

De verwachtingen van de leerlingen over het effect van modelverbeteringen zijn duidelijk geëxpliciteerd en in overeenstemming met het lesontwerp.

4. **O:** maar nu blijkt dat die modeluitkomsten steeds verder uit elkaar gaan liggen. Maar wat hebben ze al die tijd gedaan? Ze hebben onder andere geprobeerd om hun modellen nauwkeuriger te maken. Door bijvoorbeeld meer processen mee te nemen, door gedetailleerder te kijken. En toch levert dat niet automatisch een beter.. een kleinere range van uitkomsten
5. **I15:** ze hebben allemaal een andere manier van berekenen.
6. [...]
7. **O:** maar als al die wetenschappers met elkaar overleggen over wat ze met elkaar in dat model stoppen, of hoe je daar mee moet rekenen, of welke waarden je kiest, wat kan er dan voor zorgen dat die range alleen maar breder wordt? Dat die waarden alleen maar verder uit elkaar komen te liggen? [...] Kun je begrijpen dat dat gebeurt, want dat lijkt in je eigen model helemaal niet het geval te zijn?

De onderzoeker is degene die het benodigde probleem benoemt.

8. **I17:** omdat wij naar een uitkomst toe moesten rekenen. Een vaste uitkomst.
9. **O:** maar zelfs met die 0,2 en 0,5 kregen jullie al verschillende uitkomsten.
10. **I17:** ja.
11. **D:** dan gaan we vandaag nog proberen CO₂ er in te rammelen. En dan morgen de sneeuw. Oke.

Fragment met verwachtingen aangaande modelverbetering. *Les 8: 30'*

Leerling 7 merkt terecht op dat al hun modellen wel op dezelfde uitkomst kwamen omdat deze van tevoren was vastgesteld. De docent maakt een vrij abrupte overgang naar de inhoud van de komende modelleercycli, zonder dat deze ingebed worden in de probleemstellingsfase.

Wegens tijdgebrek besteedt de docent slechts een enkele les aan het modelleren van een veranderende CO₂-concentratie. De docent introduceert het idee van

scenario's aan de hand van de gepresenteerde scenario's in de figuur in het werkboek. De docent laat de leerlingen op basis van de scenario's in het werkboek een CO₂-concentratie 'prikken' voor het jaar 2200 en geeft de opdracht deze in Powersim in te voeren en een van de vier relaties uit het boek te gebruiken om een verbinding met ϵ te maken. De leerlingen voeren dit in hun model in en genereren een nieuwe evenwichtstemperatuur. De docent verzamelt de temperaturen op zijn overzichtsvel.

Evaluatie

De beoogde probleemverkenning wordt andermaal niet gerealiseerd. De benodigde vooronderstelling dat complexere modellen tot zekerder voorspellingen leiden, blijkt inderdaad zo benoemd te kunnen worden door leerlingen. Toch wordt het gewenste motief voor de module niet geformuleerd omdat er geen productieve verbinding is met de modellen die de leerlingen hebben gemaakt. Ook is er geen richting gegeven aan het vervolg.

Door tijdgebrek is de uitvoering van de derde cyclus zodanig verkort dat het functioneren van het ontwerp niet te beoordelen is.

4.2.9 Zesde episode: modeluitbreiding met een dynamische terugkoppeling

In de vierde en laatste cyclus wordt het gedrag onderzocht van een positieve terugkoppeling tussen de temperatuur, de sneeuwbedekkingsgraad en het albedo.

Wijzigingen in het beoogd lesverloop

In het eerste ontwerp werd het zelfstandig modelleren van de specialisaties 'CO₂-opslag in de oceaan' en 'wolkbedekking' mede belemmerd door de moeilijkheid van de stof. Bovendien was het resulterende modelgedrag niet zo duidelijk om frappante gedragingen te onderzoeken. In het herontwerp ontwikkelen de leerlingen daarom alleen een model met terugkoppeling door sneeuwbedekking.

Twee aandachtspunten voor het herontwerp zijn het motiveren van de modeluitbreiding vanuit de globale probleemstelling en het sturen van het modelonderzoek.

De uitbreiding met een positieve terugkoppeling en de keuze voor de specifieke stof konden in het eerste ontwerp niet betekenisvol gemaakt worden. Met de gewijzigde probleemstelling is het doel veeleer geworden om te kunnen verklaren waarom de spreiding in modeluitkomsten (soms) toeneemt. De modellen die de leerlingen tot dusver hebben ontwikkeld, geven daar geen inzicht in. Dit is een reden om in elk geval uit te kijken naar een interactievorm die in de eerdere modellen nog niet aanwezig is.

In deze laatste cyclus wordt minimale sturing beoogd. Uit het eerste ontwerp bleek het modelonderzoek echter nog nauwelijks betekenis te hebben voor de leerlingen. Een aandachtspunt is daarom hoe de leerlingen richting gegeven kan worden wat betreft het modelonderzoek zonder inhoudelijk voor te schrijven wat zij moeten doen.

In het herziene lesverloop wordt een videofragment getoond waarmee zowel het bouwen van een sneeuwmodel gemotiveerd kan worden als het onderzoeken ervan gestuurd. Het fragment betreft een journaalitem over het smelten van het ijs op de Noordpool. Daarin worden drie aspecten benoemd over het verloop van het afsmelten: het ijsvrij worden van de Noordpool komt onverwacht vroeg, het smelten gaat steeds sneller en het ijs komt niet meer terug. Het is te verwachten dat de leerlingen deze aspecten kunnen benoemen en ze bijzonder vinden, omdat de genoemde karakteristieken van het smeltgedrag niet goed te relateren zijn aan het modelgedrag dat zij tot dan in hun eigen modellen hebben gezien:

- De leerlingen hebben gezien dat modeluitkomsten onzeker kunnen zijn door ranges in schattingen en door onzekerheid in toekomstscenario's. Gegeven dat wetenschappers het eens kunnen worden over het gebruik van parameterwaarden, is het alsnog vreemd dat het moment van ijsvrij worden zo lastig te voorspellen is. Er zat tientallen jaren verschil tussen de voorspellingen van verschillende groepen onderzoekers in het fragment. Dit roept de vraag op wat het moment van ijsvrij worden zo moeilijk te voorspellen maakt.
- De leerlingen hebben het effect gemodelleerd van een veranderende CO₂-concentratie op de temperatuur. De temperatuur verandert alleen als de CO₂-concentratie ook verandert. De temperatuur verandert sneller als de CO₂-concentratie ook sneller verandert. In het videofragment is geen sprake van een relatie met een steeds sterkere toename van broeikasgassen. De leerlingen kennen echter geen ander mechanisme dat voor een versterkend effect kan zorgen. Dit roept de vraag op wat er voor zorgt dat het smelten steeds sneller gaat.
- De leerlingen kunnen in het model nagaan dat de temperatuur zal dalen als de CO₂-concentratie daalt (hoewel dit geen tegenhanger heeft in de werkelijkheid). Dit roept de vraag op in welke zin het ijs niet meer terugkomt. Het is te verwachten dat het ijs wel terugkomt als de temperatuur weer enkele graden zal dalen. Dit kan modelmatig onderzocht worden.

De docent voert met de leerlingen een klassengesprek om bovenstaande noties te identificeren. Hiermee motiveert hij de laatste modeluitbreiding. Met de noties is bovendien benoemd op welke aspecten het te ontwikkelen model onderzocht moet worden.

Globaal verwachten we het volgende constructieproces te zien:

- de leerlingen voegen aan hun 2-laags Powersimmodel een nieuwe variabele 'sneeuwbedekkingsgraad' toe en maken het albedo afhankelijk van een albedo voor een sneeuwvrij aardoppervlak, een albedo voor een sneeuwbedekt aardoppervlak en de sneeuwbedekkingsgraad;
- de leerlingen schatten waarden voor het sneeuwvrije en sneeuwbedekte albedo;
- de leerlingen definiëren een globaal-gemiddeld albedo als functie van de sneeuwbedekkingsgraad en de beide specifieke albedo's;
- de leerlingen specificeren de sneeuwbedekkingsgraad als functie van de temperatuur op basis van gegevens uit het lesmateriaal.

Om het model te testen en te onderzoeken zullen leerlingen proberen:

- het genoemde gedrag (steeds sneller, onomkeerbaar) te reproduceren;
- dit gedrag te verklaren;
- een reden te zoeken voor de onvoorspelbaarheid van het moment van verdwijnen.

De bevindingen van de leerlingen worden klassikaal besproken, waarbij de docent er voor zorgt dat het gedrag ten gevolge van positieve terugkoppeling als mogelijke bron wordt geïdentificeerd voor de toenemende onzekerheid van steeds complexere modellen, hetgeen het overkoepelende doel was voor de module.

Analysekader

De analysevragen bij deze cyclus zijn:

1. Wordt er aan het getoonde journaalfragment een motief ontleend om het model uit te breiden met sneeuwbedekking?
2. Verloopt het modelleringsproces voor leerlingen betekenisvol?
3. Is er sprake van productieve constructieruimte?
4. Wordt aan het getoonde journaalfragment sturing ontleend voor het modelonderzoek?

Uitvoering

De probleemverkenning duurt zo'n 15 minuten. Als start van les 9 bekijken de leerlingen het journaalfragment over het verdwijnen van het poolijs. De docent vraagt de leerlingen om de opvallende punten te benoemen.

1. **D:** Als je aan modellen denkt, wat zijn de drie dingen die hier uit naar voren komen?
2. **II1:** steeds sneller
3. **II7:** mensen zijn het niet met elkaar eens.
4. **D:** steeds sneller? Wat gaat steeds sneller?
5. **II1:** het klimaat.
6. **D:** het smelten. Wat nog meer? Dit was twee, denk ik. Wat was een?
7. **II7:** men was het niet met elkaar eens.
8. **II8:** ijsberen.
9. **II4:** het gebeurt.
10. **II10:** het komt niet terug.
11. **D:** het komt niet terug. [*Schrijft dit als derde punt op.*] Onomkeerbaar. En wat is een?
12. **II5:** dat het al over dertig of veertig jaar weg is.
13. **D:** ja, komt eerder dan verwacht.

Fragment uit de klassikale bespreking van de video over het smelten van de Noordpool.

Les 9: 5'

De leerlingen benoemen alle verwachte noties.⁶ De docent noteert de reacties op het bord (alleen het oneens zijn van de wetenschappers wordt niet herhaald), maar veegt de gevonden karakteristieken ook weer uit en tekent een Powersimdiagram van de aardlaag. De docent bespreekt vervolgens hoe dit model moet worden uitgebouwd tot een sneeuwmodel.

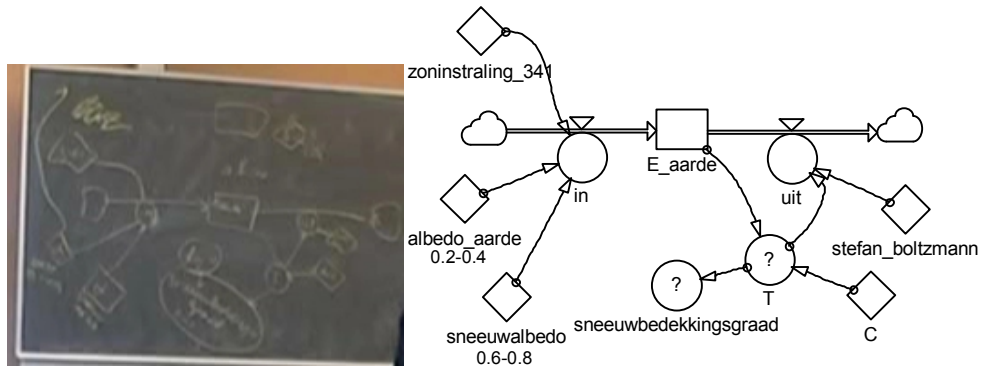
1. **D:** en hoe poets ik hier nou de sneeuw in? Want daar gaat het over.
Waar heeft..
2. **lln:** het albedo.
3. **D:** sst. Ik moet epsilon nog ergens hebben.
4. **lln:** maar die hoort bij de atmosfeer.
5. **D:** dus zijn we het er over eens dat die epsilon zich niet laat beïnvloeden door sneeuw?
6. **lln:** ja.
7. **D:** toen ik daar gisteren over nadacht, dacht ik dat is eigenlijk onzin, he [...] Maar goed, sneeuw en albedo. En hoe werkt dat dan? Ik mocht niet te veel zeggen.
8. **ll7:** hij weerkaatst meer.
9. **ll1:** meer sneeuw.
10. **ll7:** albedo gaat omhoog.
11. **D:** ja. Hoe dan?
12. **ll7:** met een pijl.
13. **ll10:** ja maar als er minder sneeuw komt gaat het albedo omlaag.
14. **D:** we hebben afgesproken, ik zal dit zeggen: er komen twee albedo's. Een is voor aarde. Als je hierboven ergens een albedo had voor de atmosfeer, dan haal je die weg. Want er waren bij sommigen twee verschillende en dan die [*albedo_aarde*] laat je dan linken hier naar toe [*P_in_zon*] en ook waar je hem daarboven nog hebt.

Fragment uit de klassikale bespreking van de sneeuwterugkoppeling. *Les 9: 8'*

De leerlingen benoemen de relatie tussen sneeuw en albedo en ze redeneren correct over (een deel van) het systeemgedrag (r. 2, 8-13). De docent tekent in het borddiagram een aantal van de benodigde modelementen. Het diagram, resultaat van de plenaire bespreking (zie Figuur 41), vormt het startpunt voor de leerlingmodellen; een belangrijk deel van het ontwerp van het Powersimmodel hoeven de leerlingen dus niet meer zelf te doen.

De docent laat de leerlingen klassikaal waarden schatten voor de albedo's van een sneeuwvrij en een sneeuwbedekt oppervlak. Voor beide komt een leerling met een enkele waarde (0,35 respectievelijk 0,8), waarna de docent een range op het bord zet (0,2-0,4 respectievelijk 0,6-0,8). Hij nodigt de leerlingen uit om zelf nog

⁶ Hetzelfde nieuwsbericht is in les 1 ook besproken, niet n.a.v. de video maar algemener "wat stond er in de krant over het klimaat de laatste tijd?". De leerlingen benoemden toen dit smelten van het ijs en twee karakteristieken: dat het snel gaat en dat het definitief verdwijnt.



Figuur 41. Bordschets van het Powersimdiagram voor het sneeuwmodel (rechts een reconstructie).

uit te zoeken wat een acceptabele range is. Hij introduceert het begrip sneeuwbedekkingsgraad en tekent deze in het modeldiagram op het bord. Leerling 1 benoemt dat deze afhangt van de temperatuur, waarop de docent hiertussen een relatiepijl tekent. De docent legt uit dat de sneeuwbedekkingsgraad een waarde tussen 0 en 1 kan aannemen en laat het aan de leerlingen over om deze op basis van de beide albedo's te definiëren. Vervolgens zet de docent de leerlingen aan het werk.

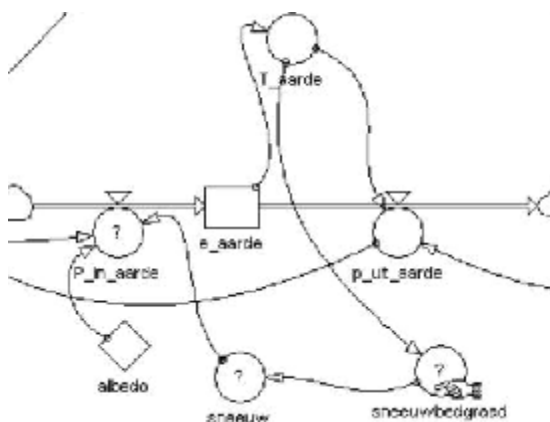
1. **D:** je moet met behulp van figuur 11 [in het lesmateriaal] moet je dit afleiden [wijst op sneeuwbedekkingsgraad] en dan moet je op basis van die [wijst op temperatuur] en die [wijst op sneeuwbedekkingsgraad] een link gaan maken naar die twee [wijst op beide albedo's] en dan... [gebaart naar instroom en E_{aarde}].

Fragment waarin de docent de opdracht geeft om het sneeuwmodel te bouwen. Les 9: 12'

In de opdrachtformulering ontbreekt een duidelijke onderzoeksdoelstelling. De instructie om de bedekkingsgraad te verbinden met de beide albedo's is ook niet zorgvuldig; indien opgevat als een albedowaarde zullen de albedo's variabelen worden in plaats van constanten. Een correcte interpretatie van het diagram is wel mogelijk als het albedo de betekenis krijgt van de bijdrage van het met sneeuwbedekte of sneeuwvrije oppervlak aan het totale albedo; dat blijkt echter niet uit de naamgeving.

Constructie van het sneeuwmodel door leerlingen 4 en 5

De leerlingen 4 en 5 breiden hun model uit op basis van het voorbeelddiagram op het bord. Overeenkomstig de opdracht van de docent bevat het de elementen 'sneeuwbedekkingsgraad' en 'sneeuw' (zie Figuur 42). Een verbinding tussen het reguliere (sneeuwvrije) albedo en de sneeuwbedekkingsgraad, dat immers ook het sneeuwvrije deel van het aardoppervlak definieert, ontbreekt. In het lesmateriaal is een figuur opgenomen waarin voor een aantal plaatsen op aarde de gemiddelde temperatuur is uitgezet tegen het gemiddelde aantal dagen sneeuw. De leerlingen specificeren de relatie tussen 'temperatuur' en 'sneeuwbedekkingsgraad' door de meetpunten uit die grafiek in Powersim te benaderen met een doorgaande grafieklijn



Figuur 42. Modeldiagram van leerlingen 4 en 5, met terugkoppeling door sneeuw. Het model is in les 8 gerund voor een voorspelling met een verwachte CO₂-concentratie in 2200.

(de grafiekfunctie *Graph*). Leerling 5 stelt vervolgens voor om de sneeuwbedekkingsgraad afhankelijk te maken van de temperatuur. Hij ziet dus niet in dat dit precies is wat ze zojuist gedaan hebben. Leerling 4 antwoordt dat de invoer nu klopt en er niets meer aan veranderd mag worden. Hier laten ze het bij; ze gaan door met het definiëren van het albedo.

Ze geven de variabele 'sneeuw' een constante waarde van 0.7, dus een gemiddelde uit de range voor

het sneeuw-albedo. Overeenkomstig het modeldiagram merkt leerling 4 op dat de variabele 'sneeuw' afhankelijk moet zijn van de sneeuwbedekkingsgraad. Leerling 5 beargumenteert dat de relatiepijl tussen de sneeuwbedekkingsgraad en het sneeuw-albedo weg moet: de waarde voor het sneeuw-albedo blijft constant, alleen de hoeveelheid sneeuw verandert. Hij stelt voor om de instroom 'P_in_aarde' afhankelijk te maken van de sneeuwbedekkingsgraad. De leerlingen wijken voor de constructie van het modeldiagram dus beargumenteerd af van de door de docent gemaakte schets en komen zo tot een weergave van het mechanisme dat in principe correct is gevisualiseerd.

De leerlingen specificeren in de instroom de bijdrage van de zoninstraling als $341 \cdot (1 - \alpha_s \cdot \text{Sneeuwbedekkingsgraad})$. Hun formule geeft correct weer hoe de albedo-bijdrage van het sneeuwbedekte aardoppervlak varieert met de sneeuwbedekking, maar ze hebben nog niet in rekening gebracht dat het sneeuwvrije oppervlak afneemt als de sneeuwbedekking toeneemt. Het runnen van het model geeft zo'n lage temperatuur ($T=155\text{K}$, nog niet in evenwicht) dat ze de hulp inroepen van de onderzoeker. Deze corrigeert de formule voor het gemiddelde albedo, waarna een nieuwe run een evenwichtstemperatuur van 233K oplevert. De leerlingen zijn in eerste instantie blij dat het warmer wordt dan in hun vorige run, maar denken nog steeds dat het model nog niet goed kan zijn met zo'n lage temperatuur. De onderzoeker doet de suggestie om het model te laten beginnen bij de evenwichtssituatie van 288K , om vervolgens uit te zoeken hoe ze in het model de sneeuw kunnen laten verdwijnen. De leerlingen besteden de rest van de les (ongeveer 5 minuten) aan het instellen van het model voor de bedoelde startsituatie.

Er zijn geen data van dit koppel beschikbaar uit les 10.

Constructie en onderzoek van het sneeuwmodel door leerlingen 2 en 3

De leerlingen 2 en 3 voeren een variabele ‘sneeuwbedekkingsgraad’ in en specificeren deze net als leerlingen 4 en 5 met behulp van de *Graph*-functie. De sneeuwbedekkingsgraad verbinden ze met een nieuwe variabele ‘sneeuw_albedo’. Deze wordt weer verbonden met de instroom van de aardlaag.

Met het bouwen en testen van hun model zijn deze leerlingen tot en met les 10 bezig. Het kost ze veel tijd om het gemiddelde albedo in de instroom correct te definiëren. De leerlingen proberen verschillende formules uit en gebruiken de modeluitkomsten om deze te beoordelen. Ze letten met name op de realiteitswaarde van de uitkomsten. Zo vinden ze eerst 352 K als resultaat, dit achten ze een te hoge waarde. Na een wijziging krijgen ze 259 K; dit is acceptabel want “logisch, want er zit meer sneeuw albedo in [het model]”. Na een verbetering door de onderzoeker van een van de verkeerde modelregels geeft het model 266 K en leerling 2 vindt dit “een mooie waarde”. De modelontwikkeling is dus niet ongericht, maar wordt onvoldoende gestuurd door overwegingen over de betekenis van de formules en van het diagram.

In tegenstelling tot leerling 5 stelt dit koppel het diagram niet ter discussie. Het diagram werkt nu contraproductief, maar het lijkt niettemin voor de leerlingen wel inzichtelijk te zijn want ze hebben zelf een duidelijk idee bij wat het diagram voorstelt: als de docent hun invoer controleert en constateert dat hun albedowaarden geen constanten zijn, is leerling 2 verbaasd dat dit moet want “het sneeuw albedo hangt toch af van de sneeuwbedekkingsgraad?”.

De leerlingen passen de albedowaarden en het modeldiagram aan, maar in de instroom blijft de hoeveelheid geabsorbeerde zoninstraling foutief gedefinieerd. Een modelrun geeft 273 K. Leerling 2 vindt dit nu te laag, maar de docent beargumenteert dat bij een ‘koude start’ het juist logisch is om een lage temperatuur te krijgen. Hoewel dit op zich waar is, is het resultaat in dit model juist veel te hoog om hiermee in overeenstemming te zijn. Leerling 3 suggereert om het model bij 273 K te laten beginnen. De docent geeft de aanwijzing dat de beginhoeveelheid energie dan 273 maal de warmtecapaciteit moet zijn. Een modelrun geeft een evenwichtstemperatuur van 198 K. Leerling 2 stelt dat het model niet goed kan zijn omdat het kouder wordt, waarop de leerlingen weer hun oude definities voor de albedowaarden invoeren: “meneer [de docent] is gewoon eigenwijs”.

De leerlingen willen nog eens proberen om het model niet op 0 K te laten beginnen en ze vragen de onderzoeker om hulp. Deze wijst er op dat de energievoorraad van de atmosfeer ook een zekere beginhoeveelheid moet krijgen. Deze definiëren ze bij verschillende waarden voor de warmtecapaciteit maar het model eindigt steeds met dezelfde evenwichtstemperatuur. De leerlingen vinden dat ze daarmee teveel sneeuw in hun model houden. De onderzoeker wijst er op dat het model niet bedoeld is om een precieze temperatuur te voorspellen en vraagt hen om het model te onderzoeken als ze de epsilonwaarde laten oplopen. Hij legt hen uit hoe ze dit kunnen doen. De leerlingen krijgen een model dat een wat hogere temperatuur voorspelt (en dus minder sneeuw). De leerlingen zijn hier tevreden over en geven aan te begrijpen wat het model doet.

Constructie en onderzoek van het sneeuwmodel door leerlingen 7 en 8

De leerlingen 7 en 8 bouwen voort op het model uit de derde cyclus, dus met een relatie tussen ϵ en de CO_2 -concentratie. Zij verbinden in hun modeldiagram aan de instroom een constante 'albedo_sneeuw' van 0.7 en een variabele 'sneeuwbedekkingsgraad'. Ze beredeneren hier zelf waarop de nieuwe variabelen van invloed zijn en volgen hierin niet de aanwijzing van de docent. Na 20 minuten hebben ze een werkend model.

Voor de definitie van de sneeuwbedekkingsgraad vragen ze zich af hoe ze deze een waarde tussen 0 en 1 moeten geven. De docent doet de suggestie om een lineair verband op te stellen als benadering voor de relatie tussen temperatuur en sneeuwbedekkingsgraad die in de grafiek in het lesmateriaal is uitgezet. Hoewel het enig programmeerwerk vergt om daarna het albedo goed te definiëren, is dit volgens de docent makkelijker dan om de grafiekfunctie van Powersim te gebruiken. De leerlingen slagen er bijna geheel zelfstandig in om een correct lineair verband op te stellen door de meetpunten in de gegeven figuur. In hun relatie is er geen sneeuw meer als de temperatuur hoger is dan 293 K. De onderzoeker helpt hen om het albedo correct vast te leggen.

De leerlingen rekenen hun model door en krijgen een sneeuwvrije aarde ($T=335$). De hoge temperatuur is het gevolg van de erg hoge waarde voor de CO_2 -concentratie, het eindpunt van hun scenario uit de vorige cyclus. De leerlingen zijn in eerste instantie tevreden met het resultaat, omdat het model ook na het toevoegen van de terugkoppeling dezelfde resultaten genereert als ervoor. Leerling 7 controleert met behulp van een tabel dat de sneeuwbedekkingsgraad inderdaad van 1 naar 0 afneemt. Leerling 8 is tevreden met het model, maar leerling 7 is nog niet klaar: "er is veel te weinig sneeuw". Hij wil dat er tot in elk geval 200 jaar voor het einde van looptijd (dus 200 jaar voor 2200) nog sneeuw ligt, omdat er nu ook sneeuw op aarde voorkomt. Ook wil hij dat het model uitkomt op 288 K. Leerling 7 bedenkt zelf dat de CO_2 -concentratie hun parten speelt. De docent suggereert om hiervoor de huidige waarde in te vullen. Een nieuwe modelrun levert een temperatuur van 298 K op. Leerling 7 is tevreden dat het resultaat realistischer is, maar vindt dat het model nog steeds lang sneeuwvrij is op het einde.

In het verdere verloop van de les probeert leerling 7 een realistische weergave van de temperatuur op aarde te krijgen, namelijk een weergave waarin het 200 jaar voor het einde 288 K en er een beetje sneeuw is. In de setup maakt hij daarom de looptijd tien keer zo klein. Dit resulteert in een temperatuur van 291 K. Het valt hem niet op dat het model nu niet meer in evenwicht eindigt; hij beoordeelt het model op z'n realiteitswaarde: "ja, er is nog sneeuw. Het is alleen nog iets te warm". Vervolgens rekent hij terug dat de looptijd nog maar 3 jaar voorstelt. Om dezelfde modelresultaten te krijgen bij een gewenste looptijd sleutelt hij aan de instellingen van de looptijd en de timestep, zonder echter het gewenste resultaat te bereiken.

Constructie van het sneeuwmodel door leerlingen 6 en 9

De leerlingen 6 en 9 volgen dezelfde aanpak als leerlingen 7 en 8, maar zij hebben meer moeite om de in te voeren relaties netjes te programmeren. Hieraan besteden ze het grootste deel van de les. In les 10 helpt de onderzoeker hen om een werkend model te krijgen, maar ze hebben geen tijd meer voor modelonderzoek.

Evaluatie

De eerste analysevraag is of er een motief wordt ontleend aan het getoonde journaalfragment om het model uit te breiden met sneeuwbedekking.

De leerlingen merken in het getoonde journaalfragment precies de bedoelde karakteristieken van het smelten op, zonder dat inhoudelijke sturing van de docent nodig is. Het videofragment dient dus z'n doel voor het ontwikkelen van de beoogde motivatie. Deze karakteristieken worden echter niet expliciet geproblematiseerd. We kunnen dus niet vaststellen in hoeverre de opgemerkte karakteristieken leiden tot een inhoudelijk motief.

De tweede analysevraag is of het modelleerproces betekenisvol verloopt.

De klassikale bespreking van het conceptueel model lijkt goed aan te sluiten bij de inzichten van de leerlingen; zij hebben duidelijk ideeën over de geïntroduceerde begrippen en de relaties daartussen en kunnen hiermee zelfstandig werken. Ook hebben de leerlingen een globaal idee van het versterkend effect van de terugkoppeling, al worden de consequenties voor het modelgedrag niet volledig beredeneerd.

Er wordt geen concrete onderzoeksvraag voor de episode geformuleerd, waardoor niet wordt aangestuurd op het onderzoeken van het modelgedrag en op het identificeren van bronnen van onzekerheid. De precieze instructie waarmee de docent de leerlingen aan het werk zet, wijst hen eerder de andere kant op. Het diagram op het bord geeft een globaal idee van wat de leerlingen moeten maken in Powersim, waarna de opdracht van de docent in feite luidt om de open eindjes af te maken. Omdat de beoogde gedragingen ook niet langer op het bord staan, is het goed te begrijpen dat deze gedragingen in het verdere verloop geen richtinggevende rol hebben. Uit de geobserveerde activiteiten blijkt dat het door de leerlingen nagestreefde doel is om zo natuurgetrouw mogelijk de toestand op aarde te 'reproduceren'. Het verloop is dus wellicht doelgericht geweest voor de leerlingen, maar het leerlingdoel stemde niet overeen met het ontwerp.

De derde analysevraag is of er productieve constructieruimte is gerealiseerd.

De leerlingen dragen productief bij aan de ontwikkeling van het conceptueel model aan de hand van het modeldiagram op het bord. De schatting van het sneeuwvalbede wordt sterk gestuurd door de docent. Niettemin laat hij expliciet ruimte voor andere keuzes van leerlingen (hoewel leerlingen deze ruimte niet benutten).

De meeste leerlingen bouwen een werkend sneeuwmodel. Het constructieproces verloopt grotendeels zoals verwacht, hoewel onvoorzien was dat veel leerlingen problemen hadden om een globaal-gemiddeld albedo te definiëren. Een van de oorzaken hiervoor is de aanwijzing van de docent in het borddiagram om de waarde voor het sneeuwvalbede afhankelijk te maken van de sneeuwbedekkingsgraad. Hoewel

de leerlingen nauwelijks in staat blijken om hun eigen modeldefinities te evalueren, zijn in het constructieproces van de drie koppels waarvan grotere datafragmenten beschikbaar zijn duidelijk momenten herkenbaar waarin zij zelfstandig en beargumenteerd beslissingen nemen t.a.v. de modelbouw, waarvan sommige afwijken van de sturing door de docent. In een aantal gevallen resulteert dit ook daadwerkelijk in een beter model. Wat betreft het ontwikkelen en bouwen van het model is de gewenste productieve constructieruimte dus inderdaad gerealiseerd.

De laatste analysevraag is of er aan het journaalfragment sturing ontleend wordt voor het modelonderzoek.

Zoals is opgemerkt worden de benodigde systeemgedragingen op basis van het fragment geïdentificeerd. Deze worden echter niet als onderzoeksdoelen centraal gesteld. Het is dan ook goed te begrijpen dat we bij geen van de leerlingen een oriëntatie zien op het onderzoek naar het modelgedrag. Het modelonderzoek komt dus niet van de grond, hoewel daartoe binnen de uitvoering wel mogelijkheden waren.

4.2.10 De mening van de leerlingen

Na afloop van de lessenreeks vullen negen leerlingen een soortgelijke enquête in als na de module over radioactief verval. De enquête bevat 23 items, waarvan 20 stellingen en drie open vragen. Bij de stellingen geven de leerlingen op een 5-puntsschaal weer in hoeverre zij het met de stelling (on)eens zijn.

In drie items, waarvan één open vraag, wordt de lessenreeks vergeleken met de reguliere lessen van de docent. De twee stellingen zijn opgenomen in Tabel 11. De lessen zijn niet noemenswaardig moeilijker dan de gewone lessen en het tempo ligt lager. Op de open vraag wat de docent in deze lessen anders deed dan in de andere natuurkundelessen antwoorden zes leerlingen dat er geen verschil is. Een leerling merkt op dat de docent vaker een andere rol heeft: die van discussieleider. Over het geheel genomen lijken de lessen dus een redelijke afspiegeling van de normale lespraktijk.

Tabel 11. Vergelijking met de reguliere lessen. Per item is het aantal reacties per antwoordmogelijkheid gegeven (1 = oneens, 5 = eens) en geheel rechts de gemiddelde score.

Item	1	2	3	4	5	$\bar{x}$
De lessen waren moeilijker dan de gewone natuurkundelessen.	-	1	5	2	1	3.3
Het tempo in de les lag hoger dan normaal.	1	4	3	1	-	2.4

Drie items, waarvan één open vraag, hebben betrekking op de interesse van de leerlingen voor de probleemstelling. Uit de stellingen (Tabel 12) blijkt dat het onderwerp goed aansluit bij de interesse van de leerlingen. Wel duurt de module voor een aantal leerlingen te lang.

De open vraag bij dit onderwerp is of de leerlingen na deze lessen anders naar de berichtgeving over klimaatmodellen kijken. De beoogde insteek op het modellerprobleem komt slechts bij één leerling terug: “ja, elk model kan weer iets anders als uitkomst geven. Het blijft lastig om precies te weten wat er met het

Tabel 12. Motiverend probleem. Per item is het aantal reacties per antwoordmogelijkheid gegeven (1 = oneens, 5 = eens) en geheel rechts de gemiddelde score.

Item	1	2	3	4	5	$\bar{x}$
Ik vond het interessant om de temperatuur op aarde te modelleren.	-	1	1	2	5	4.2
We hebben teveel lessen aan klimaatmodelleren besteed.	-	5	-	2	2	3.1

klimaat in de toekomst [gebeurt]”. Twee leerlingen kijken anders naar de berichtgeving “[want] ik kan nu kijken of het klopt”, hetgeen een behoorlijke overschatting is van de leeropbrengst maar zij proberen in elk geval een verbinding te maken met de lesstof. Het merendeel (5 leerlingen) reageert met “niet” of “een beetje”; zij leggen dus geen verbinding met de beoogde vraagstelling. Over het geheel genomen lijkt het onderwerp “klimaat” in brede zin dus redelijk aan te sluiten bij de interesses van de leerlingen, maar zoals ook al uit de evaluaties van het verloop bleek, is de precieze aanleiding om zelf te gaan modelleren niet opgepakt.

De helft van de stellingen heeft betrekking op betekenisvolheid, zie Tabel 13. Het algemene beeld daaruit is dat leerlingen een redelijke mate van samenhang ervoeren en de stof niet al te moeilijk vonden. In vergelijking met de module over radioactiviteit vonden de leerlingen de docent minder van de hak op de tak springen (nu 2.7, was 3.4) en hebben de leerlingen een duidelijker beeld van het vervolg van de les (nu 3.7, was 2.6). Het is opmerkelijk dat het merendeel van de leerlingen Powersim geen onbegrijpelijk programma (meer) vond, maar zich tegelijkertijd niet erg zeker toont hoe ze het moeten aanpakken om een computermodel te maken.

Tabel 13. Betekenisvolheid. Per item is het aantal reacties per antwoordmogelijkheid gegeven (1 = oneens, 5 = eens) en geheel rechts de gemiddelde score.

Item	1	2	3	4	5	$\bar{x}$
Ik vond het interessant om de temperatuur op aarde te modelleren.	-	1	1	2	5	4.2
We hebben teveel lessen aan klimaatmodelleren besteed.	-	5	-	2	2	3.1
De docent sprong van de hak op de tak.	-	6	-	3	-	2.7
Als we een computermodel gingen maken, was het me duidelijk hoe ik dat moest aanpakken.	1	3	2	3	-	2.8
De evenwichtstemperatuur voor de aarde zonder atmosfeer was moeilijk met de hand te berekenen.	-	-	5	4	-	3.4
Als we een computermodel gingen maken, was het me duidelijk wat dit model op moest leveren.	-	1	2	5	1	3.7
Powersim bleef voor mij een onbegrijpelijk programma.	2	5	-	2	-	1.8
De evenwichtstemperatuur voor de aarde mét atmosfeer was met de hand moeilijk te berekenen.	-	-	2	7	-	3.8
Na een klassikale bespreking had ik een duidelijk beeld van het vervolg van de les.	-	1	1	7	-	3.7
De opgaven uit het gebruikte boekje volgden logisch op elkaar.	-	2	3	2	2	3.4
Het effect van terugkoppeling door sneeuw was moeilijk te begrijpen.	1	6	1	1	-	2.2
Het computermodel van de aarde met sneeuw was moeilijk te bouwen.	-	3	3	1	2	3.2

Tabel 14. Constructieruimte. Per item is het aantal reacties per antwoordmogelijkheid gegeven (1 = oneens, 5 = eens) en geheel rechts de gemiddelde score.

Item	1	2	3	4	5	$\bar{x}$
Ik had veel inbreng tijdens de klassikale besprekingen.	1	-	2	5	1	3.6
Als ik een beschrijving heb van een klimaatproces dan kan ik er een Powersimmodel voor ontwerpen.	1	-	3	3	1	3.5
Ik had weinig invloed op het verloop van de les.	-	3	2	3	1	3.2

Over de (ervaren) constructieruimte zijn drie stellingen opgenomen, zie Tabel 14. De meeste leerlingen vinden dat ze zelf veel inbreng hebben gehad in de lessen. Desondanks zijn de leerlingen merendeels van mening dat ze weinig invloed hebben gehad op het lesverloop; dit is een verschuiving ten opzichte van de enquête na de radioactiviteitsmodule. Terwijl de leerlingen gedurende de lessenserie vaak niet goed wisten hoe ze een Powersimmodel moesten maken (zie Tabel 13), lijken de meeste leerlingen na afloop voldoende zelfvertrouwen te hebben om zelf Powersimmodellen te ontwerpen.

In de enquête is niet gevraagd naar de leeropbrengsten van de module. Hoewel een concreet leerdoel ook in de uitvoering niet is gemotiveerd, lijken de leerlingen het klimaat als context voldoende interessant te vinden. Over de samenhang zijn de leerlingen niet bijzonder positief of negatief; in ieder geval zijn ze hierover minder kritisch dan wij in onze analyse van het lesverloop waren. De ervaren constructieruimte is redelijk.

4.3 Conclusies

4.3.1 Evaluatie van de ontwerpherzieningen

De introductie van stapsgewijs rekenen

De radioactiviteitsmodule is ontworpen om numerieke integratie betekenisvol te introduceren. In 4.1.1 zijn enkele concrete doelen voor de module geformuleerd. De uitvoering van de module was echter niet zoals beoogd, waardoor het moeilijk is om een conclusie te verbinden aan het functioneren ervan. De belangrijkste evaluatievraag die resteert, is waarom de uitvoering niet verliep zoals gewenst was.

Gedurende de voorbesprekingen van de lessen stelde Chris steeds dat hij de voorgestelde activiteiten en de bedoeling daar achter begreep en zegde hij toe het onderwijs te zullen uitvoeren volgens het ontwerp. In de praktijk probeerde hij in de klassengesprekken vooral overeenstemming te bereiken over de juiste antwoorden op de opgaven. Het doel van de verschillende stappen en de motivatie voor de gemaakte keuzen werd nauwelijks gethematiseerd. We concluderen daarom dat er geen overeenstemming is bereikt tussen de docent en de onderzoeker over de betekenis van betekenisvolheid en de uitwerking daarvan in de onderwijspraktijk.

Een richtinggevende vraagstelling

In deze module moest een gewijzigde introductie er toe leiden dat niet de numerieke modeluitkomsten centraal kwamen te staan maar de onzekerheden in de modelvoorspellingen. Doordat de introductieactiviteit niet is uitgevoerd heeft deze oriëntatie het modellerproces niet kunnen sturen.

Het niet uitvoeren van de introductieactiviteit is een opvallend gebrek in de uitvoering. De meest plausibele reden hiervoor is gelegen in de samenloop van omstandigheden voor Chris op die bewuste dag. Voorafgaand aan de startles heeft hij een ingrijpend mentorgesprek waardoor hij niet geconcentreerd aan de les begint. Als hij dezelfde activiteit echter op een later moment moet doen (ter introductie op de laatste twee cycli), stemt de uitvoering nog steeds niet overeen met het lesplan. Hetzelfde geldt voor de introductie op het modelleren van de terugkoppeling door sneeuw. Het is voor de docent dus nog niet duidelijk geworden hoe deze activiteiten hadden moeten functioneren.

Een inzichtelijk specialisatiemodel

Ten opzichte van het eerste ontwerp zijn twee specialisatie-opdrachten achterwege gelaten om de leerlingbelasting te verminderen. De resterende cyclus over de terugkoppeling vereist de minste nieuwe fysicakennis en is het meest bruikbaar om het modelgedrag ten gevolge van positieve terugkoppeling te onderzoeken. Op basis van de bevindingen van het eerste ontwerp was het duidelijk dat dit onderzoek wel gericht moest worden; de leerlingen slaagden er immers niet in om de opvallende gedragingen te herkennen in hun eigen model. De video over het smelten van het poolijs diende om het modelonderzoek te richten zonder inhoudelijk te specificeren wat de leerlingen met hun model moesten doen.

Wat betreft het eerste punt lijkt het herontwerp goed geslaagd. Door de moeilijkste twee specialisatie-opdrachten weg te laten lijkt de module als geheel goed aan te sluiten bij de kennis van de leerlingen. Wat het tweede punt betreft: de getoonde video is bruikbaar om de gewenste opvallende gedragingen van tevoren te identificeren. Hoewel deze in de uitvoering niet richtinggevend zijn geworden voor het modelonderzoek, zijn daartoe wel mogelijkheden. Deze herziening beantwoordt dus aan haar doel.

Ruimte voor productieve leerlinginbreng

In het tweede ontwerp is er voor gekozen om het modellerproces procesmatig te sturen. In de eerste cyclus zijn nog inhoudelijke aanwijzingen gegeven, maar in de volgende cycli werd dit steeds minder. De benodigde informatie is ook niet direct in de tekst bij de opgaven terug te vinden, maar vereist het verwerken van de achtergrondinformatie. Met deze opzet beoogden we het noodzakelijk te maken dat de docent en de leerlingen in elke fase formuleren welke stappen nodig zijn en dat zij een nieuwe cyclus analoog uitvoeren aan de voorgaande. De docent heeft in deze versie dus een grotere verantwoordelijkheid voor het slagen van de onderwijsuitvoering dan in de voorgaande versie.

In vergelijking met de eerste ronde bleek het klassenproces inderdaad veel minder gestuurd te worden door het lesmateriaal. Niettemin krijgen we nog onvoldoende zicht op het functioneren van de nieuwe structuur. Bij het maken van de modelleeropdrachten nam de docent veelal het voortouw zonder de overwegingen te benoemen om een bepaalde stap te maken. Daardoor komt het doelgerichte karakter van het modelleerproces op veel plaatsen niet tot uitdrukking. Het is de vraag of de docent en de onderzoeker het uitgangspunt hierover (het belang van betekenisvol onderwijs) delen; in elk geval is het open lesmateriaal niet voldoende om de gebruikelijke klassencultuur in de gewenste richting te sturen.

Aandacht voor leerlijnen in het modelleerproces

Beoogd was dat de leerlingen meer zelfstandig (delen van) het modelleerproces zouden gaan uitvoeren naarmate de module vorderde, zoals de modelvorming en het maken van schattingen, maar ook het opstellen van de benodigde differentievergelijkingen en het bouwen van de Powersimmodellen.

Bij de temperatuurmodule hebben de leerlingen er enig profijt van dat ze al eerder kennisgemaakt hebben met Powersim. De transfer blijft echter oppervlakkig: leerlingen weten hoe ze met de diagraf-elementen moeten manoeuvreren, maar in het opstellen en implementeren van differentievergelijkingen zijn ze nauwelijks vaardig geworden. Hiervoor zijn meerdere oorzaken te geven. In de eerste plaats was met de module over radioactief verval al niet het gewenste leerdoel bereikt. Verder lagen de twee modules in de tijd enkele maanden uit elkaar. Ten derde is de overeenkomst tussen de twee situaties niet duidelijk besproken in de les. Wat de andere aspecten van het modelleerproces die een leerlijn moesten vormen betreft: in de praktijk wordt weinig teruggegrepen op de ervaringen in eerdere cycli. In het lesontwerp worden de mogelijkheden niet expliciet benoemd en ook in het lesverloop worden ze niet geïdentificeerd.

4.3.2 Conclusie over het herziene ontwerp

Met de doorgevoerde veranderingen in het ontwerp is het onderwijs in een aantal opzichten verbeterd ten opzichte van de eerste ronde, onder andere wat betreft de omvang van de module en de inbreng van leerlingen bij het construeren van de kwalitatieve modellen. Met de modules zijn twee ontwerpen voor modelleeronderwijs gerealiseerd waarin een causaal mechanisme ontwikkeld wordt om het gedrag van een systeem te verklaren, eerst in een schoolse context (radioactiviteit) en vervolgens ook voor het complexe klimaatstelsel (hoewel het resulterende temperatuurmodel ook fenomenologische relaties bevat). In de laatste worden de deelvragen en de daarbij ontwikkelde modellen steeds complexer maar het niveau en de inhoud lijken voor de leerlingen goed te doen. De wijzigingen in het ontwerp van deze tweede ronde hebben echter nog niet allemaal tot het gewenste resultaat geleid en de uitvoerbaarheid vormde voor de docent een probleem.

Leerlingen hebben in elke cyclus een aandeel gehad in het analyseren van het systeem en in het formuleren van verklaringen. Zij hebben dus bijgedragen aan de

vorming van kwalitatieve fysische modellen. Hoewel de benodigde fysische concepten een rol spelen in de leerlingenbijdragen zijn hun verklaringen echter vaak niet houdbaar. De conceptuele modellen werden daarom voortdurend herzien en aangescherpt maar dergelijke verbeteringen werden veelal niet inhoudelijk gemotiveerd, waardoor het effect van het model als een functionele representatie meestal niet herkenbaar was.

Voor elk te ontwikkelen model zijn de benodigde relaties opgesteld en modelwaarden bepaald; gedurende de uitvoering van de beide modules lag hier zelfs vaak de nadruk op. Leerlingen hebben dit slechts in beperkte mate zelfstandig gedaan. Toch hebben zij wel ruimschoots bijgedragen aan de plenaire activiteiten onder leiding van de docent.

Het modelonderzoek is beperkt tot het doorrekenen van een model, het vinden van een juiste waarde. Het testen van een model en het verkennen van de oplossingsruimte kwamen nauwelijks aan bod. Het identificeren van bronnen van onzekerheid heeft geen rol gespeeld in de motivering van de temperatuurmodule, waardoor ook het verkennen van de ranges in modeluitkomsten niet gebeurde: voor de docent lijkt het modelonderzoek geen aandachtspunt te zijn en (dus) voor de leerlingen ook niet.

De leerlingen hebben over het algemeen een duidelijk idee of het model aan haar doel beantwoordt, maar wat betreft de sturing en regulatie van het modelleringsproces hebben de leerlingen weinig tot geen inbreng gehad. De ervaring die de leerlingen met modelleren hebben opgedaan betreft dus vooral de construerende en uitvoerende aspecten van het proces.

Het onderwijsontwerp is dus nog niet uitontwikkeld. De procesmatige sturing en de ontwikkeling van leerlijnen in het materiaal zijn onvoldoende uit de verf gekomen. Is het ontwerp in de eerste ronde te veel dichtgetimmerd, het ontwerp in de tweede ronde biedt te veel openheid. Met name de docent is verantwoordelijk voor het welslagen van het modelleringsproces in de klas en dat lijkt te veel gevraagd. In een eventueel volgend ontwerp zou een aandachtspunt moeten zijn welke sturing voor de leerlingen en de docent noodzakelijk is om de gewenste didactische kwaliteit te realiseren en hoe deze sturing is vorm te geven.

5. Conclusies en discussie

In de eerste hoofdstukken van dit proefschrift hebben we bepleit dat “natuurwetenschappelijke modellerervaring” een plaats verdient in het voortgezet onderwijs, met het oog op burgerschap, studiekeuze en beroepsvoorbereiding. In hoofdstuk 2 gaven we een voorlopige omschrijving van wat die ervaring zou moeten inhouden, uitmondend in de identificatie van drie ontwerpdoelen: *natuurwetenschappelijke modelontwikkeling*, *betekenisvol voor leerlingen* en *productieve constructieruimte*, met bijbehorende ontwerprichtlijnen. Vervolgens hebben we op basis van deze uitgangspunten in twee onderzoeksronden geprobeerd de bedoelde modellerervaring in de klas te realiseren. In dit hoofdstuk beschouwen we opnieuw onze uitgangsvragen: wat moet een modellerervaring inhouden en hoe kan deze in het onderwijs vorm krijgen?

In paragraaf 5.1 bespreken we de gestelde ontwerpdoelen. Voor ieder van deze doelen gaan we na in hoeverre de ontwerprichtlijnen uit hoofdstuk 2 vorm hebben gekregen, op welke problemen we zijn gestuit en of de doelen en de richtlijnen aangepast moeten worden. In paragraaf 5.2 bespreken we de implicaties van ons werk voor (vervolg)onderwijs en vervolgonderzoek.

5.1 Hoe kan modellerervaring in het voortgezet onderwijs vorm krijgen?

Onze onderzoeksvraag luidde: hoe is voor leerlingen in het voortgezet onderwijs modellerervaring vorm te geven die bruikbaar is voor competentieontwikkeling? Om deze vraag te kunnen beantwoorden hebben we de kenmerken van de gewenste modellerervaring eerst nader gespecificeerd in drie ontwerpdoelen: één ten aanzien van de gewenste inhoud (natuurwetenschappelijke modelontwikkeling) en twee ten aanzien van het gewenste proces (betekenisvol voor leerlingen en productieve constructieruimte). In deze paragraaf bespreken we wat we wijzer zijn geworden ten aanzien van de ontwerprichtlijnen voor elk van deze doelen.

5.1.1 Natuurwetenschappelijke modelontwikkeling

Een eerste vereiste voor een didactisch productieve natuurwetenschappelijke modellerervaring is dat het onderwijs een valide afspiegeling biedt van het modellerproces zoals dat in de natuurwetenschappelijke praktijk verloopt. Weliswaar zal dit beeld beperkt en onvolledig zijn, maar het mag in ieder geval geen vals beeld zijn. Dat betekent dat het proces dat de leerlingen doorlopen verenigbaar moet zijn met de essentiële kenmerken van het natuurwetenschappelijk modellerproces.

We hebben in hoofdstuk 2 een groot aantal kenmerken van natuurwetenschappelijke modellerprocessen in het algemeen besproken, die we uiteindelijk hebben samengevat in één hoofdkenmerk, namelijk dat natuurwetenschappelijk modelleren een doelgericht en iteratief probleemoplosproces is. Dit houdt in dat de vraagstelling de activiteiten stuurt, dat veelal meerdere cycli doorlopen worden en dat iedere iteratie

eindigt met de evaluatie van het tot dan toe bereikte resultaat en – eventueel – een bijgestelde vraag voor de volgende cyclus. Een belangrijke heuristiek daarbij is: begin met een sterk versimpeld model en voeg vervolgens details toe voor zover deze voor het beantwoorden van de vraagstelling relevant zijn. Dit proces speelt zowel kleinschalig (de individuele onderzoeker in een enkel project) als grootschalig (de wetenschappelijke gemeenschap met specialisaties, congressen, etc.). Uit de in hoofdstuk 2 besproken ontwerpstudies blijkt dat dit kenmerk in veel modelleeronderwijs niet tot uitdrukking komt.

We verwachtten dat het, voor het vormgeven van een dergelijk probleemoplosproces, noodzakelijk was dat de leerlingen gedurende langere tijd aan een rijk probleem konden werken, zodat ze vertrouwd konden raken met de probleemcontext en ze meerdere modeliteraties konden realiseren. Daarbij moest in ieder geval het globale doel begrijpelijk zijn zonder dat daarvoor specifieke vakkennis nodig is. Bovendien vonden we het van belang dat de leerlingen niet bij voorbaat de gehele te volgen oplosroute kunnen overzien: iedere modeliteratie moest immers voortvloeien uit evaluatie van de resultaten tot dan toe. Tenslotte is het, om een samenhangende (doelgerichte) modelleerervaring te kunnen realiseren, van belang dat de benodigde domeinkennis al aanwezig is of op een terloopse manier kan worden verworven in de loop van het modelleerproces.

We hebben ons in dit onderzoek specifiek gericht op het computerondersteund modelleren van complexe dynamische systemen. Deze inperking leidde tot een tweede hoofdkenmerk van het gewenste modelleerproces, namelijk dat het gedrag van een complex dynamisch systeem voorspeld en verklaard wordt op basis van een kwantitatief model van een causaal mechanisme. Bij het doen van voorspellingen op basis van zo'n model ontstaan allerlei onzekerheden. Voor een typisch complex systeem zal het causale mechanisme nooit volledig beschreven zijn in het model. De gedane voorspellingen berusten dus op een onvolledige beschrijving van het systeem. Voor het doen van een kwantitatieve voorspelling is het nodig dat de grootheden en de relaties tussen de grootheden in het model gekwantificeerd worden. Zowel de invoerwaarden als de modelparameters zullen een beperkte nauwkeurigheid hebben. Tenslotte kunnen er mechanismen in het systeem zitten die leiden tot zichzelf versterkende veranderingen en eventueel tot chaotisch gedrag. Al deze factoren gezamenlijk leiden tot onzekerheden in de gevonden uitkomsten en in sommige gevallen zelfs tot onvoorspelbaar of beperkt voorspelbaar systeemgedrag. De modevaluatie dient daarom om een oordeel te vellen over de betrouwbaarheid van de resultaten.

Als context kozen we voor het modelleren van klimaatveranderingen. Ten eerste omdat het een prototypisch voorbeeld is van een complex dynamisch systeem; ten tweede omdat de benodigde fysische concepten grotendeels tot de voorkennis behoorden en tenslotte omdat er in de periode dat dit onderzoek werd uitgevoerd nationaal en internationaal heftige discussies werden gevoerd over het al dan niet optreden van klimaatveranderingen. We verwachtten dat de leerlingen gemotiveerd zouden zijn om, gegeven de veelheid aan alarmerende danwel geruststellende voorspellingen op dit gebied, uit te zoeken hoe klimaatvoorspellingen tot stand komen.

Tabel 15. De relatie tussen motieven en daaruit voortvloeiende modelleeractiviteiten in het tweede ontwerp. Het doorlopen van de modelleercyclus is in de linkerkolom aangegeven met een 'wiel' dat de vier modelleerfasen representeert.

	Modelleeractiviteiten	Motief
<i>Episode 1</i> 	vormt de aanleiding om in een eigen modelleerproces te onderzoeken wat de temperatuur op aarde zal worden,	Willen weten waardoor de gerapporteerde onzekerheid in klimaatvoorspellingen kon toenemen terwijl de modellen realistischer geworden zijn die om greep te krijgen op het systeem eerst ingeperkt wordt tot het begrijpen van de huidige globaal gemiddelde temperatuur
<i>Episode 2</i> 	waarvoor een eerste model ontwikkeld wordt, waarin alleen rekening gehouden wordt met de zonne-instraling en met uitstraling	dat leidt tot de conclusie dat het model uitgebreid moet worden teneinde een acceptabele waarde voor de temperatuur te voorspellen
<i>Episode 3</i> 	waarvoor het model wordt uitgebreid met een atmosfeerlaag	dat leidt tot de conclusie dat een computer nodig is om het modelgedrag van een dergelijk gecompliceerd systeem goed te kunnen onderzoeken
<i>Episode 4</i>	waarvoor het tot dusver ontwikkelde kwalitatieve model geïmplementeerd wordt in het modelleerprogramma Powersim	hetgeen leidt tot de conclusie dat het model voldoet om de huidige temperatuur te begrijpen zodat nu ook veranderende omstandigheden gemodelleerd kunnen worden t.b.v. een toekomstvoorspelling
<i>Episode 5</i> 	waarvoor het model uitgebreid wordt met een in de tijd variërende CO₂-concentratie	dat leidt tot de conclusie dat de gemodelleerde bronnen van onzekerheid niet voldoende verklaren dat de onzekerheid kan toenemen als het model realistischer wordt gemaakt zodat ook een ander type verandering gemodelleerd moet worden
<i>Episode 6</i> 	waarvoor het model uitgebreid wordt met een dynamische terugkoppeling t.g.v. temperatuurafhankelijke sneeuwbedekking	waarna positieve terugkoppeling als bron voor toenemende onzekerheid te identificeren is.

Gegeven de randvoorwaarden hebben we het probleem ingeperkt tot het voorspellen van de globaal gemiddelde temperatuur over tweehonderd jaar. Het doen van een betrouwbare voorspelling voor de temperatuur over tweehonderd jaar valt natuurlijk buiten het bereik van het onderwijs, maar we verwachtten dat dit doel richtinggevend kon zijn voor een doelgericht modelleerproces dat zicht geeft op de werkwijze van klimaatwetenschappers. Losweg gebaseerd op de geschiedenis van het vakgebied ontwierpen we een reeks modellen van oplopende complexiteit, waarbij iedere modeluitkomst een motief kan verschaffen voor de volgende modeliteratie (zie Tabel 15). De fysische domeinkennis waarop een beroep werd gedaan behoorde, met uitzondering van de stralingswet van Boltzman, tot de reeds behandelde leerstof en we verwachtten dan ook het proces zo te kunnen uitlijnen dat nieuwe inhoud daar aan bod komt waar deze nodig is.

Vakinhoudelijk hadden we, binnen de context van klimaatmodelleren, dus veel vrijheid om onze modelsituaties zo te kiezen dat ze in een doelgericht modelleerproces op elkaar konden volgen. Deze keuzevrijheid werd echter wel beperkt door onze ontwerpdoelen ten aanzien van het gedrag van complexe dynamische systemen. Als gevolg daarvan bleken modelleerkeuzen nodig die niet eenduidig voortvloeiden uit de evaluatie van het voorafgaande. Voorbeelden zijn de introductie van het computermodel om het 1-laagsmodel door te rekenen en de keuze voor het model van de sneeuwwereld in de laatste modeliteratie. De taak van de docent om in gesprek met de klas tot de juiste keuze te komen werd daardoor verzwaard.

Het tweede kenmerk dat tot uitdrukking moest komen in het onderwijs is dat het gedrag van een complex dynamisch systeem voorspeld en verklaard wordt op basis van een kwantitatief model van een causaal mechanisme. Het 1-laagsmodel waarmee we begonnen is een duidelijk voorbeeld van een verondersteld causaal mechanisme. Naarmate het model verder uitgebreid werd, moest er, in overeenstemming met de wetenschappelijke praktijk, vaker gewerkt worden met fenomenologische verbanden zoals voor de relatie tussen de temperatuur aan het aardoppervlak en de sneeuwbedekkingsgraad. De oorspronkelijke notie dat een model gebaseerd is op een causaal mechanisme behoeft dus nuanceren: in de praktijk van het klimaatmodelleren gebruikt men hybride modellen.

Hoewel het klimaat bij uitstek een complex dynamisch systeem is, bleek het binnen de gekozen context moeilijk om het dynamisch gedrag van complexe modellen te thematiseren. De globale probleemstelling, gericht op het voorspellen van de evenwichtstemperatuur over tweehonderd jaar, gaf wel aanleiding om allerhande onzekerheden te thematiseren, maar veel minder om de dynamiek van de gevonden modellen te onderzoeken. De 1- en 2-laagsmodellen zijn geschikt om het mechanisme achter de evenwichtstemperatuur kwantitatief te beschrijven. Het dynamische gedrag van deze modellen heeft weinig realiteitswaarde, mede omdat er geen vaste waarde voor de warmtecapaciteit van het aardoppervlak te geven is. Ook de scenariostudies en het sneeuwmodel zijn gericht op (de verschuiving van) evenwichtswaarden. Het dynamische gedrag van deze modellen zou wel kwalitatief onderzocht kunnen worden, maar de gekozen focus op realistische

parameterwaarden en uitkomsten gaf daartoe weinig aanleiding, temeer omdat de parameterwaarden die dáárvor nodig zijn (zoals de warmtecapaciteit van de aarde) soms niet zinvol te bepalen zijn.

Bij het onderzoeken van dynamisch modelgedrag stuitten we ook op conflicterende eisen aan de te gebruiken modellen. Het betrouwbaar voorspellen van een temperatuur vereist realistische modellen en correcte parameterwaarden, terwijl voor het kwalitatief begrijpen van dynamisch modelgedrag juist sterk vereenvoudigde “toy models” nodig zijn, zoals bijvoorbeeld het model van de sneeuwwereld. De resultaten van beide typen modellen moeten op een verschillende manier geïnterpreteerd worden. Ook verloopt het modelonderzoek in beide gevallen anders en zijn beide typen modellen niet zinvol te koppelen tot één totaalmodel omdat het resulterende model dan noch realistisch, noch inzichtelijk is. Om modelgedrag te onderzoeken lijkt het verstandig om voor complexe systemen radicaal de stap te maken naar kwalitatieve toy models (en dus niet ook realistische uitkomsten na te streven).

Onvoorspelbaar systeemgedrag is beperkt gebleven tot een enkele positieve terugkoppeling waarmee een sprong tussen twee evenwichtsregimes gevonden kan worden. Chaotisch gedrag bleek niet binnen het bereik van het lesontwerp te liggen. Ten eerste doordat de beschikbare tijd op ging aan het modelleren van de basismechanismen en ten tweede doordat chaoticiteit in deze context, met de gegeven voorkennis en met de beschikbare tools, lastig te onderzoeken is (daarvoor zouden bijvoorbeeld de Lyapunov-exponent of Poincaré-plots nodig zijn). In een vervolgmodule zouden chaosmodellen alsnog aan de orde kunnen komen. Chaoticiteit kan in de klas geïntroduceerd worden met behulp van eenvoudige experimentele opstellingen (zoals de dubbele slinger of een magnetische slinger met drie attractoren) die chaotisch gedrag vertonen (Duit & Komorek, 1997). Voor het modelleren van chaos lijkt het – in overeenstemming met het bovenstaande – verstandig gebruik te maken van toy models.

We verwachtten dat we samenhangende modelleerervaring zouden kunnen realiseren door de benodigde vakinhoud op een need-to-know-basis aan te bieden, geïntegreerd in een authentiek modelleerproces. De nieuwe fysische begrippen konden goed ingepast worden in het verloop van het onderwijsproces. Het onderzoeken en doorrekenen van numeriek gedrag bleek echter te groot om ‘just-in-time’ te introduceren binnen de context van het klimaatmodelleren. In de eerste versie van het ontwerp kreeg dit onderwerp daardoor onvoldoende aandacht en bleven allerlei misverstanden over de modelleertool hardnekkig voortbestaan. Om die reden is in de tweede ronde een aparte module gemaakt met een nieuwe, eenvoudiger context om Powersim te leren kennen. Deze aanpak was in zoverre succesvol dat er binnen deze context geen problemen optraden met het bouwen van het computermodel en dat leerlingen in de temperatuurmodule bekend waren met de basale ‘klik- en sleephandelingen’. Er was echter nog geen sprake van dat opbrengsten van de radioactiviteitsmodule inzichtelijk werden toegepast in de laatste module; daarvoor is in de uitvoering van de radio-

activiteitsmodule onvoldoende gelegenheid geweest om te oefenen en is de bruikbaarheid van die inzichten onvoldoende gethematiseerd in de temperatuurmodule.

Samenvattend concluderen we dat, gegeven de voorkennis van de leerlingen, de inhoudelijke doelen en de procesdoelen die we hadden met betrekking tot natuurwetenschappelijke modelontwikkeling elkaar in de weg zaten. Om een natuurwetenschappelijk modelleerproces vorm te geven in het onderwijs is het dan ook belangrijk om niet alleen de verschillende doelen te onderscheiden maar deze ook van elkaar te scheiden in verschillende modules. Het historisch verloop van het wetenschappelijk proces lijkt nog steeds een geschikt uitgangspunt om de aard van het modelleerproces inzichtelijk te maken. In combinatie met grote inhoudelijke leerdoelen wordt het resulterende proces echter te complex. Het lijkt dan aan te bevelen theoriegenererend modelleren te onderscheiden van theorietoepassend modelleren. Voor het eerste lijken schoolse contexten zoals in de module van het radioactief verval beter geschikt. Inhoudelijke leerdoelen kunnen eveneens verdiepende en abstraherende onderwerpen zijn, zoals modelstructuren, rekenalgoritmes of foutenanalyse.

5.1.2 Een betekenisvol proces

We zijn in zoverre tevreden met het gerealiseerde onderwijs dat dit niet onder lijkt te doen voor het gangbare natuurkundeonderwijs. De klimaatexperts waren van oordeel dat het – voor het onderwijs nieuwe – onderwerp inhoudelijk goed was uitgewerkt en het docentenpanel meende dat het ontwerp uitvoerbaar was. In de uitvoeringen hebben zowel leerlingen als docenten met inzet en enthousiasme deelgenomen aan het ontwikkelde onderwijs. De onderwijsuitvoeringen voldeden echter niet goed aan de doelen ten aanzien van de didactische kwaliteit.

Om te kunnen spreken van een modelleerervaring voor leerlingen is het niet voldoende dat het ontworpen modelleerproces vanuit natuurwetenschappelijk oogpunt valide is; het proces moet ook betekenis krijgen voor de leerlingen. Een betekenisvol proces is gedefinieerd als een proces waarin:

- leerlingen inzicht hebben in het doel;
- leerlingen inzien hoe de te ondernemen activiteiten bijdragen aan het bereiken van het gestelde doel;
- vakinhoudelijke noties op basis waarvan keuzes en beslissingen genomen worden, overeenstemmen met leerlingideeën.

Betekenisvolheid en inzichtelijkheid zijn als kenmerken van het individuele mentale proces niet direct waarneembaar. Op groepsniveau daarentegen blijkt een betekenisvol proces uit een samenhangend discours, uit het bereiken van consensus of het vaststellen van meningsverschillen en uit het verrichten van doelmatige handelingen.

Zo'n betekenisvol proces op groepsniveau vereist dat de leerlingen actief deelnemen en ook streven naar een oplossing voor het probleem dat aan de orde is. Door de contextkeuze van het klimaat en radioactiviteit verwachtten we een inzichtelijk klassengesprek en het formuleren van verwachtingen te kunnen

ondersteunen, omdat we meenden dat de leerlingen hierover voldoende zouden weten en de contexten hen zouden boeien. Dit laatste bleek zeker bij de klimaatcontext het geval; de radioactiviteitscontext leidde tot minder betrokkenheid.

We verwachtten een betekenisvol proces te kunnen bevorderen door middel van klassengesprekken waarin leerlingen deelnemen aan het vaststellen van een modelleerdoel en –aanpak en waarin leerlingen verwachtingen formuleerden die richting konden geven aan het modelonderzoek. In het onderwijsontwerp zijn klassengesprekken gepland aan het begin en aan het einde van iedere modelleercyclus, omdat daar de modelkeuzes worden gemaakt en beoordeeld.

In de eerste versie van het ontwerp ontstond bij de ene docent (Dirk) wel een samenhangend betoog, maar de deelname van de leerlingen hieraan was minimaal. Ook als de docent wel om leerlinginbreng vroeg, kwam er weinig respons. De leerlingen kwamen wel verder dan bij de andere docent (Chris), waar de leerlingen veelvuldig deelnamen aan het gesprek maar het gesprek vaak alle kanten uitwaaierte. De docent werd blijkbaar verrast door de leerlingbijdragen en had onvoldoende instrumenten in handen om aan de leerlingbijdragen een productieve wending te geven. De protocollen suggereren dat de docent ook bij zijn eigen modelleerhandelingen het doel niet altijd scherp voor ogen had. Dit probleem werd natuurlijk versterkt door de onvolkomenheden in het ontwerp van de eerste versie. Uiteindelijk moest de docent dan alsnog de gezochte conclusies poneren. Bij beide docenten bleek bovendien dat ook de eerste versie van het leerlingmateriaal, waarin alle belangrijke stappen expliciet uitgewerkt waren, een betekenisvolle discussie in de weg staat doordat leerlingen vooruit bladeren en daar zonder argumentatie de gezochte antwoorden vandaan halen.

Om te kunnen concluderen dat een betekenisvol klassenproces gaande is, wilden we dat de leerlingen en de docent hun bijdragen afwegen in het licht van het gestelde doel. In het herziene ontwerp hebben we geprobeerd dit te bereiken in de klas van Chris. Wij vermoedden dat het beter haalbaar zou zijn om meer sturing te realiseren in de klas van Chris dan meer leerlingbijdragen in de klas van Dirk, hetgeen een belangrijke reden was voor onze keus om met Chris een herzien onderwijsontwerp te testen. We hebben in de tweede ronde het lesmateriaal grondig aangepast door de inhoudelijke keuzen zoveel mogelijk door de leerlingen zelf te laten invullen. Om de docent te ondersteunen bij het gebruik maken van de leerlinginbreng is in de docentvoorbereiding bovendien veel aandacht besteed aan goede en slechte voorbeelden, door fragmenten uit de eerste ronde te bespreken en door een deel van het herziene ontwerp voor te doen. In de uitvoering van het tweede ontwerp verliepen de klassikale besprekingen echter nog steeds onvoldoende doelgericht. Met betrekking tot de rol van de docent in deze gesprekken lijkt het er op dat de docent zowel op globaal als op lokaal niveau onvoldoende zicht heeft gehad op de structuur van het ontwerp. Op de hoofdlijn van het ontwerp maakt hij bijvoorbeeld geen eerste inperking naar een aarde zonder atmosfeer. Op detailniveau maakt de docent bijvoorbeeld een realistisch plaatje van de situatie in plaats van een diagram dat de gemaakte keuzes en relaties tussen grootheden uitdrukt – de functie

van de diverse elementen in het diagram lijkt voor de docent zelf nog onduidelijk. Het gewenste klassenproces is dus niet gerealiseerd omdat de docent teveel verantwoordelijkheid heeft gekregen voor het te realiseren proces en de inhoudelijke sturing in het lesmateriaal teveel is verminderd. Een minder radicale uitwerking is wellicht beter bruikbaar.

Overigens laten de leerlingenenquêtes een minder negatief beeld zien wat betreft de temperatuurmodule: de door hen ervaren samenhang is redelijk. Hoewel de gerealiseerde samenhang niet de diepgang heeft die gewenst is, is het wel van belang op te merken dat het proces naar het oordeel van de leerlingen overeenstemt met een natuurwetenschappelijk modelleerproces.

Om gericht modelonderzoek te kunnen doen is het nodig dat de leerlingen voldoende concrete verwachtingen hebben over de modeluitkomsten. Leerlingen waren in staat dergelijke verwachtingen te formuleren als er naar gevraagd werd maar in de latere opdrachten, waar niet expliciet naar verwachtingen gevraagd werd, formuleerden ze deze ook niet. Waar wel verwachtingen werden geformuleerd waren deze vaak vooral gericht op de kwantitatieve uitkomst. Het formuleren van verwachtingen in termen van een boven- en ondergrens was niet vanzelfsprekend. De verwachtingen over systeemgedrag waren vaak te algemeen om sturing te bieden bij het modelonderzoek. Daardoor werd bijvoorbeeld de hystereselus in het sneeuwmodel door veel leerlingen pas geproduceerd nadat ze gerichte aanwijzingen gekregen hadden over waar ze naar moesten zoeken.

Het formuleren van verwachtingen werd verder bemoeilijkt door voorkennisproblemen, zowel op het gebied van dynamisch modelgedrag als op het gebied van temperatuur en warmte als wat betreft de voorstelling van het broeikaseffect (overeenkomstig bijvoorbeeld Van der Valk, 1992; Ekborg & Areskoug, 2006). Dit gebrek aan verwachtingen is een essentieel onderscheid tussen leerlingen en professionele onderzoekers. Het lijkt niet goed mogelijk dit probleem volledig binnen de context van het modelleerproces op te lossen. In aanvulling daarop zouden in een voorbereidende module verschillende typen systeemgedrag gethematiserd kunnen worden (vgl. Hestenes (1987) over mechanica en Fuchs (1997) over systeemdynamica). Op het gebied van warmte en energie zouden leerlingen ook profijt hebben van heuristieken om ‘theorietoepassend’ te modelleren. Door dergelijke richtlijnen expliciet te maken heeft de docent een inhoudelijke toetssteen voor leerlingenbijdragen en biedt het de leerlingen een ‘beschrijvingstemplate’ voor een causaal mechanisme.

Samenvattend concluderen we dat het vorm geven van een voor leerlingen betekenisvol modelleerproces sterk beïnvloed wordt door de klassencultuur. In een directieve aanpak, met de docent als ‘voorbeeld-modelleerder’, kunnen de leerlingen geavanceerde modellen ontwikkelen, maar hun eigen ideeën over het te modelleren systeem en over de geschikte aanpak blijven dan buiten beeld. Voor een meer leerlinggerichte aanpak is het van cruciaal belang dat de inbreng van leerlingen zorgvuldig geëvalueerd wordt, om de te maken keuzes te kunnen motiveren en zodoende de doelgerichtheid van die keuzen zichtbaar te maken. Om dat te kunnen

doen, moet de docent in ieder geval zelf het benodigde modelmechanisme scherp voor ogen hebben. Om een productief discours te realiseren, waarin voortgebouwd kan worden op de bijdragen van leerlingen, is het bovendien van belang dat de kennisbasis van de leerlingen ten aanzien van basisbegrippen onproblematisch is en dat ze in staat zijn deze begrippen in een nieuwe situatie toe te passen. Daarvoor is het niet voldoende dat het onderwerp in het lesprogramma aan bod is geweest: om de vakbegrippen flexibel inzetbaar te maken zal ook in het voorbereidende onderwijs sprake moeten zijn van een modelgerichte aanpak, waarbij aandacht besteed wordt aan structuren en richtlijnen die bruikbaar zijn om in een bepaald domein te modelleren.

5.1.3 Productieve constructieruimte

Om te kunnen spreken van modelleerervaring moet er, naast het beleven van een betekenisvol modelleerproces ook sprake zijn van het zélf verrichten van modelleerhandelingen binnen dat proces. Het is dan ook duidelijk dat leerlingen zelf aan de slag moeten. Productieve constructieruimte is gedefinieerd als de situatie waarin

- een keuze, aanname, beslissing of evaluatie gemaakt wordt op basis van leerlingenbijdragen;
- leerlingen hun bijdragen onderbouwen (dat is: zij nemen er verantwoordelijkheid voor) omdat de uitkomst consequenties heeft voor het vervolg (dat is: de leerlingen hebben een reden om er verantwoordelijkheid voor te nemen).

Het maken en evalueren van schattingen vormde een belangrijk aandachtspunt in het onderwijsontwerp. We verwachtten dat leerlingen verantwoordelijkheid zouden nemen voor hun eigen modelkeuzes. Om de evaluatie van door leerlingen gemaakte beslissingen serieus te nemen werken de leerlingen aan problemen waarvan de uitkomst niet op voorhand vaststaat en is er geen antwoordenboekje. Door aan een complex model te werken dat meerdere iteraties behoeft, verwachtten we dat leerlingen geleidelijk aan meer zelfstandig en vaardiger een modelleerproces doorlopen.

In het ontwerp krijgt productieve constructieruimte vorm door leerlingen individueel of in groepjes uitvoerende taken te geven. Uit de eerste ronde blijkt dat leerlingen op uitvoerend niveau redelijk door de stof komen. In de herziene temperatuurmodule, als zij steeds meer zelfstandig een modelleercyclus moeten uitzetten, blijken zij niet zelf te identificeren wat er nodig is. Ook sturen zij hun eigen modelonderzoek niet zelf; zij beschikken daartoe over onvoldoende verwachtingen. Overigens is de opzet uit de tweede ronde om op voorhand verrassende gedragskenmerken te laten benoemen op basis van een video van het onderwerp, in potentie bruikbaar gebleken.

In het ontwerp van de eerste ronde resulteerden de puntschattingen van alle leerlingen gezamenlijk in een onzekerheidsrange. In het tweede ontwerp maakten leerlingen intervalschattingen zodat elke leerling ook verantwoordelijkheid kon nemen voor de modelkeuzes die hij zelf plausibel achtte. Over het algemeen konden

de leerlingen met argumenten onder- en bovengrenzen geven voor een benodigde parameter. Zij hadden dus voldoende inzicht in het doel van de schattingen en konden met de aangereikte informatie uit de voeten. Het is echter niet goed gelukt om de leerlingen ook echt verantwoordelijk te maken voor hun eigen modelkeuzes. Beoogd was dat verschillende modeluitkomsten in het klassenproces naast elkaar kunnen staan als het gevolgde proces en de gemaakte keuzes helder zijn; leerlingen dragen dan ook verantwoordelijkheid voor hun eigen modelkeuzes. Argumenten en evaluaties van de schattingen speelden echter nauwelijks een rol in de modevaluaties omdat de onzekerheid in modelvoorspellingen onvoldoende gethematiseerd werd. We zien herhaaldelijk dat de docent bevestigt dat een schatting of een modeluitkomst (niet) goed is zonder aandacht te besteden aan de werkwijze die tot het antwoord heeft geleid. Ook de leerlingen wensen vooral te horen of hun uitkomsten goed zijn maar verantwoorden niet zozeer hun werkwijze.

De behoefte aan bevestiging is goed te begrijpen, zeker gegeven dat het modelleerproces een gecompliceerd proces is waarin voortdurend voortgebouwd wordt op eerdere bevindingen. Al tijdens de ontwikkeling van de modelleermodules drongen de docenten er op aan dat antwoordenboekjes voor de leerlingen beschikbaar zouden zijn om hen de bevestiging te geven dat ze op de goede weg zijn. Behalve door een antwoordenboekje beschikbaar te stellen kan de docent bijvoorbeeld ook een controleberekening laten uitvoeren waarin iedereen met zelfde getalswaarden werkt en dus op dezelfde uitkomst moet uitkomen, of verschillende leerlinguitkomsten met elkaar vergelijken door de verschillende modelkeuzes te benadrukken die aan de verschillende modellen ten grondslag liggen.

Toenemende modelleervaardigheid zou in de opeenvolgende cycli moeten blijken doordat leerlingen steeds zelfstandiger de verschillende modelleerstappen doorlopen. Dit wordt niet zichtbaar, waarvoor verschillende redenen zijn aan te voeren. Ten eerste is de omvang van de module natuurlijk beperkt. Modelleren zou herhaaldelijk in het curriculum aan bod moeten komen om substantiële vooruitgang te signaleren. Niettemin zijn er verbetermogelijkheden in het ontwerp. Om de leerlingen meer productief gebruik te laten maken van voorgaande ervaringen zijn meer reflectiemomenten in te bouwen, zoals met betrekking tot het analyseren en het schatten. Ten derde worden de modellen steeds complexer en moeten de leerlingen in elk volgend model over meer vakinhoudelijke kennis beschikken, waardoor in elk volgend model niet op de eerste plaats de bekende modelstructuren worden hergebruikt (het 2-laagsmodel vormt hierop een uitzondering). Vanuit dat oogpunt is het daarom verstandiger om bepaalde vakinhoud en/of modelstructuren in meerdere contexten aan te bieden in plaats van één grotere.

Om productieve constructieruimte te realiseren is het dus allereerst belangrijk dat de opdrachten haalbaar zijn voor de leerlingen en dat de keuzevrijheid voor de leerlingen zodanig vormgegeven wordt dat de individuele variatie voor de docent hanteerbaar blijft. We concluderen verder dat, net als ten aanzien van betekenisvolheid, de klassencultuur sterk de kwaliteit van de gerealiseerde constructieruimte bepaalt. Als er veel ruimte is voor leerlingen om bij te dragen wil

dat nog niet zeggen dat deze bijdragen ook productief worden als het zowel voor de docent als de leerlingen niet gebruikelijk is om de verantwoordelijkheid voor gemaakte keuzes bij de leerlingen te leggen. Ook leidt het herhaaldelijk doorlopen van de modelleercycli er niet automatisch toe dat leerlingen een toenemende zelfstandigheid tonen. Om productief gebruik te maken van eerdere modelleeractiviteiten zijn de leerlingen gebaat bij een systematische reflectie op de in eerdere cycli gevolgde processtappen. In een dergelijke reflectie kunnen de benodigde opbrengsten benoemd worden, de wijze waarop die opbrengsten gevonden moeten worden en/of aandachtspunten in het proces. Ook zijn de fysische processen die het modelmechanisme vormen inhoudelijk te specificeren, resulterend in domeinspecifieke heuristieken vergelijkbaar met die Hestenes (1987) heeft benoemd voor mechanicamodellen.

5.2 Implicaties

5.2.1 Competentieontwikkeling en modelleren in het curriculum

In het hiervoor beschreven onderzoek streefden we naar modelleerervaring als basis voor competentieontwikkeling. In deze paragraaf schetsen we hoe, voortbouwend op onze bevindingen, competentieontwikkeling vorm kan krijgen in het curriculum.

De plaats van authentieke modelleerervaring in het curriculum

Een modelleercompetentie voor het voortgezet onderwijs behelst zowel inzicht in het karakter en verloop van natuurwetenschappelijke modelleerprocessen als de vaardigheid om zelf modellen te bouwen, te gebruiken en te evalueren. Het doel van de klimaatmodule was om het modelleerproces van klimaatwetenschappers zodanig te didactiseren dat leerlingen modelleerervaring opdoen die analoog is aan de ervaringen van experts. Centraal in het ontwerp staat daarom het greep krijgen op een systeem door gefundeerde aannames te doen. Juist de iteratieve kant van het modelleerproces wordt zichtbaar, net als het compromiskarakter van een model. Het zelf natuurwetenschappelijk modelleren van complexe dynamische systemen is op zich niet voldoende om een modelleercompetentie te verwerven, maar we hebben beargumenteerd dat een dergelijke ervaring wel een noodzakelijk onderdeel is van het leerproces.

Voor het zelf modelleren van dynamische verschijnselen is vakkennis nodig; allereerst van de gebruikte domeinconcepten, maar ook van het numeriek rekenen en van de relevante typen systeemgedrag. Om leerlingen op het proces te laten focuseren is het nodig dat de benodigde voorkennis onproblematisch is en dat ze voldoende richtinggevende verwachtingen hebben om hun modelleerproces te sturen. In het geval van de klimaatmodule bleek dat niet altijd het geval. In een curriculumlijn modelleren is het daarom van belang dat modules gericht op het verwerven van authentieke modelleerervaring voorafgegaan worden door onderwijs waarin relevante voorkennis verworven wordt, zoals wij gedaan hebben met numeriek rekenen in de radioactiviteitsmodule.

Dat betekent echter niet zonder meer dat het natuurwetenschappelijke modelleringsproces alleen ná het funderende onderwijs aan de orde kan komen. Het is goed mogelijk dat in een authentiek modelleringsproces problemen worden opgeworpen die zich lenen voor een verdiepende vervolgmodule. Na de klimaatmodule (of na een aantal van dergelijke modules) zou het bijvoorbeeld goed mogelijk zijn verschillende typen systeemgedrag of methoden achter numerieke integratie te behandelen.

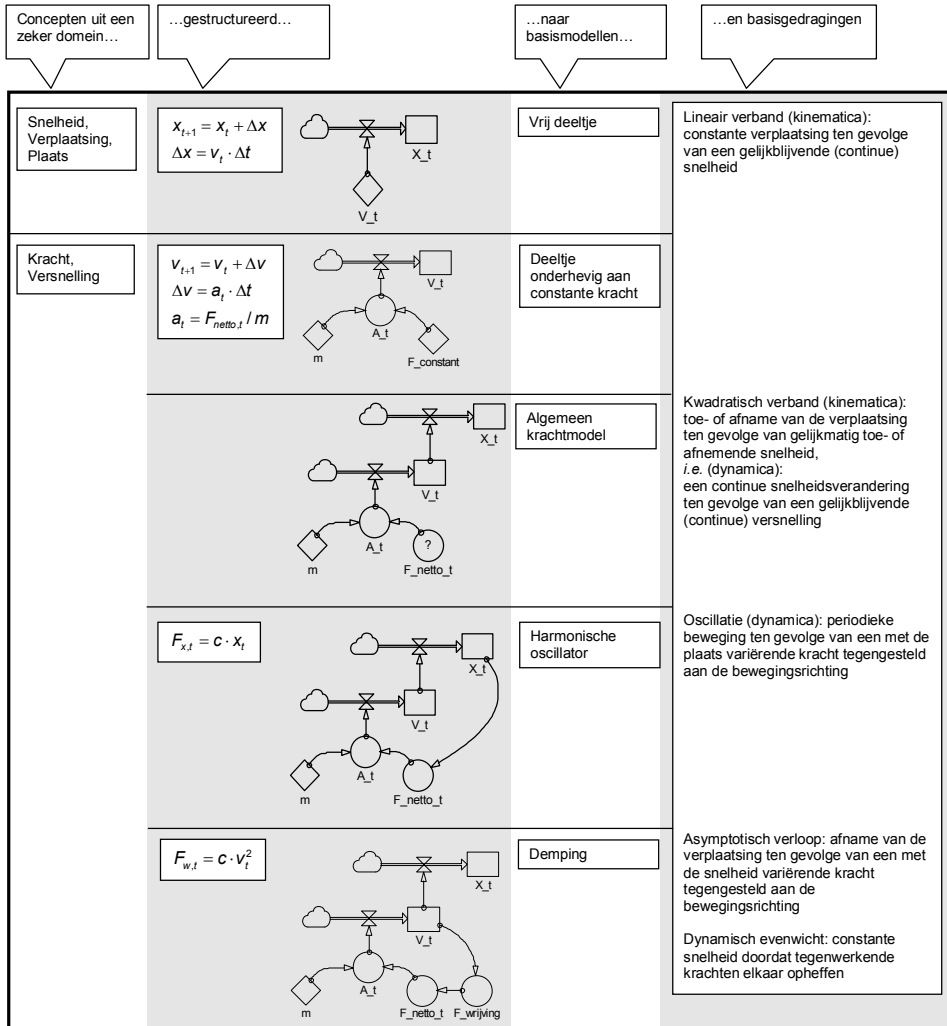
De vraag in hoeverre (alle) nieuwe leerstof geïntegreerd aangeboden moet worden binnen een realistische probleemcontext speelt al vanaf het begin van de ontwikkeling van context-gebaseerd onderwijs. In het PLON-project waren naast de modules die gericht waren op problemen uit de leefwereld ook modules die vertrokken vanuit een theoretische vraagstelling (Lijnse, Kortland, Eijkelfhof, Van Genderen, & Hooymayers, 1990). Ook in de context-conceptbenadering die de huidige vakvernieuwingen stuurt, wordt gepoogd om vakinhoudelijke onderwerpen te didactiseren aan de hand van leefwereldgerichte en/of theoriegerichte contexten.

Naar ons idee moet er per module een duidelijk hoofdaccent zijn: op de gemodelleerde inhoud (fysisch en/of mathematisch), op de dynamica, of op het modelleringsproces. Door gedurende langere tijd te werken aan de kennis- en ervaringsbasis die voor de competentieontwikkeling nodig is, is het mogelijk om in verschillende delen van het curriculum verschillende accenten te leggen: de inhoudelijke ontwikkeling, het proces en de natuurwetenschappelijke waarden kunnen in verschillende modules aan bod komen.

Een kennisbasis in de vorm van modelstructuren

Als de inzet is dat leerlingen binnen het behandelde domein hun kennis kunnen toepassen in nieuwe situaties dan kan het expliciet behandelen van een reeks paradigmatische modellen, zoals Hestenes dat doet, een krachtig hulpmiddel zijn. Het ontwikkelen en leren gebruiken van deze modellen valt dan samen met het aanleren van de reguliere vakinhoud; de fysisch-theoretische concepten in een bepaald domein worden dan geordend tot domeinspecifieke basisstructuren die voor een groot aantal contexten toepasbaar zijn. Hestenes heeft voor het mechanica-domein een scala aan paradigmatische modellen geïdentificeerd. Het 1-laagsmodel uit de temperatuurmodule kan een vergelijkbaar basismodel zijn voor het domein warmte en temperatuur: een energie-inhoud, een toestroom en – altijd – een temperatuurafhankelijke uitstroom. Het enkelvoudige vervalmodel en een moeder-dochterverval kunnen twee basismodellen zijn voor radioactiviteit. Nemen we mechanica als een voorbeeld-domein, dan is een opbouw van basismodellen voor te stellen die uitmondt in een algemeen mechanica-model (Kortland, Savelsbergh, Hooymans, & Wielinga, 2003), zie Figuur 43.

In de klimaatmodule werkten we gedurende de gehele module aan één probleemsituatie, voortbouwend op één basismodel. De enige contextwisseling die in ons onderwijs optrad, was die tussen de radioactiviteitsmodule en de klimaatmodule. Hoewel het om vergelijkbare modelstructuren ging, bleek de transfer voor leerlingen lastig. Eveneens is het te verwachten dat het voor leerlingen



Figuur 43. Voorbeeld van een uitlijning van basismodellen en basisgedragingen in het mechanica-domein. Initiële modellen uit kinematica en dynamica laten zich combineren tot een algemeen mechanica-model waarin de nettokracht de versnelling bepaalt, waarna verschillende typen krachten aan bod kunnen komen.

lastig is om een (domeinspecifiek) basismodel te herkennen in verschillende situaties. Om te komen tot een wendbare kennisbasis is het nodig te oefenen met context-wisselingen. In een curriculumlijn horen dus transferopdrachten waarin de modelstructuren en gedragingen geabstraheerd worden van de aangeleerde context en toegepast in een nieuwe.

Vervolg en verdieping

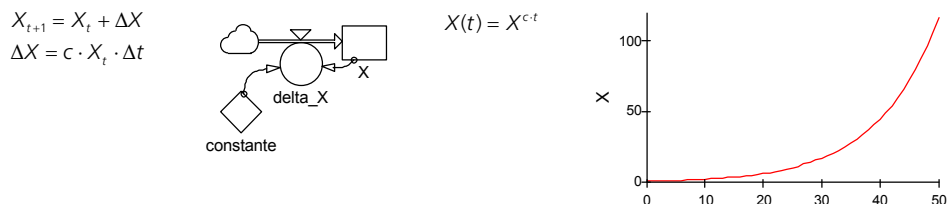
In de voorbeelduitlijning in Figuur 43 geeft elk van de domeinspecifieke structuren aanleiding tot steeds complexere gedragingen. Bovendien zijn er overeenkomsten tussen modelstructuren uit verschillende domeinen. Om bij die contextwisselingen expliciet gebruik te maken van overeenkomsten en verschillen op het niveau van de modelstructuur zouden leerlingen een goed inzicht moeten ontwikkelen in de relaties tussen de systeemdynamische beeldtaal, de differentievergelijkingen voor een systeem en het resulterende gedrag dat een modelstructuur laat zien (in lijn met Fuchs' curriculum (2007)). Een goede beheersing zou kunnen inhouden dat leerlingen verschillende representatievormen kennen en slechts één hoeven te zien om ook de andere te activeren: de differentievergelijking, de systeemdynamische representatie ervan, de analytische oplossing en de grafiek van het resulterende patroon (Tabel 16).

Te denken valt aan een leerlijn 'dynamische gedragingen', waarin leerlingen eerst eenvoudige, 'paradigmatische' gedragingen van dynamische systemen leren kennen, zoals lineaire, exponentiële, asymptotische en oscillerende patronen, alvorens complexe dynamische systemen te gaan onderzoeken. Gedurende zo'n leerlijn kunnen leerlingen leren om het gedrag van een dynamisch systeem te verklaren. Als zij dan in een vakinhoudelijke context een modelstructuur identificeren, hebben zij wellicht verwachtingen over het systeemgedrag of, andersom, ideeën over de modelstructuur op basis van het systeemgedrag.

Het identificeren van basismodellen vereist een vakspecifieke invulling, maar de uitlijning van een leerlijn 'dynamische gedragingen' overschrijdt eenvoudig verschillende disciplines: de natuurwetenschappelijke vakken, wiskunde, aardrijkskunde en economie hebben allemaal ruimschoots mogelijkheden om bij te dragen. In een verdiepende module moet het mogelijk zijn om niet zozeer de fysische inhoud als wel de dynamica te bestuderen, waarin bijvoorbeeld demping en oscillaties als respectievelijk 1^e- en 2^e-orde differentievergelijkingen worden geïdentificeerd en waarin wiskundige chaosmodellen aan bod komen.

Momenteel behoren analytische oplossingen voor eenvoudige gedragingen tot de standaard vakinhoud. In de twee onderzoeksrondes onderscheidden leerlingen niet altijd of zij een analytisch verband nodig hadden of een differentievergelijking. Ten behoeve van het leren verklaren van gedragingen, het numeriek modelleren en het onderzoeken van modelgedrag lijkt het verstandig om pas analytische oplossingen te

Tabel 16. Vier representatievormen uitgewerkt voor exponentiële groei: de differentievergelijking, het Powersimdiagram, de analytische oplossing en de resulterende grafiek.



gaan gebruiken voor het beschrijven van eenvoudige patronen als de leerlingen geleerd hebben hoe het algehele patroon het resultaat is van momentane veranderingen.

Door al bij eenvoudige situaties uit te gaan van differentievergelijkingen is de drempel laag om al in een vroeg stadium modelleersoftware te gebruiken voor het doorrekenen van systemen. Daarvoor zou een tekstgeoriënteerd programma in eerste instantie voldoende kunnen zijn. Bovendien is daarin de tijdstap beter herkenbaar. Anderzijds wordt met een grafische tool wellicht beter zichtbaar dat er overeenkomstige modelstructuren zijn in verschillende domeinen en helpt de grafische tool om in complexe situaties de hoofdstructuur van een systeem te onderscheiden, zowel tussen leerlingen onderling alsook in de begeleiding. Het redeneren over een model en het opsporen van fouten blijft bovendien niet beperkt tot het napluizen van de ingevoerde formules, maar de representatie van het fysisch mechanisme zelf is ook bespreekbaar.

5.2.2 Voorwaarden aan implementatie van een modelleercurriculum

In deze paragraaf bespreken we op basis van onze ervaringen welke eisen we kunnen identificeren ten aanzien van het benodigde onderwijsmateriaal en de docentvoorbereiding.

Het handelen van de docent is bepalend voor de kwaliteit van het onderwijsleerproces. De beide docenten die we in dit onderzoek van nabij gevolgd hebben, gaven ieder een geheel eigen invulling aan het onderwijsontwerp. Vanuit het vakmanschap van de docent gezien is het vanzelfsprekend en ook noodzakelijk dat de docent een eigen invulling geeft aan het te geven onderwijs. In dit geval weken de beide testdocenten af en toe zodanig af van wat beoogd was, dat de essentie van het ontwerp uit het zicht verdween ('lethal mutations' genoemd door Brown & Campione, 1996).

Wil een modelleercurriculum bruikbaar zijn voor een brede groep docenten dan moet de docent voldoende vrijheid hebben om zijn eigen onderwijsstijl te volgen en eigen accenten te leggen terwijl de essentie van het curriculum overeind blijft. De huidige temperatuurmodule is vanuit dat gezichtspunt niet geschikt om op grote schaal te implementeren: enerzijds vanwege de grote openheid in het materiaal en anderzijds vanwege de complexiteit ervan. Voor een grootschalige invoering zijn dus modules nodig met een minder complexe opbouw, bijvoorbeeld door voor iedere module een eenduidige 'curriculum emphasis' te kiezen. In het geschetste modelleercurriculum wordt dit nagestreefd. Een grotere serie modules zou dan nodig zijn om alle gewenste modelleeraspecten aan bod te laten komen.

Voor gebruik door een brede groep docenten zou het verder nodig zijn de essentiële elementen van het beoogde modelleerproces te benoemen in de tekst van het lesmateriaal. In de docentenhandleiding moet bovendien toegelicht worden vanuit welke onderwijsvisie is gewerkt en wat de consequenties daarvan zijn. Andere relevante informatie voor docenten is bijvoorbeeld informatie over misconcepties en informatie met betrekking tot basismodellen in verschillende modellen, beide toegesneden op en geïllustreerd aan de hand van diverse modules. Ook zijn handreikingen

te formuleren om grote groepen leerlingen te begeleiden bij het maken van hun computermodellen, zoals een beschrijving van veelvoorkomende fouten, en aanwijzingen voor het testen van leerlingenmodellen met een vaste set parameterwaarden.

Het is een lastige opdracht om het handelen van docenten te veranderen. Hoe groter de implementatieschaal, hoe beperkter de mogelijkheden voor nascholing. In het geval van het computerondersteund modelleren van dynamische systemen zijn, naast de door ons voorgestelde didactische aanpak, ook de behandelde vakinhoud en het gebruikte type software voor veel docenten relatief onbekend. Dat kan een nadeel zijn omdat docenten op dit gebied een beperkt repertoire hebben en zich onzeker voelen. Het kan echter ook een voordeel zijn omdat de nieuwe vakinhoud een aanknopingspunt biedt voor nascholing en docenten vaak eerder openstaan voor vakinhoudelijke dan voor didactische nascholing.

Om de hier voorgestelde ontwikkeling in gang te zetten is het allereerst nodig de belangstelling van docenten te wekken en hen te informeren, bijvoorbeeld door middel van docentenconferenties en artikelen in vakbladen. Vervolgens is een langlopend disseminatieprogramma nodig om bijvoorbeeld door workshops kleine groepjes docenten vertrouwd te maken met de uitgangspunten van het natuurwetenschappelijk modelleren en de verbinding daarvan met de onderwijspraktijk. Action research en peer coaching vormen mogelijke professionaliseringstrajecten om gedurende langere tijd op een bewuste manier de eigen onderwijspraktijk en die van collega's kritisch te bezien en aan te passen.

5.2.3 Vragen voor vervolgonderzoek

De discussie van ontwerprichtlijnen, de schets voor een modelleercurriculum en de verschillende (on)mogelijkheden voor docentenscholing geven aanleiding tot een aantal vragen waarnaar verder onderzoek de moeite waard is.

Allereerst is het natuurlijk de vraag in hoeverre de ontwikkelde modelleermodules bijdragen aan het gewenste effect, namelijk de ontwikkeling van een modelleercompetentie bij de leerlingen. Een recentelijk ontwikkeld meetinstrument om de leeropbrengsten van computermodelleren vast te stellen biedt daartoe een eerste mogelijkheid (Van Borkulo, 2009). Dit instrument betreft gedeeltelijk dezelfde vakinhoud als de modules die in dit proefschrift zijn beschreven.

Een voor de hand liggende uitbreiding van bovenstaande is het effect van een gehele curriculumlijn in modelleren. Dit impliceert op de eerste plaats een vervolgonterponderzoek, waarin aandacht is voor het identificeren van basismodellen en –gedragingen in een of meerdere domeinen en voor een abstractie op basis daarvan. Met de ontwikkeling van nieuwe modules op nieuwe domeinen zouden ook parallelle meetinstrumenten ontwikkeld moeten worden om de in dat domein verworven competentie te kunnen meten. Bij dat ontwerponderzoek dient ook aandacht te zijn voor de reflectie op de modelstructuren, de gedragingen en/of het modelleerproces.

Een ander type vervolgonderzoek zou zich meer kunnen richten op de impact van de softwarekeuze. Dit vergt een deels comparatieve studie in het verlengde van

het onderzoek van Löhner (2005), maar ook een ontwikkelingsonderzoek om bijvoorbeeld de materialen die voor het onderzoek uit dit proefschrift ontwikkeld zijn, waar nodig aan te passen. Het blijkt immers dat de systeemdynamische software niet vanzelfsprekend zicht geeft op het dynamische proces of op leerlingenfouten. Relevante vragen zijn dan welke mogelijkheden een tekstgeoriënteerde tool biedt en hoe deze zich verhoudt tot de bevindingen die in dit onderzoek zijn gerapporteerd.

De laatste, maar zeker niet de onbelangrijkste onderzoeksvraag is gericht op het leerproces van de docent. Een mogelijke insteek is om de effecten te onderzoeken die verschillende voorbereidingstrajecten hebben op de visie en het handelen van de docent. Een andere mogelijkheid is om de opbrengsten te onderzoeken van een groep docenten die elk volgens hun eigen onderwijsstijl modelleeronderwijs vorm gaan geven in hun lessen en daarin door gezamenlijk onderzoek verbeteringen in proberen aan te brengen.

Referenties

- Aarle, P. van, & Verkerk, G. (2000). Natuur en milieu; onderwerpen in de tweede fase. *NVOX*, 9, 467-470.
- Akker, J. van den (1999). Principles and Methods of Development Research. In J. van den Akker, R. M. Branch, K. Gustafson, N. Nieveen & T. Plomp (Eds.), *Design Approaches and Tools in Education and Training*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Alexander, P. A., & Judy, J. E. (1988). The Interaction of Domain-Specific and Strategic Knowledge in Academic Performance. *Review of Educational Research*, 58, 375-404.
- Bailer-Jones, D. M. (2002). Scientists' Thoughts on Scientific Models. *Perspectives on Science*, 10, 275-301.
- Barab, S., & Squire, K. (2004). Design-Based Research: Putting a Stake in the Ground. *Journal of the Learning Sciences*, 13, 1-14.
- Baram-Tsabari, A., Sethi, R. J., Bry, L., & Yarden, A. (2006). Using Questions Sent to an Ask-A-Scientist Site to Identify Children's Interests in Science. *Science Education*.
- Bliss, J. (1994). Reasoning with a Semi-quantitative Tool. In H. Mellar, J. Bliss, R. Boohan, J. Ogborn & C. Tompsett (Eds.), *Learning with Artificial Worlds: Computer Based Modelling in the Curriculum*. London: Falmer Press.
- Bliss, J., & Sakonidis, H. (1994). Reasoning with a Qualitative Modelling Tool. In H. Mellar, J. Bliss, R. Boohan, J. Ogborn & C. Tompsett (Eds.), *Learning with Artificial Worlds: Computer Based Modelling in the Curriculum*. London: Falmer Press.
- Bock, D. de, van Dooren, W., Janssens, D., & Verschaffel, L. (2002). Improper use of linear reasoning: An in-depth study of the nature and the irresistibility of secondary school students' errors. *Educational Studies in Mathematics*, 50, 311-334.
- Booth Sweeney, L., & Sterman, J. D. (2000). Bathtub Dynamics: Initial Results of a Systems Thinking Inventory. *System Dynamics Review*, 16, 249-286.
- Borkulo, S. P. van (2009). *The assessment of learning outcomes of computer modeling in secondary science education*. Enschede: Universiteit Twente.
- Broekkamp, H., & van Hout-Wolters, B. (2006). 'De kloof tussen onderwijsonderzoek en onderwijspraktijk'; een overzichtsstudie van problemen, oorzaken en oplossingen. Amsterdam: Vossiuspers UvA.
- Brown, A. L., & Campione, J. C. (1996). Psychological theory and the design of innovative learning environments: on procedures, principles, and systems. In L. Schauble & R. Glaser (Eds.), *Innovations in Learning: New environments for education*. Mahwah: Lawrence Erlbaum.
- Cartwright, N. (1983). *How the laws of physics lie*. Oxford: Clarendon Press.

- Chi, M. T. H., Feltovich, P. J., & Glaser, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5, 121-152.
- Chin, C., & Brown, D. E. (2000). Learning in Science: A Comparison of Deep and Surface Approaches. *Journal of Research in Science Teaching*, 37, 109-138.
- Chinn, C. A., & Brewer, W. F. (1998). An Empirical Test of a Taxonomy of Responses to Anomalous Data in Science. *Journal of Research in Science Teaching*, 35, 623-654.
- Chinn, C. A., & Malhotra, B. A. (2002). Epistemologically Authentic Inquiry in Schools: A Theoretical Framework for Evaluating Inquiry Tasks. *Science Education*, 86, 175-218.
- Cobb, P., Confrey, J., diSessa, A., Lehrer, R., & Schauble, L. (2003). Design Experiments in Educational Research. *Educational Researcher*, 32, 9-13.
- Cochran-Smith, M., & Lytle, S. L. (1999). The Teacher Research Movement: A Decade Later. *Educational Researcher*, 28(7), 15-25.
- Commissie Toekomst WiskundeOnderwijs (2007). *Rijk aan betekenis; Visie op vernieuwd wiskundeonderwijs*. Retrieved from <http://www.fi.uu.nl/ctwo/publicaties/docs/Rijkaanbetekenisweb.pdf>
- Commissie vernieuwing natuurkundeonderwijs havo/vwo (2006). *Natuurkunde leeft; visie op het vak natuurkunde in havo en vwo*. Retrieved from <http://www.nieuwenatuurkunde.nl/documentatie/11/visiedocument>
- Dede, C. (2004). If design-based research is the answer, what is the question? *The Journal of the learning sciences*, 13, 105-114.
- Deketelaere, A., & Kelchtermans, G. (1996). Collaborative Curriculum Development: an encounter of different professional knowledge systems. *Teachers and Teaching: theory and practice*, 2, 71-85.
- deLoache, J. S. (2002). *The symbol-mindedness of young children*. Paper presented at the Minnesota Symposia on child psychology "Child psychology in retrospect and prospect".
- deLoache, J. S., Uttal, D. H., & Rosengren, K. S. (2004). Scale Errors Offer Evidence for a Perception-Action Dissociation Early in Life. *Science*, 304, 1027-1029.
- Design-Based Research Collective (2003). Design-Based Research: An emerging paradigm for educational inquiry. *Educational Researcher*, 32(1), 5-8.
- Doerr, H. M. (1996). STELLA ten years later: a review of the literature. *International Journal of Computer for Mathematical Learning*, 1, 201-224.
- Driel, J. H. van, Bulte, A., & Verloop, N. (2005). The conceptions of chemistry teachers about teaching and learning in the context of a curriculum innovation. *International Journal of Science Education*, 27, 303-322.
- Duit, R. (2007). Bibliography STCSE: Students' and teachers' conceptions and science education. Retrieved September 2007, from <http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html>

- Duit, R., & Komorek, M. (1997). Understanding the basic ideas of chaos-theory in a study of limited predictability. *International Journal of Science Education*, 19, 247-264.
- Dunbar, K. (2000). How Scientists Think in the Real World: Implications for Science Education. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 21, 49-58.
- Ekborg, M., & Areskoug, M. (2006). How student teachers' understanding of the greenhouse effect develops during a teacher education programme. *NorDiNa [Nordic Studies in Science Education]*, 5 (desember), 17-29.
- Ericsson, K. A., Krampe, R. T., & Tesch-Römer, C. (1993). The Role of Deliberate Practice in the Acquisition of Expert Performance. *Psychological Review*, 100(3), 363-406.
- Feurzeig, W., & Roberts, N. (Eds.). (1999). *Modeling and Simulation in Science and Mathematics Education*. New-York: Springer-Verlag.
- Feynman, R. (1965). *The Character of Physical Law*. Cambridge: M.I.T. Press.
- Fisher, D. M., & Zaraza, R. (1998). Introducing system dynamics into the traditional secondary curriculum: the CC-STADUS projects' search for leverage points. *The Creative Learning Exchange Newsletters*, 7(1).
- Forrester, J. W. (1968). *Principles of Systems*. Cambridge: Wright-Allen Press.
- Fortus, D. (2005). *Restructuring School Physics around Real-World Problems: A Cognitive Justification*. Paper presented at the international conference of the American Educational Research Association, Montreal.
- Fortus, D. (2008). The Importance of Learning to Make Assumptions. *Science Education*, 86-108.
- Fuchs, H. U. (1997). *The Continuum Physics Paradigm in physics instruction*. Retrieved 25 oktober 2007, from <https://home.zhaw.ch/~fuh/LITERATURE/Literature.html>
- Fuchs, H. U. (1999). A Systems View of Natural Processes: Teaching Physics the System Dynamics Way. *The Creative Learning Exchange Newsletters*, 8.
- Giere, R. N. (1999). *Science without laws*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Gilbert, J. K., & Boulter, C. J. (1998). Learning Science Through Models and Modelling. In B. J. Fraser & K. G. Tobin (Eds.), *International Handbook of Science Education* (Vol. 1, pp. 53-66): Kluwer Academic Publishers.
- Gilbert, J. K., & Boulter, C. J. (Eds.). (2000). *Developing Models in Science Education*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Gilbert, S. W. (1991). Model building and a definition of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 28, 73-79.
- Gravemeijer, K. P. E. (1994). *Developing realistic mathematics education*. Utrecht: CD β Press.
- Groot, A. D. de (1978 (1965)). *Thought and Choice in Chess*. The Hague: Mouton Publishers.
- Grosslight, L., Unger, C., Jay, E., & Smith, C. L. (1991). Understanding Models and their Use in Science: Conceptions of Middle and High School Students and Experts. *Journal of Research in Science Teaching*, 28, 799-822.

- Hacking, I. (1983). *Representing and intervening; Introductory topics in the philosophy of natural science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Halloun, I., & Hestenes, D. (1987). Modeling instruction in mechanics. *American Journal of Physics*, 55, 455-462.
- Herrmann, F. (2000). The Karlsruhe Physics Course. *European Journal of Physics*, 21, 49-58.
- Hestenes, D. (1987). Toward a modeling theory of physics instruction. *American Journal of Physics*, 55, 440-454.
- Hoeve-Brouwer, G. M. van (1996). *Teaching Structures in Chemistry; An Educational Structure for Chemical Bonding*. Utrecht: CDβ Press.
- Hofstein, A., Navon, O., Kipnis, M., & Mamlok-Naaman, R. (2005). Developing Students' Ability to Ask More and Better Questions Resulting from Inquiry-Type Chemistry Laboratories. *Journal of Research in Science Teaching*, 42, 791-806.
- Hogan, K., & Thomas, D. (2001). Cognitive Comparisons of Students' Systems Modeling in Ecology. *Journal of Science Education and Technology*, 10, 319-345.
- IPCC (1990). *Climate Change; The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Janssen, J., Van der Schoot, F., & Hemker, B. (2005). *Balans van het reken-wiskundeonderwijs aan het einde van de basisschool 4. Uitkomsten van de vierde peiling in 2004*. Arnhem: Citogroep.
- Jong, T. de, & van Joolingen, W. R. (1998). Scientific Discovery Learning With Computer Simulations of Conceptual Domains. *Review of Educational Research*, 68, 179-201.
- Joolingen, W. R. van, de Jong, T., Lazonder, A. W., Savelsbergh, E. R., & Manlove, S. (2005). Co-Lab: research and development of an online learning environment for collaborative scientific discovery learning. *Computers in Human Behavior*, 21, 671-688.
- Kelly, A. E. (2003). Theme Issue: The Role of Design in Educational Research. *Educational Researcher*, 32, 3-4.
- Klaassen, C. W. J. M. (1995). *A Problem-Posing Approach to Teaching the Topic of Radioactivity*. Utrecht: CDβ Press.
- Klahr, D., & Simon, H. A. (1999). Studies of Scientific Discovery: Complementary Approaches and Convergent Findings. *Psychological Bulletin*, 125, 524-543.
- Kortland, K. (2001). *A problem-posing approach to teaching decision making about the waste issue*. Utrecht: CDβ Press.
- Kortland, K., Savelsbergh, E. R., Hooyman, K., & Wielinga, R. (2003). Kracht en beweging in de sport; Een natuurkundemodule voor computerondersteund modelleren. *NVOX*, 9, 419-422.

- Kuhn, D. (2007). Is Direct Instruction an Answer to the Right Question? *Educational Psychologist*, 42, 109-113.
- Kurtz dos Santos, A. C., & Ogborn, J. (1994). Sixth form students' ability to engage in computational modelling. *Journal of Computer Assisted Learning*, 10, 182-200.
- Larkin, J. H. (1983). The role of problem representations in physics. In D. Gentner & A. L. Stevens (Eds.), *Mental models*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Lehrer, R., & Schauble, L. (2000). Developing Model-Based Reasoning in Mathematics and Science. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 21, 39-48.
- Lijnse, P. (1995). "Developmental Research" As a Way to an Empirically Based "Didactical Structure" of Science. *Science Education*, 79, 189-199.
- Lijnse, P. (2002). Op weg naar een didactische structuur van de natuurkunde? *Tijdschrift voor Didactiek der beta-wetenschappen*, 19, 62-92.
- Lijnse, P. (2008). Modellen van/voor leren modelleren. *Tijdschrift voor Didactiek der beta-wetenschappen*, 25, 3-24.
- Lijnse, P., & Klaassen, K. (2004). Didactical structures as an outcome of research on teaching-learning sequences? *International Journal of Science Education*, 26, 537-554.
- Lijnse, P., Kortland, K., Eijkelhof, H. M. C., Van Genderen, D., & Hooymayers, H. P. (1990). A Thematic Physics Curriculum: A Balance Between Contradictory Curriculum Forces. *Science Education*, 74, 95-103.
- Löhner, S. (2005). *Computer based modeling tasks; the role of external representation*. Amsterdam: Universiteit van Amsterdam.
- Maaß, K. (2006). What are modelling competencies? *Zentralblatt für Didaktik der Mathematik*, 38, 113-142.
- Malone, K. L. (2006). *A comparative study of the cognitive and metacognitive differences between modeling and non-modeling high school physics students*. Pittsburgh: Carnegie Mellon University.
- Mandinach, E. B., & Cline, H. F. (1994). *Classroom Dynamics: Implementing a Technology-Based Learning Environment*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum.
- McKenney, S., Nieveen, N., & Van den Akker, J. (2006). Design research from a curriculum perspective. In J. Van den Akker, K. Gravemeijer, S. McKenney & N. Nieveen (Eds.), *Educational Design Research*. Abingdon: Routledge.
- Méheut, M., & Psillos, D. (2004). Teaching-learning sequences: aims and tools for science education research. *International Journal of Science Education*, 26, 515 - 535.
- Merriënboer, J. J. G. van, van der Klink, M. R., & Hendriks, M. (2002). *Competenties: Van complicaties tot compromis. Over schuifjes en begrenzers*. Den Haag: Onderwijsraad.
- Merril, M. D. (2002). First principles of instruction. *Educational Technology Research and Development*, 50(3), 43-59.
- Moore, J. L. (1987). *Back-of-the-Envelope Problems*. Berkeley: University of California.
- Nisbett, R. E. (Ed.). (1993). *Rules for reasoning*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum.

- Niss, M. (2004). *Mathematical competencies and the learning of mathematics: the Danish KOM project*. Paper presented at the 3rd Mediterranean Conference on Mathematical Education, Athens.
- Oers, B. van (1988). Modellen en de ontwikkeling van het (natuur-) wetenschappelijk denken van leerlingen. *Tijdschrift voor Didactiek der beta-wetenschappen*, 6, 115-143.
- OESO (2004). *Learning for Tomorrow's World - First Results from PISA 2003*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Osborne, J., & Collins, S. (2001). Pupils' views of the role and value of the science curriculum: a focus-group study. *International Journal of Science Education*, 23, 441-467.
- Perkins, D. N., & Grotzer, T. A. (2005). Dimensions of Causal Understanding: the Role of Complex Causal Models in Students' Understanding of Science. *Studies in Science Education*, 41, 117-166.
- Perkins, D. N., & Salomon, G. (1989). Are Cognitive Skills Context-Bound? *Educational Researcher*, 18, 16-25.
- Powell, S. G., & Willemain, T. R. (2007). How novices formulate models. Part I: qualitative insights and implications for teaching. *Journal of the Operational Research Society*, 58, 983-995.
- Resnick, L. B. (1987). *Education and learning to think*. Washington: National Academy Press.
- Roth, W.-M., & Bowen, G. M. (2003). When Are Graphs Worth Ten Thousand Words? An Expert-Expert Study. *Cognition and Instruction*, 21, 429-473.
- Sandoval, W. A. (2005). Understanding Students' Practical Epistemologies and Their Influence on Learning Through Inquiry. *Science Education*, 89, 634-656.
- Savelsbergh, E. R. (Ed.). (2008). *Modelleren en computermodellen in de beta-vakken; Advies aan de gezamenlijke beta-vernieuingscommissies*. Retrieved from http://www.cdbeta.uu.nl/onderzoek/downloads/modelleren_advies_cie.pdf
- Savelsbergh, E. R., De Jong, T., & Ferguson-Hessler, M. G. M. (2002). Situational Knowledge in Physics: The Case of Electrodynamics. *Journal of Research in Science Teaching*, 39, 928-951.
- Schauble, L., Klopfer, L. E., & Raghavan, K. (1991). Students' Transition from an Engineering Model to a Science Model of Experimentation. *Journal of Research in Science Teaching*, 28, 859-882.
- Schecker, H. P. (1993). Learning physics by making models. *Physics Education*, 28, 102-106.
- Schecker, H. P. (1998). *Physik-Modellieren; Grafikorientierte Modellbildungssysteme im Physikunterricht*. Stuttgart: Ernst Klett Verlag.
- Schecker, H. P. (2005). *Learning Mechanics with Modelling Systems*. Paper presented at the Fifth International ESERA Conference on Contributions of Research to Enhancing Students' Interest in Learning Science, Barcelona.

- Schecker, H. P., Klieme, E., Niedderer, H., Ebach, J., & Gerdes, J. (1999). *Physiklernen mit Modellbildungssystemen; Förderung physikalischer Kompetenz und systemischen Denkens durch computergestützte Modellbildungssysteme*. Retrieved from http://www.idn.uni-bremen.de/pubs/DFG_PMS_ab.pdf
- Schoenfeld, A. H. (1985). *Mathematical problem solving*. Orlando: Academic Press.
- Schoenfeld, A. H. (1994). Reflections on Doing and Teaching Mathematics. In A. H. Schoenfeld (Ed.), *Mathematical Thinking and Problem Solving*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum.
- Schwarz, C. V., & White, B. Y. (2005). Metamodeling Knowledge: Developing Students' Understanding of Scientific Modeling. *Cognition and Instruction*, 23(2), 165-205.
- Shallcross, D., & Harrison, T. (2008). Climate change modelling in the classroom. *Science in School*, 9, 28-33.
- Shin, N., Jonassen, D. H., & McGee, S. (2003). Predictors of Well-Structured and Ill-Structured Problem Solving in an Astronomy Simulation. *Journal of Research in Science Teaching*, 40, 6-33.
- Simon, M. A. (1995). Reconstructing mathematics pedagogy from a constructivist perspective. *Journal for Research in Mathematics Education*, 26, 114-145.
- Singley, M. K., & Anderson, J. R. (1989). *The Transfer of Cognitive Skill*. Cambridge: Harvard University Press.
- Sins, P. (2006). *Students' reasoning during computer-based scientific modeling; the impact of epistemology, motivation and communication mode*. Amsterdam: Universiteit van Amsterdam.
- Sins, P., Savelsbergh, E. R., & Van Joolingen, W. R. (2005). The Difficult Process of Scientific Modelling: An analysis of novices' reasoning during computer-based modelling. *International Journal of Science Education*, 27, 1695-1721.
- Smith, C. L., Maclin, D., Houghton, C., & Hennessey, M. G. (2000). Sixth-Grade Students' Epistemologies of Science: The Impact of School Science Experiences on Epistemological Development. *Cognition and Instruction*, 18, 349-422.
- Sobel, D. M., Tenenbaum, J. T., & Gopnik, A. (2004). Children's causal inferences from indirect evidence: Backwards blocking and Bayesian reasoning in preschoolers. *Cognitive Science*, 28, 303-333.
- Stevens, R. J. (2004). Why do educational innovations come and go? What do we know? What can we do? *Teaching and teacher education*, 20, 389-396.
- Stratford, S. J. (1997). *A Review of Computer-Based Model Research in Precollege Science Classrooms*. Unpublished manuscript.
- Stratford, S. J., Krajcik, J. S., & Soloway, E. (1998). Secondary Students' Dynamic Modeling Processes: Analyzing, Reasoning About, Synthesizing, and Testing Models of Stream Ecosystems. *Journal of Science Education and Technology*, 7, 215-234.

- Treagust, D. F., Chittleborough, G., & Thapelo, L. M. (2004). Students' Understanding of the Descriptive and Predictive Nature of Teaching Models in Organic Chemistry. *Research in Science Education*, 34, 1-20.
- Valk, A. E. van der (1992). *Ontwikkeling in Energieonderwijs; Een onderzoek naar begripsontwikkeling bij VWO-leerlingen in realiteitsgericht natuurkundeonderwijs*. Utrecht: CDβ Press.
- Valk, T. van der, van Driel, J. H., & de Vos, W. (2007). Common Characteristics of Models in Present-day Scientific Practice. *Research in Science Education*, 37, 469-488.
- Vollebregt, M. J. (1998). *A Problem Posing Approach to Teaching an Initial Particle Model*. Utrecht: CDβ Press.
- Wells, M., Hestenes, D., & Swackhamer, G. (1995). A modeling method for high school physics instruction. *American Journal of Physics*, 63, 606-619.
- Westbroek, H. (2005). *Characteristics of meaningful chemistry education; the case of water quality*. Utrecht: CDβ Press.
- Westra, A. S. (2006). *A new approach to teaching and learning mechanics*. Utrecht: CDβ Press.
- Westra, R. (2008). *Learning and teaching ecosystem behaviour in secondary education*. Utrecht: CDβ Press.
- White, B. Y., & Frederiksen, J. R. (1998). Inquiry, Modeling, and Metacognition: Making Science Accessible to All Students. *Cognition and Instruction*, 16, 3-118.
- Willemain, T. R. (1995). Model formulation: what experts think about and when. *Operations Research*, 43, 916-932.
- Wong, S. L., & Hodson, D. (2009). From the Horse's Mouth: What Scientists Say About Scientific Investigation and Scientific Knowledge. *Science Education*, 93, 109-130.
- Zaraza, R. (1995). The CC-STADUS project: developing and nurturing a cadre of pre-college teachers using system dynamics/computer modeling in the classroom. *The Creative Learning Exchange Newsletters*, 4(3).
- Zaraza, R., & Fisher, D. M. (1999). Training System Modelers: the NSF CC-STADUS and CC-SUSTAIN Projects. In W. Feurzeig & N. Roberts (Eds.), *Modeling and Simulation in Science and Mathematics Education*. New-York: Springer-Verlag.
- Zhang, B., Liu, X., & Krajcik, J. S. (2006). Expert Models and Modeling Processes Associated with a Computer-Modeling Tool. *Science Education*, 90, 579-604.
- Zimmerman, C. (2000). The Development of Scientific Reasoning Skills. *Developmental Review*, 20, 99-149.

Samenvatting

Hoofdstuk 1: Inleiding

Modelleren is een kernactiviteit in de natuurwetenschappen. In het voortgezet onderwijs is die activiteit echter nauwelijks herkenbaar en ook de didactische kennis die nodig is om modelleren goed vorm te geven in het onderwijs is nog zeer onvolledig. Dit proefschrift beoogt bij te dragen aan een dergelijke kennisbasis.

Modelleren is het proces waarin natuurwetenschappelijke en wiskundige concepten worden ontwikkeld en toepasbaar gemaakt om concrete systemen en verschijnselen te beschrijven, te verklaren en te voorspellen (Savelsbergh, 2008). Hoewel het maken van vereenvoudigingen en inperkingen inherent is aan het modellerenproces, zijn modellen van complexe systemen vaak nog zo ingewikkeld dat deze met de computer doorgerekend moeten worden om de dynamiek van zo'n systeem te kunnen onderzoeken en voorspellen. In engere zin wordt de term modelleren daarom ook gebruikt voor het ontwikkelen, implementeren en evalueren van computermodellen.

Zowel vanuit het oogpunt van maatschappelijke vorming als vanuit het oogpunt van voorbereiding op toekomstige natuurwetenschappelijke opleidingen en beroepen is het van belang dat leerlingen kennismaken met modelleren. Naast dit belang van modelleren als onderwerp op zichzelf biedt de literatuur ook aanwijzingen dat (computer)modelleren kan bijdragen tot een beter begrip van de behandelde vakinhoud en van de aard van natuurwetenschappelijke kennis. In het huidige onderwijs wordt echter maar zeer beperkt aandacht besteed aan modelleren. Het in model zetten van een verschijnsel, het kwalitatieve modellerenproces, komt weinig aan bod, net als het kritisch evalueren van de inperkingen en aannames die nodig zijn om tot een werkbaar modelrepresentatie te komen. Daardoor ontbreekt het zicht op wat nu de kracht is van modelleren. De curriculum vernieuwingscommissies die momenteel de eindexamenprogramma's voor de natuurwetenschappelijke vakken in havo en vwo herzien, bepleiten dan ook dat modellerenactiviteiten een centralere plaats moeten krijgen in het voortgezet onderwijs.

Om modelleren goed vorm te geven en de genoemde effecten te realiseren is een geschikte didactiek nodig. De kennis hiervan is echter nog zeer onvolledig, hetgeen de aanleiding vormt voor het ontwikkelingsonderzoek dat in dit proefschrift wordt beschreven. De centrale vraag voor dit onderzoek, luidt daarom:

Hoe en in hoeverre moeten en kunnen leerlingen in het voortgezet onderwijs leren natuurwetenschappelijk te modelleren, in het bijzonder gegeven de beschikbaarheid van ICT-modellertools?

Hoofdstuk 2: Theoretisch kader en onderzoeksmethode

De activiteiten die een modelleerder uitvoert, zijn ruwweg te ordenen in vier fasen: de probleemverkenning, de modelspecificatie en implementatie, het modelonderzoek en de evaluatie. De hoeveelheid tijd die wordt besteed aan de

verschillende fasen kan variëren. Ook worden de fasen meestal niet lineair doorlopen. Als analysekader is deze fasering echter goed bruikbaar.

In veel studies blijkt dat leerlingen problemen hebben om de aangeboden modelleeractiviteiten met voldoende kwaliteit uit te voeren. Een mogelijke interpretatie is dat het leerlingen ontbreekt aan de benodigde vaardigheden en inzichten, of zelfs dat ze nog niet aan modelleren toe zijn. Een geheel andere interpretatie is dat deze problemen optreden omdat leerlingen vrijwel nooit in de positie worden gebracht om aan een voor hen geschikte onderzoeksvraag te werken. Beide verklaringsrichtingen zijn relevant voor een didactiek van modelleren. Wij beargumenteren dat een voorwaarde voor succesvol modelleeronderwijs is dat er taken ontwikkeld worden waarbij de leerling in een positie gebracht wordt om, begeleid, alle relevante modelleeractiviteiten uit te voeren.

Een doel van modelleeronderwijs zal zijn dat leerlingen een basis-modelleercompetentie verwerven, dat wil zeggen: inzicht in het natuurwetenschappelijke modelleerproces en enige vaardigheid in het zelf modelleren van eenvoudige systemen. We definiëren de elementen van zo'n basiscompetentie en we stellen ons ten doel om onderwijs te ontwikkelen voor het realiseren van een geschikte ervaringsbasis. We beargumenteren dat dit weliswaar geen voldoende maar wel een noodzakelijke voorwaarde is voor het verwerven van een basiscompetentie.

Op zoek naar concrete ontwerprichtlijnen voor ons modelleeronderwijs bespreken we zeven eerdere curriculumprojecten waarin modelleren op de één of andere wijze vorm heeft gekregen. Op basis daarvan formuleren we een drietal uitgangspunten waaraan het onderwijs moet voldoen, willen de leerlingen – op hun niveau – ervaring op kunnen doen met natuurwetenschappelijk modelleren.

Ten eerste moet het modelleerproces dat de leerlingen doorlopen een valide afspiegeling zijn van het proces zoals dat in de natuurwetenschappen doorlopen wordt. We vatten de essentie van natuurwetenschappelijk modelleerprocessen samen in twee kenmerken. Allereerst gaat het om een doelgericht probleemoplosproces: alle te ondernemen activiteiten worden gestuurd door verwachtingen over hoe het probleem opgelost kan worden. Ten tweede is dit probleemoplosproces, in ieder geval voor zover het complexe dynamische systemen betreft, gericht op het vinden van een causaal mechanisme waarmee de gedragingen van het systeem voorspeld kunnen worden.

Het tweede uitgangspunt voor een onderwijsontwerp is dat het modelleerproces voor de leerlingen inhoudelijk betekenisvol is. Daarvoor is het niet voldoende dat het modelleerproces vanuit een expert-perspectief valide is. Gedurende het onderwijs moeten de leerlingen zelf ook steeds zicht hebben op het doel van het modelleerproces en inzicht hebben in hoe de te ondernemen activiteiten bijdragen aan het realiseren van dat doel.

Als derde uitgangspunt stellen we dat, wil er sprake zijn van een modelleerervaring, de leerlingen zelf deel moeten hebben aan het proces, bijvoorbeeld door zelf keuzes te maken. We noemen dit productieve constructieruimte.

Bovenstaande drie uitgangspunten dienen invulling te krijgen om een modelleerervaring te realiseren die als basis kan dienen voor competentieontwikkeling. De ingeperkte onderzoeksvraag voor dit onderzoek luidt daarom:

Hoe is voor leerlingen in het voortgezet onderwijs modelleerervaring vorm te geven, dat wil zeggen: hoe krijgen *natuurwetenschappelijke modelontwikkeling, betekenisvol voor leerlingen en productieve constructieruimte* adequaat vorm in een concreet modelleerproces?

Om deze vraag te beantwoorden is een ontwikkelingsonderzoek uitgevoerd waarin, uitgaande van ideeën en bevindingen uit de literatuur over modelleren, prototypisch onderwijsmateriaal is ontwikkeld, getest en geëvalueerd in een iteratief proces. Binnen het bestek van dit proefschrift zijn er twee onderzoeksrondes geweest.

Hoofdstuk 3: Eerste onderzoeksronde

Als onderwerp kozen we voor het voorspellen van de temperatuur op aarde. Dit leek geschikt omdat in dit onderwerp de genoemde kenmerken van het natuurwetenschappelijk modelleerproces herkenbaar zijn, het onderwerp voor leerlingen interessant is en de benodigde vakinhoudelijke kennis goed aansluit bij het reguliere natuurkundecurriculum.

Het eerste onderwijsontwerp is tot stand gekomen in samenspraak met klimaatonderzoekers van de Universiteit Utrecht en met een docentenpanel. Vier opeenvolgende modellen worden ontwikkeld om de temperatuur op aarde te voorspellen. In elke iteratie wordt een analyse gemaakt van het systeem, uitmondend in de formulering van een kwantitatief model dat geïmplementeerd wordt met behulp van een systeemdynamische modelleertool. Dit model wordt vervolgens doorgerekend en geëvalueerd. De evaluatie van elk model geeft vervolgens aanleiding tot een modelherziening, die wordt uitgewerkt in een volgende modelleercyclus. Gedurende de cycli wordt het model steeds complexer. In de laatste cyclus specialiseren de leerlingen zich in verschillende deelsystemen, waarvan ze de bevindingen aan elkaar presenteren.

Het ontwerp is door vier docenten getest. De uitvoeringen van de laatste twee docenten zijn in detail geanalyseerd. Ten aanzien van de natuurwetenschappelijke modelontwikkeling bleek dat leerlingen erg gericht waren op kwantitatieve modeluitkomsten. Dit sloot goed aan bij de eerste drie modellen, die inderdaad plausibele getalswaarden opleverden, maar in de vierde modelleercyclus ontwikkelden leerlingen zogenaamde *toy models*: bedoeld om karakteristieke gedragingen van het systeem kwalitatief te onderzoeken. Bij het onderzoeken en evalueren van deze modellen werden leerlingen merkbaar op het verkeerde been gezet door de kwantitatieve vraagstelling. Verder merkten we dat leerlingen de betrouwbaarheid van de modelvoorspellingen niet uit zichzelf ter discussie stelden. Ten aanzien van de bereikte betekenisvolheid concluderen we dat de ontwikkeling van de eerste drie modellen voor de leerlingen redelijk doelgericht verliep. Verder viel op dat, hoewel sommige stappen in het lesmateriaal niet logisch volgden uit de

vraagstelling, de leerlingen hiermee geen moeite leken te hebben. Tot slot stelden we vast dat het lesmateriaal te sturend was: het handelen van de leerlingen was vaak opdracht-gestuurd terwijl het de bedoeling was dat leerlingen zelf zouden meedenken over de gewenste richting en activiteiten.

Ten aanzien van de productieve constructieruimte merkten we grote verschillen op tussen de onderwijsstijlen van de onderzochte docenten. De reguliere klassencultuur bepaalde sterk of de leerlingen überhaupt inbreng hadden. Vervolgens was het nog maar de vraag of de leerlingen ook daadwerkelijk vrijheid kregen om eigen keuzes te maken. In de loop van de verschillende cycli werd bovendien niet teruggerepen op de ervaringen uit eerdere modelontwikkelingen. In het lesontwerp zelf is een dergelijke ontwikkeling onvoldoende uitgewerkt.

Op basis van de bevindingen uit de eerste ronde concluderen we dat het ontwerp de moeite waard is om verder te ontwikkelen. We benoemen een vijftal aspecten waarin het onderwijsontwerp moet worden bijgesteld. (1) Het stapsgewijs doorrekenen van het model heeft meer introductie nodig. (2) Binnen de temperatuurmodule moet de vraagstelling de ontwikkeling van de laatste modellen beter sturen. (3) De laatste modelcyclus kan beperkt blijven tot de eenvoudigste van de specialisatiemodellen, het sneeuwmodel. (4) In het onderwijsontwerp moet meer ruimte komen voor leerlingen om hun eigen ideeën over de modelinhoud in elke cyclus te verwoorden en te bespreken. (5) Ten slotte moet er in het onderwijsontwerp meer aandacht besteed worden aan de ontwikkeling van een modelleercompetentie.

Hoofdstuk 4: Tweede onderzoeksrunde

Het herontwerp is door één docent getest, namelijk door de docent in wiens onderwijs in de eerste ronde de leerlingen het meest aan de onderwijsleergesprekken bijdroegen.

Voor de tweede ronde is een nieuwe module ontwikkeld die voorafgaat aan de temperatuurmodule. Daarin wordt het numeriek integreren van dynamische processen geïntroduceerd aan de hand van een vervalproces.

In de temperatuurmodule is de vraagstelling waaraan de leerlingen werken aangepast en gericht op onzekerheid in voorspellingen. In het eerste ontwerp leken leerlingen ervan uit te gaan dat een model preciezer voorspelt naarmate het vollediger is. Deze redenering wordt in het herziene ontwerp ter discussie gesteld: de meest recente temperatuurvoorspellingen van het IPCC hebben een bredere onzekerheidsrange dan de voorgaande voorspellingen. In het herontwerp werken de leerlingen in de laatste cyclus alleen nog aan de terugkoppeling door sneeuwbedekking, met in het bijzonder aandacht voor de bijdrage van zo'n terugkoppeling aan onzekerheid in de modelvoorspellingen.

Om het lesmateriaal meer procesmatig te sturen is de gewenste modelinhoud zo min mogelijk vastgelegd, maar wordt vooral benoemd welke activiteiten en beslissingen in deze fase van het modelleerproces aan de orde zijn. De verschillende cycli zijn zoveel mogelijk volgens een vaste structuur opgebouwd, uitgaande van de fasen die in het modelleerproces onderscheiden zijn (zie hoofdstuk 2).

In de herziening van het ontwerp is er met name aandacht voor de ontwikkeling van vier aspecten van het modellerproces: een kwalitatief model vormen, schattingen maken, differentievergelijkingen opstellen en modelgedrag analyseren.

De wijzigingen in het ontwerp hebben in een aantal opzichten tot een verbeterde onderwijsuitvoering geleid, zoals wat betreft de omvang van de module en wat betreft de inbreng van leerlingen bij het construeren van de kwalitatieve modellen. In de loop van de module neemt de complexiteit van de onderzoeksvragen en de gebruikte modellen toe, maar het niveau blijft haalbaar voor de leerlingen.

De doorgevoerde veranderingen leidden echter nog niet allemaal tot het gewenste resultaat. Met name wat betreft de doelgerichte modelontwikkeling week de uitvoering sterk af van het modellerproces dat door de ontwerpers beoogd werd. De wijze waarop het modellerproces zich ontwikkelde, werd namelijk niet tot onderwerp van discussie gemaakt in de lesuitvoeringen. De rol van de docent hierin was cruciaal, omdat hij in het nieuwe, open lesmateriaal veel verantwoordelijkheid kreeg voor het verloop van modellerproces..

In een eventueel volgend ontwerp blijft het een aandachtspunt welke sturing voor de leerlingen en de docent noodzakelijk is om de gewenste didactische kwaliteit te realiseren, en hoe deze sturing vorm te geven is.

Hoofdstuk 5: conclusies en discussie

Ten aanzien van natuurwetenschappelijke modelontwikkeling heeft het ontwikkelingsonderzoek geresulteerd in twee concrete onderwijsmodules waarin een causaal mechanisme ontwikkeld wordt om het gedrag van een systeem te verklaren. Het historisch verloop van het wetenschappelijk proces lijkt nog steeds een geschikt uitgangspunt om de aard van het modellerproces inzichtelijk te maken. Om een natuurwetenschappelijk modellerproces vorm te geven in het onderwijs is het wel belangrijk dat procesdoelen en inhoudelijke doelen elkaar niet in de weg zitten, omdat het resulterende proces in combinatie met grote inhoudelijke leerdoelen te complex wordt. We adviseren daarom theorie-genererend modelleren te onderscheiden van theorie-toepassend modelleren.

Het vorm geven van een voor leerlingen betekenisvol modellerproces wordt sterk beïnvloed door de klassencultuur. In een directieve aanpak, met de docent als 'voorbeeld-modelleerder', kunnen de leerlingen geavanceerde modellen ontwikkelen, maar hun eigen ideeën over het te modelleren systeem en over de geschikte aanpak blijven dan buiten beeld. Bij een meer leerlinggerichte aanpak is het cruciaal dat leerlingen en docenten hun modelleerkeuzen motiveren om zodoende de doelgerichtheid van die keuzen zichtbaar te maken. Dit zal alleen lukken als de leerlingen tenminste een minimale basiskennis hebben van de benodigde basisbegrippen.

Voor het realiseren van productieve constructieruimte concluderen we dat, net als ten aanzien van betekenisvolheid, de klassencultuur sterk de kwaliteit van de gerealiseerde constructieruimte bepaalt. Als er veel ruimte is voor leerlingen om bij te dragen wil dat nog niet zeggen dat deze bijdragen ook productief worden als het

zowel voor de docent als de leerlingen niet gebruikelijk is om verantwoordelijkheid voor gemaakte keuzes bij de leerlingen te leggen. Ook leidt het herhaaldelijk doorlopen van de modelleercycli er niet automatisch toe dat leerlingen een toenemende zelfstandigheid tonen. Om productief gebruik te maken van eerdere modelleeractiviteiten zijn de leerlingen gebaat bij een systematische reflectie op de in eerdere cycli gevolgde processtappen waarin de benodigde opbrengsten benoemd worden en de wijze waarop die opbrengsten gevonden moeten worden.

In een curriculumlijn modelleren is het van belang dat modules gericht op het verwerven van authentieke modelleerervaring voorafgegaan worden door onderwijs waarin relevante voorkennis verworven wordt. Inhoudelijke leerdoelen kunnen eveneens verdiepende en abstraherende onderwerpen zijn. Na de klimaatmodule (of na een aantal van dergelijke modules) zou het bijvoorbeeld goed mogelijk zijn verschillende typen systeemgedrag of methoden achter numerieke integratie te behandelen.

Als de inzet is dat leerlingen binnen het behandelde domein hun kennis kunnen toepassen in nieuwe situaties dan kan het expliciet behandelen van een reeks paradigmatische modellen, zoals Hestenes (1987) dat doet, een krachtig hulpmiddel zijn. Het ontwikkelen en leren gebruiken van deze modellen valt dan samen met het aanleren van de reguliere vakinhoud. Hiervoor lijken schoolse contexten, zoals in de module van het radioactief verval, beter geschikt dan de open contexten zoals van de temperatuurmodule. Om hun kennis in wisselende contexten te kunnen gebruiken zouden leerlingen inzicht moeten ontwikkelen in de overeenkomsten en verschillen tussen situaties op het niveau van de modelstructuren. De systeemdynamische beeldtaal kan hierbij ondersteuning bieden (in lijn met Fuchs' curriculum (2007)), maar leerlingen moeten deze ook kunnen relateren aan de differentievergelijkingen voor een systeem en het resulterende gedrag dat een modelstructuur laat zien.

Wil een modelleercurriculum bruikbaar zijn voor een brede groep docenten dan moet de docent voldoende vrijheid hebben om zijn eigen onderwijsstijl te volgen en eigen accenten te leggen terwijl de essentie van het curriculum overeind blijft. De huidige temperatuurmodule is minder geschikt om op grote schaal te implementeren. Om het onderwijsmateriaal geschikt te maken voor een bredere invoering zou een serie kleinere modules nodig zijn om alle gewenste modelleeraspecten aan bod te laten komen. Ook als er optimale lesmaterialen en handleidingen beschikbaar zijn blijft (computerondersteund) modelleren voor veel docenten een onzeker didactisch avontuur. Hoe docenten het best ondersteund kunnen worden bij het ontwikkelen van een modellerende onderwijsaanpak is een vraag voor vervolgonderzoek.

English summary

Chapter 1: Introduction

Modelling plays a central role in science. However, in secondary science education this activity is rarely, if at all, emphasised. Moreover, didactical knowledge about how to teach modelling in secondary education is lacking.

Modelling is the process in which scientific and mathematical concepts are developed and used to describe, explain and predict real world phenomena. On the one hand, making simplifications and reductions is inherent to the modelling process, on the other hand computer power is needed to calculate developments in models of complex dynamical systems.

As a key activity, an insight into models and modelling is an important learning aim in secondary science education, from the viewpoint of teaching for citizenship as well as from the viewpoint of preparing for a future scientific study and career. Furthermore, the literature suggests that modelling may contribute to a better understanding of scientific content, and insight into the nature of scientific knowledge.

However, in everyday science teaching practice, there is little emphasis on modelling as a process. Primarily, concern is on teaching physics concepts and applying formulas to calculate quantities. The identification of the model structure or the evaluation of simplifications and assumptions – i.e. the qualitative modelling process – usually goes without saying. Moreover, in most physics textbooks computer modelling is presented as an isolated topic rather than being integrated within the various physics domains. Typical assignments are to make adjustments to given computer models and to fit computer-generated graphs with experimental data. This requires the pupils to manipulate the model parameters and formulas, but this hardly requires them to be engaged in a modelling process, i.e. in constructing and/or exploring their own computer models. As a consequence, pupils have little chance to appreciate the value and the power of modelling. In the policy documents that direct current science curriculum reforms in the Netherlands it is hence argued that modelling should be assigned a more prominent place in science and mathematics education.

Besides minimal modelling practice in secondary education, didactical knowledge for teaching modelling in secondary education is also poor. For these reasons, a research project was undertaken, which is reported in this thesis. Our main aim was:

For pupils in secondary education, what are feasible learning aims regarding scientific modelling and how may these be reached, especially given the ICT modelling tools currently available?

Chapter 2: Theoretical and methodological framework

Four main stages can be differentiated in a modelling process: exploration of the problem, specification and implementation of the model, research of the model and evaluation of the model. In modelling practice these stages are not always followed in a linear way. However, for designing modelling education this sequencing can be useful.

A number of research studies have shown that pupils find it difficult to perform modelling activities adequately. From these findings one could conclude that pupils do not possess the skills and knowledge necessary for modelling, or even that they are not sufficiently mature for modelling. However, another interpretation may be that pupils are rarely asked to work on modelling assignments that are suitable for them. Both possible interpretations are relevant to a pedagogical theory of modelling. We argue that a prerequisite for teaching modelling successfully is to develop assignments that, with proper guidance e.g. from the teacher, require pupils to perform all relevant modelling activities themselves.

A major outcome of teaching modelling should be that pupils acquire a basic modelling competence. We define the elements of such basic competence as having insight into the scientific modelling process and possessing basic skills for modelling simple systems. Our purpose was to design an educational intervention which encouraged the pupils to develop their own modelling experiences, suitable as a basis for a basic modelling competence. Gaining experience is not a sufficient condition for acquiring a competence, but it is a necessary one.

We discuss seven curriculum projects for teaching modelling, in order to find design guidelines for the intervention to be developed. Three design principles are hence formulated that must be addressed in order to ensure that pupils gain experience with scientific modelling at their own level, as follows.

First, the modelling process that the pupils work out needs to be a valid representation of the scientific process. Its major characteristics are (1) that is a purpose-driven problem solving process, i.e. all activities are guided by expectations about how these activities may contribute to solving the problem, and (2) it is aimed at identifying a causal mechanism to predict a complex system's behaviour.

Secondly, the modelling process must be meaningful for the pupils themselves. It is not sufficient that the process is valid from an expert point of view. Pupils need to experience that the modelling process is purpose-driven from their own point of view. Hence, at any moment during the modelling process, the pupils should have a clear idea of the goal of the process and understand how the activities they perform contribute to that goal. Content-related knowledge and insights on the basis of which choices and decisions are to be made should correspond with pupils' ideas.

The third principle is that pupils must contribute to the modelling process actively in order to experience the process themselves, and especially by making their own choices. We term this ownership: choices, assumptions, decisions or evaluations are based on pupils' contributions, pupils are able to justify their choices and their choices matter.

We regard all three principles as necessary conditions for gaining experiences as a basis for the development of a modelling competence. The research question is then specified as:

How to design an educational intervention in which pupils in secondary education gain modelling experience, i.e.: how to implement *scientific model development*, *meaningfulness* and *ownership* in a concrete modelling process?

To answer this question we conducted a design-based study. Starting from initial ideas and findings from the literature about modelling, we developed prototypical teaching materials that were tested, evaluated and redesigned in two consecutive research cycles.

Chapter 3: First research cycle

We developed teaching materials for predicting the temperature of the Earth. This seemed a suitable topic because it resembles the characteristics of a real scientific modelling process, we expected the theme to appeal to the pupils and the required content knowledge fits well with the regular physics curriculum.

The first design was created with the support of climate scientists at Utrecht University and a teachers' panel. In this design, the pupils' broad interest and understanding of the climate is used to pose a research question that will guide their further modelling process. They develop four models of increasing complexity to predict the global mean temperature. In each modelling cycle, the system is analysed qualitatively, a quantitative model is formulated which is implemented and run using a systems dynamical modelling tool, and evaluated. The outcome of each evaluation gives rise to a new modelling cycle in which refinements are made. In the first cycle, only the bare surface of the Earth is taken into account. In the second and third model, also the greenhouse mechanism and the effect of rising CO₂-levels are modelled. In the final cycle, pairs of pupils develop different 'expert models' (including the dissolving of CO₂, snow cover or cloud cover) and present these to each other..

The design was tested with four teachers, of which only the last two were analysed in detail. With regard to the scientific model development, pupils appeared to focus mainly on quantitative outcomes, which is in line with the tasks they work on and which worked out well for the initial three models. In contrast, the last model the pupils construct was a toy model, intended to explore the system's behaviour qualitatively. Rather than numerical values, the pupils were intended to observe sudden 'jumps' due to positive feedbacks. The main problem they work on asks for a numerical value, however, and this led the students in a different direction. We also found that pupils are not likely to question the reliability of the models' outcomes themselves. A final conclusion regards the use of the software to calculate a value for the first model, which was not really necessary.

With regard to realizing meaningfulness, we concluded that the development of the first three models was roughly purpose-driven as intended. However, pupils' ideas about energy and temperature did not always correspond with what was needed in the model. Another finding was that, although some activities did not follow logically from the problem the pupils worked on, the pupils did not experience this as a problem. Finally, we realized that the textbook was too directive. Consequently, the pupils were often filling in assignments rather than thinking ahead about what needed to be done.

With regard to ownership we noticed large differences between the teaching practices of the participating teachers. Normal classroom culture determined strongly

whether pupils contributed to the lessons, and even if they did so it remained challenging for the teachers to offer the pupils the freedom to make their own choices. Moreover, experiences in earlier modelling cycles hardly influenced later cycles thus preventing pupils from performing certain modelling tasks more independently. Such a development was insufficiently worked out in the design itself.

Based on the findings of the first round of research we decide it worthwhile to further develop the design. We identified five main issues that required attention. (1) A more extended introduction was needed into the stepwise calculation method of the model. Elaborating on this topic within the setting of the temperature module would become too demanding, however. Therefore, a new introductory module on this topic had to be developed. (2) The overall problem for the temperature modelling process required optimisation in order to better guide the development of the final models. (3) The model with snow cover provided the most insight compared to the other two expert models. Since this is also the most simple one, it seemed reasonable to limit the final model extension to this mechanism. (4) The design should leave more room for the pupils to formulate and discuss their own ideas regarding model mechanisms. To achieve this, the textbook needed to be rewritten in a less directive style. (5) More attention needed to be paid to the development of a modelling competence.

Chapter 4: Second research cycle

The optimized design was tested in a second research cycle. We chose to implement it with the teacher who was best able to make pupils contribute to the plenary discussions of the modelling process.

A new module was designed that preceded the temperature module. In this new module, the stepwise calculation of dynamical processes was introduced for radioactive decay. The problem pupils encounter is how to determine the half-life of a slowly decaying radioactive sample based on measurement data. Together with their teacher, pupils formulate the difference equations necessary to perform the calculations and construct a computer model to implement these equations for the decay process.

The main problem in the temperature module concerned uncertainties in the predictions. During the first cycle, we found that the pupils tended to think that a more complex model would predict more accurately. In the module this assumption is disputed, as recent IPCC predictions on the global mean temperature cover a wider range than earlier predictions. We expected that the pupils would find this intriguing enough to be motivated to find a possible source that causes such an increasing range of uncertainty.

In the final cycle of the optimised module, all the pupils modelled snow cover only. The introduction for this final cycle was focussed on promoting investigation of the model. The pupils' attention is drawn towards some striking features of the behaviour of polar ice, to ensure that they possess concrete expectations that may guide the investigation of the model's dynamics.

The textbook was rewritten in order to steer the modelling process rather than the modelling content. Rather than describing the content it now specified which activities and decisions may be relevant. Each cycle shares the same setup, derived from the stages used to describe the modelling process in chapter 2. The first cycle does contain some content-related hints, but these become less frequent in subsequent cycles. In this way, we hoped to realise a plenary modelling process which made it necessary for the pupils as well as the teacher to be explicit about the decisions that need to be made and hence to make their own choices.

Regarding the development of a modelling competence, we mainly focussed on the following aspects: creating a qualitative model, making estimations, formulating difference equations and analysing the models' behaviour.

The changes we made in the design turned out to improve the resulting teaching process in a number of ways, e.g. with respect to the length of the course and the contributions of the pupils to constructing qualitative models. Although the research questions and the models gain in complexity throughout the module, they remained attainable for the pupils.

However, we did not succeed in establishing all the intended effects. In particular, the actual modelling process of the pupils deviated strongly from the purpose-driven modelling process as intended. For example, in the module on radioactive decay the teacher was mostly focussed on obtaining the 'right' answers, but the problem and the rationale of the assignments were hardly discussed. As a consequence, the need to use a computer was not clearly motivated. In the temperature module, model representations and the pupils' explanations were repeatedly improved and focussed. However, the reasons why it was necessary to do this were not discussed. Hence, in the teaching practice the rationale for the way the modelling processes developed remained unclear. The role of the teacher was crucial in the optimised design, with the teacher bearing the whole responsibility for the classroom process. Therefore, we concluded that during the preparation for the study insufficient agreement had been reached between the teacher and the designer about the interpretation of meaningfulness and its consequences for teaching practice with regard to this module.

If the design were to be further optimised, the question remains which form of scaffolding would be required (for the pupils as well as the teacher) to guarantee sufficient didactical quality during implementation. More specifically: how this scaffolding should build upon the teacher's own beliefs about teaching – and especially with regard to teaching modelling.

Chapter 5: Conclusions and discussion

In this final chapter it is discussed what can be learned from the studies described above regarding the design of an educational intervention in which pupils in secondary education acquire modelling experience. First, we discuss findings related to the implementation of *scientific model development*, *meaningfulness* and *ownership*. Next, how acquiring authentic modelling experience is related to a modelling curriculum and under which conditions such a curriculum may become successful.

Concerning the scientific model development, two modules were designed in which a causal mechanism is constructed to explain a system's behaviour. The first regards a rather traditional and simple system (radioactive decay), the other a complex climate system. The assignments, (sub-)questions and models become more and more complex along the way, but the content and level of the module are well within the pupils' capacities. However, sometimes it became unclear where to go because of the different goals that were set in the module, such as gaining climate knowledge as well as process knowledge. Therefore it is recommended that different goals be addressed in different modules. Focussing on the scientific modelling process should not be combined with substantive content goals, or the teaching will be at risk of being too complicated. It is advised to separate theory-generating modelling processes from theory-applying modelling processes. In a modelling curriculum, it is important that modules geared at gaining authentic modelling experience only follow after the teaching of relevant and necessary content knowledge. However, content-related learning goals may as well be set to address and systematize issues that are raised during process-oriented modules. For example, after the module on predicting temperature or after a number of similar modules a proper goal would be to deal with the behaviour of different types of systems or different methods for numerical integration.

Establishing a meaningful modelling process is highly influenced by the normal classroom culture. In a directive approach in which the teacher shows an expert modelling process, pupils may develop advanced models. However, their own ideas about the system and about how to approach the problem remain unknown. In a pupil-oriented approach it is easy to underestimate the need for explicitly motivating model decisions by the pupils as well as those made by the teacher, in order to establish a truly purpose-driven process. Furthermore, pupils need to know the basic concepts required for the model.

Teaching the paradigmatic models of a domain (see e.g. Hestenes (1987)) may be a powerful tool to enable pupils to apply their knowledge in a variety of contexts. Developing these models and teaching pupils how to use them then coincides with teaching the regular physics concepts. Simple contexts, as used in the module on radioactive decay, may be more suitable to teach these models than open-ended contexts like the climate. To learn to use their knowledge in a variety of contexts, pupils need to develop insights into the similarities and differences between situations at the level of model structures. The systems' dynamical graphics may scaffold these insights (cf. Fuchs (2007)), but students should also be able to relate these graphical structures to the difference equations that describe the model and the resulting behaviour of the model.

To what extent the pupils experience ownership is also highly dependent on the classroom culture. Even if they do contribute adequately, this does not necessarily imply that their contributions will be used productively. Teachers as well as the pupils themselves may not be used to pupils bearing responsibility for choices to be made. Also, experiencing the modelling cycle repeatedly does not guarantee that pupils become more independent modellers themselves. They would benefit from

systematic reflection on modelling activities which specifies clearly what each activity should yield and how these yields are achieved.

To end this chapter, some central points are discussed relating to the implementation of a modelling curriculum, concerning the design of proper teaching materials and the teaching itself.

First of all, if a large group of teachers is to work with the curriculum, it should allow for sufficient freedom for each teacher to teach according to his or her own teaching style and to make their own emphases, while retaining the curriculum's essence. The temperature module we designed does not address this demand very well. To improve the general usability of the teaching materials, a series of smaller modules is needed to address all goals one by one and which describes the essential features of the intended modelling process are mentioned in the text book. Furthermore, a teaching guide should accompany the textbooks to explain the rationale for the teaching materials and to provide practical tips, such as common mistakes and recommendations for how to test a pupil's individual model.

Even if perfect textbooks and teaching guides were available, teaching computer-supported modelling will still remain a challenge for many teachers. One of the prominent questions for further research is therefore how to support teachers to develop a modelling teaching practice.

Dankwoord

Als ik zie dat het glas half vol is, zie ik ook dat het leven van buitenkansjes aan elkaar hangt. Net afgestudeerd kreeg ik de gelegenheid om in het onderzoekstraject te stappen dat tot dit proefschrift heeft geleid. Op deze plaats wil ik mijn dank uitspreken naar Piet en Elwin voor die mogelijkheid. Ik heb genoten van de werkbesprekingen met jullie, of preciezer gezegd: ik heb genoten van jullie tijdens die besprekingen. Jullie bijdragen waren vrijwel altijd helder geformuleerd, met verve gebracht en tegengesteld. Een genoegen om naar zo'n titanenstrijd te luisteren!

Als ik zie dat het glas half leeg is, realiseer ik me weer welk een worsteling het promotietraject is geweest. Piet en Elwin, ik ben dankbaar dat jullie me naar het einde hebben gesleept. Geen boekje van 100 pagina's, zoals ik me ten doel had gesteld. Een proefschrift dat goed genoeg is, dat moet het dan maar zijn. De werkbesprekingen leverden niet altijd een eenduidige richting op voor de verdere voortgang van het onderzoek. Te weinig gedaan met het werk 'van hier' of te veel geloofsartikelen om een ontwerpbeslissing te verantwoorden: je zou twee verschillende versies van een proefschrift schrijven.

Piet, uit dankwoorden die aan jouw begeleiding zijn gewijd in eerdere proefschriften weet je dat je gewaardeerd wordt om je scherp inzicht en het vermogen om de vinger op de zere plek te leggen in een complex betoog. Door deze eigenschappen ben je in staat om een warrig verhaal van een promovendus voor hem- of haarzelf te verhelderen en een richting te wijzen voor verbetering. Ik onderschrijf deze ervaringen. Behalve om je inhoudelijke bijdragen heb ik ook van je genoten om je humoristische verhalen over vakantie, verhuizing en andere belevenissen.

Elwin, jouw taak als dagelijks begeleider heb je geweldig invulling gegeven. Je kiest voor een arbeidsintensieve wijze van begeleiden: als je de gelegenheid hebt, werk je het liefst aan hetzelfde toetsenbord. Ik heb er veel steun aan gehad om samen met jou het modelleerproces in een onderwijsvorm te gieten, een betoog op te zetten en aan teksten te schaven.

Albert, Ben, Chris, Dirk, Lennart en Lars: op deze plaats wil ik nog eens mijn waardering uitspreken voor jullie grote inzet gedurende de voorbereiding en de implementatie van het onderwijs. Ik heb jullie onderwijs kritisch gevolgd, en dan lijkt 't er geregeld op dat het glas half leeg is. Natuurlijk kan het glas ook half vol zijn. Ik heb jullie meegemaakt als bevlogen docenten, en daardoor hebben jullie dit promotie-onderzoek mogelijk gemaakt.

Het is verbazingwekkend hoezeer de ervaringen in een promotietraject herkenbaar zijn voor collega-promovendi. Gjalt, Marjon en Katrina, met jullie kon ik de vele perspectiefwisselingen in het traject delen. Als ik zag dat het glas half leeg was, was er altijd wel een van jullie die er op wees dat het glas eerder half vol was (hetgeen me niets hielp) of iemand die betwijfelde of het glas überhaupt wel bestond (wat uitstekend hielp om met nieuw elan aan de slag te gaan). René en Marijn, jullie leken alleen maar volle glazen te zien, en daardoorheen ook nog eens flessen en vaten. Afgezien daarvan was het erg gezellig als jullie ook 'op het lab' waren.

Florine, je was een fijne kamergenote en het spijt me erg dat zelfs de demotivators uiteindelijk niet meer hielpen om de boel vlot te trekken. Ook alle overige cd-medewerkers annex FIsmeërs: bedankt voor de gezellige en inspirerende werkonderbrekingen.

Waarde niet-meer-zo-nieuwe collega's in Twente: ik ben erg blij dat ik bij jullie al aan de slag kon, ook al was m'n proefschrift nog niet helemaal af. Een nieuwe omgeving, nieuwe taken, nieuwe inhouden: er kwam weer leven in de brouwerij, en daar was ik hard aan toe.

Harrie, Katrina, Judith, pap en Sandra: bedankt voor de feedback op de spelling en grammatica van het manuscript en voor de hulp bij het opmaken ervan.

Judith, Jochem en Inge: nu is het boekje dan eindelijk af. Sorry dat 't wat langer duurde dan beoogd. Jullie zijn er mede debet aan; gezinstijd is nu eenmaal geen werktijd. Ik hoop dat ook in de toekomst goed te kunnen scheiden. Met jullie is het glas goed gevuld.

Curriculum vitae

Bart Ormel is op 27 april 1979 geboren in Haaksbergen. In 1997 haalde hij zijn gymnasiumdiploma aan het Christelijk Lyceum Almelo / CSG Het Noordik in Almelo, waarna hij een vormingsjaar deed aan de Evangelische Hogeschool in Amersfoort. In 1998 startte hij zijn studie natuurkunde, richting grondslagen, aan de Universiteit Utrecht, die hij uitbreidde met de studie filosofie van de natuurwetenschappen. In 2002 trouwde hij met Judith, en eind 2003 verkreeg hij zijn doctoraaldiploma's natuurkunde en filosofie. In januari 2004 begon hij als aio bij het Freudenthal Instituut (toen nog het Centrum voor β -didactiek). Behalve een proefschrift bracht deze periode hem ook twee kinderen (2005 en 2009). Sinds oktober 2008 is hij als universitair docent verbonden aan de vakgroep Curriculumontwikkeling en Onderwijsinnovatie van de Universiteit Twente, waarvoor hij met zijn gezin naar Hengelo is verhuisd.

Flsme-reeks

Voortzetting van de CD-β Wetenschappelijke bibliotheek

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. Vogelesang
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 arithmetics strategies 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
35. Natuur in pluralistisch perspectief; Theoretisch kader en voorbeeldlesmateriaal voor het omgaan met een veelheid aan natuurbeelden - M. Margadant-van Arcken en C.S. van den Berg
36. Duurzaamheid als leergebied; Conceptuele analyse en educatieve uitwerking - S.Lijmbach, M. Broens en D. Hovinga i.s.m. M. Margadant-van Arcken
37. A problem-posing approach to teaching decision making about the waste issue- J. Kortland
38. Teaching for Scientific Literacy: Context, Competency, and Curriculum - O. de Jong, E.R. Savelsbergh en A.H. Alblas
39. Met sprongen vooruit. Een productief oefenprogramma voor zwakke rekenaars in het getallen gebied tot 100 - een onderwijsexperiment - J.J.M. Menne
40. A gateway to numeracy. A study of numeracy in adult basic education - M. van Groenestijn
41. Reinvention of early algebra. Developmental research on the transition from arithmetic to algebra - B.A. van Amerom
42. Education in Israel on collaborative management of shared water resources - M.Dressler
43. Coping with the abstract and complex nature of genetics in biology education The yo-yo learning and teaching strategy - M.C.P.J. Knippels

44. Werken aan kwaliteitsverbetering van leerlingonderzoek. Een studie naar de ontwikkeling en het resultaat van een scholing voor docenten – Th.J.M. Smits
45. Teaching formal mathematics in primary education. Fraction learning as mathematising process – R. Keijzer
46. Leren kijken door de ontwerpersbril. Het vorm-functieperspectief als leerdoel van natuurkundeonderwijs – D.J.Boerwinkel
47. Als je begrijpt wat ik bedoel. Een zoektocht naar verklaringen voor achterblijvende prestaties van allochtone leerlingen in het wiskundeonderwijs – C. van den Boer
48. Learning algebra in a computer algebra environment. Design research on the understanding of the concept of parameter – P. Drijvers
49. Towards systems thinking in cell biology education – R.P. Verhoeff
50. Design research in statistics education. On symbolizing and computer tools – A.Bakker
51. Modelling motion: from trace graphs to instantaneous change – L.M. Doorman
52. Characteristics of meaningful chemistry education. The case of water quality – H.B. Westbroek
53. The structure of current school chemistry. A quest for conditions for escape – B. van Berkel
54. A new approach to teaching and learning mechanics – A.S. Westra
55. Ont-dekken en toe-dekken: leren over de veelvormige relatie van mensen met natuur in NME-leertrajecten duurzame ontwikkeling – D. Hovinga
56. Learning and teaching ecosystem behaviour in secondary education. Systems thinking and modelling in authentic practices. R.H.V. Westra
57. Leren vermenigvuldigen met meercijferige getallen – C. Buijs
58. Op weg naar een didactiek voor natuurkunde-experimenten op afstand. Ontwerp en evaluatie van een via internet uitvoerbaar experiment voor leerlingen uit het voortgezet onderwijs – M.Engelbarts
59. Young children's spatial structuring ability and emerging number sense – F. van Nes
60. The nature of research in biological education: Old and new perspectives on theoretical and methodological issues – a selection of papers presented at the VIIth Conference of European Researchers in Didactics of Biology (ERIDOB), September 16th-20th, 2008. M. Hammann, A.J. Waarlo, K.Th. Boersma, eds.
61. Het natuurwetenschappelijk modelleren van dynamische systemen; Naar een didactiek voor het voortgezet onderwijs – B.J.B. Ormel