# Beschrijving lessenreeks

De didactische aanpak van een docent is van groot belang tijdens alle eerder beschreven fases van het modelleerproces (de Jong & van Joolingen, 1998). Daarom is het belangrijk om voor de lessenreeks gefundeerde keuzes te maken op basis van literatuur. Deze lessenreeks zal niet uit alleen modelleeropdrachten bestaan omdat leerlingen kennis moeten hebben gemaakt met de achterliggende concepten voordat ze aan de modelleeropdrachten beginnen. Het andersom aanbieden van deze activiteiten heeft namelijk niet het gewenste effect op de conceptuele voortgang van leerlingen (de Jong & van Joolingen, 1998). Er zal daarom voorafgaand aan modelleeropdrachten eerst tijd worden besteed aan de bijbehorende concepten.

Het bovenstaande heeft geleid tot een aantal ontwerpkeuzes voor de lessenreeks modelleren. Deze ontwerpkeuzes worden getoetst aan het curriculummodel van van den Akker (2009). Dit model beschrijft de doelen en inhouden van een leerplan volgens negen componenten die samen de inhoud van het leerplan vormen. Volgens van den Akker is een leerplan compleet als alle componenten zijn verantwoord. In tabel 1 staan alle categorieën van het model van van den Akker met de ontwerpkeuzes voor de lessenreeks.

**Tabel 1: Alle fasen van het curriculum model met de bijbehorende ontwerpkeuzes.**

|  |  |
| --- | --- |
| Categorie uit curriculummodel | Ontwerpkeuze |
| Doelen: Waarheen leren zij? | - Het ontwikkelen van conceptueel begrip binnen het domein kracht en bewegen.  - Het verwerven van vaardigheid in het dynamisch modelleren. |
| Inhoud: Wat leren zij? | - Een natuurkundig probleem analyseren waarbij relevante grootheden en relaties in een probleemsituatie worden geselecteerd.  - De juiste verbanden leggen tussen de grootheden in een model.  - Door het doen van aannames en vereenvoudigen het geanalyseerde probleem inperken tot een hanteerbaar probleem.  - Toetsbare verwachtingen creëren horend bij het model.  - Het model evalueren op basis van de modeluitkomsten waarbij een terugkoppeling kan worden gemaakt naar de correctheid van het model.  - Het lezen en analyseren van plaats-tijddiagrammen en snelheid-tijddiagrammen. In deze analyse worde grootheden bepaald met behulp van de raaklijn- en oppervlakte methode.  - De eerste en de tweede wet van Newton uitleggen en toepassen.  - Krachten op een systeem analyseren waarbij de krachten in dezelfde of tegengestelde richting werken. |
| Leeractiviteiten: Hoe leren zij? | - De lessenreeks wordt zo ontworpen dat deze op andere middelbare scholen kan worden ingezet zoals besproken met het SLO.  - Leerlingen doorlopen tijdens de modelopdrachten de ontwerpfases van de modelleercyclus van Halloun (2004). De eerste twee fases worden doorlopen met behulp van de post-it methode van Teixeira en de whiteboard methode van Wells. |
| Rol leraar: Hoe is de rol van de leraar bij het leren? | - De docent geeft elke les instructie en bespreekt met de klas een model in verschillende fases volledig door. Leerlingen zien hierdoor waaraan gedacht moet worden tijdens alle modelleerfases. Aan het einde van de lessenreeks, tijdens de eindopracht, neemt de docent meer coachende rol op zich en leerlingen bijsturen waar nodig. |
| Materialen en bronnen: Waarmee leren zij? | - De modelleeropdrachten zullen worden uitgewerkt met behulp van laptops in het softwareprogramma Coach 7.  - Alle opdrachten zullen worden uitgevoerd met behulp van tekstuele modellen. Grafische modellen worden in deze lessenreeks niet gebruikt. |
| Groeperingsvorm: Met wie leren zij? | - Alle opdrachten tijdens deze lessenreeks worden bij voorkeur uitgevoerd in 2-tallen. De docent kan ervoor kiezen om de eindpracht in 3-tallen uit te laten voeren mocht dat het leerlingaantal hierom vragen. |
| Locatie: Waar leren zij? | - De lessenreeks kan op elke middelbare school worden uitgevoerd in een gewoon klaslokaal.  - De lessenreeks is geschikt voor leerlingen uit vwo 4 en de leerlingen hoeven geen voorkennis te hebben wat betreft modellen. Wel is er bepaalde voorkennis nodig wat betreft kracht en beweging. Dit wordt later gespecifieerd. |
| Tijd: Wanneer leren zij? | - De lessenreeks bestaat uit 10 tot 12 lessen, afhankelijk van de omvang van de eindopracht en hoeveel extra tijd de docent neemt om opdrachten uit te werken.  - Elke les wordt ontworpen voor 40 minuten. Dit omdat het op zoveel mogelijk scholen toepasbaar moet zijn. Scholen met lessen van 50 minutes kunnen iets meer tijd nemen voor de lesonderdelen. |
| Toetsing: Hoe wordt hun leren getoetst? | - De kennis van het begrip model wordt getoetst met de enquête van Treagust, Chittleborough & Mamiala (2002).  - Conceptuele voortgang wordt getoetst met behulp een combinatie van de Force Concept Inventory, de Force and Motion Conceptual Evaluation en de Test of Understandig Graphs in Kinematics.  - De lessenreeks zal worden afgesloten met een open ontwerpopdracht waarbij leerlingen zelfstandig werken aan een casus. Deze casus wordt uitgewerkt tot een verslag waarin alle modelleerfases worden besproken. Het verslag wordt beoordeeld aan de hand van een rubric.  - Leerlingen krijgen op het eindproefwerk van het domein een modelleervraag zoals ze deze stellen op het eindexamen natuurkunde. |

# Verantwoording lessenreeks

**Modelleren en dynamisch modelleren.**

Modelleren is een breed begrip en zelfs onderzoekers geven aan dat er geen unieke definitie is van wat een model precies is (van der Valk, van Driel, & de Vos, 2007). Echter, het begrip “vertegenwoordigen” lijkt in veel definities terug te komen. Gilbert en Ireton (2003) geven aan dat een model een systeem is van objecten of symbolen die een ander systeem vertegenwoordigen. Windschitl en Thompson (2006) zien modellen als een vertegenwoordiging van hoe bepaalde onderdelen van de wereld werken en Schwarz en Gekwerere (2007) definiëren wetenschappelijke modellen als vertegenwoordigingen van delen van wetenschappelijke theorieën. Modellen worden niet alleen in de natuurkunde toegepast maar ook in andere wetenschappelijk disciplines zoals biologie en econometrie. Modelleren binnen de natuurkunde wordt gedefinieerd als het maken van een vereenvoudigde fysische representatie van een praktijksituatie met behulp van aannames en benaderingen (Chabay & Sherwood, 1999).

Een specifieke vorm van het brede begrip modelleren is dynamisch modelleren. Deze vorm van modelleren wordt beschreven als een proces waarin een zeker systeem of een bepaalde situatie in wiskundige termen beschreven wordt (Ormel, 2010). Van Buuren (2014) noemt het modelleren in een computergestuurde omgeving. Leerlingen koppelen daar natuurkundige formules en vergelijkingen aan elkaar om een natuurkundig proces te beschrijven. Sins, Savelsbergh en van Joolingen (2005) komen met een soortegelijke uitleg en zien dynamisch modelleren “*als een proces waarbij natuurwetenschappelijke en wiskundige concepten worden gecombineerd in een programmeeromgeving om natuurkundige processen en verschijnselen te verklaren en te voorspellen*.” Het grootste verschil tussen modelleren en dynamisch modelleren is dat bij dynamisch modelleren altijd variabelen aan de orde zijn die in de tijd veranderen. Om deze niet-lineaire differentiaalvergelijkingen op te kunnen lossen is een programmeeromgeving nodig is. Hierdoor heeft dynamisch modelleren veel raakvlakken met programmeren en hebben leerlingen ook programmeervaardigheden nodig om succesvol te kunnen zijn in het opstellen van dynamische modellen. In dit onderzoek zullen de begrippen modelleren en dynamisch modelleren door elkaar worden gebruikt waarbij altijd het laatstgenoemde begrip bedoeld wordt.

**Belang van modelleren.**

De afgelopen jaren is er veel onderzoek gedaan naar de bijdrage van dynamisch modelleren als leeractiviteit in het secundair onderwijs. Dit heeft een groot effect gehad op leren en doceren van het vak natuurkunde (Gobert & Buckley, 2000; Justi & Gilbert, 2002). Het belang van dynamisch modelleren in het onderwijs is al in de vroege jaren tachtig onderzocht en erkend (Ogborn & Wong, 1984) en verder gespecificeerd door Löhner (2005). In het laatstgenoemde onderzoek zijn vier redenen gegeven waarom dynamisch modelleren een plaats verdient in het curriculum van de wetenschappelijke vakken. Ten eerste zullen leerlingen die een bètastudie gaan volgen in het werkveld veelvuldig in aanmerking gaan komen met dynamische modellen. Ze moeten leren dat een model mogelijkheden biedt om de werkelijkheid te benaderen maar dat elk model ook zijn beperkingen kent. Ook moeten ze leren hoe modelleertaal geschreven wordt en hoe een dynamisch model wordt opgebouwd. Ten tweede treedt er een verbetering op van de wetenschappelijke redeneervaardigheden van de leerlingen. Modelleren stimuleert een hoger orde denken zoals verwachtingen en hypotheses ontwikkelen, analytisch redeneren en verklaren. Ten derde kunnen studenten complexere en meer realistische problemen met behulp van modelleren oplossen. Ze zijn niet meer afhankelijk van hun wiskunde vaardigheden. Dit zorgt ervoor dat ze problemen op kunnen lossen die voorheen te ingewikkeld leken. Ten slotte noemt Löhner de belangrijke rol van modellen in het dagelijks leven. Voorbeelden hiervan zijn weersvoorspellingen, economische groei en hoe beslissingen in de politiek afhangen van modellen. Studenten met kennis over modellen kunnen zich namelijk beter mengen in deze maatschappelijke discussies.

**Knelpunten voor leerlingen bij modelleren.**

Leerlingen vinden modelleren een ingewikkelde activiteit (Oh & Oh, 2011). Daarnaast zijn ze niet altijd in staat om modellen, experimenten en onderliggende concepten aan elkaar te koppelen (Doerr, 1996; Hodson, 1993). Sins, Savelsbergh en van Joolingen (2005) vergeleken verschillende onderzoeken en kwamen tot knelpunten voor leerlingen in de taakperceptie, de fysische inhoud en de gebruikte tool tijdens dynamisch modelleren. Op het niveau van taakperceptie hebben leerlingen de neiging een model te zien als een ontwerpopdracht in plaats van als een wetenschappelijk probleem. Deze benadering zorgt ervoor dat leerlingen er eerder voor kiezen om de parameters van het model aan te passen totdat het model voldoet aan het empirisch experiment. Deze manier van werken is vaak niet succesvol en zorgt daarnaast dat het leereffect uitblijft (Hogan & Thomas, 2001; Stratford, Krajcik, & Soloway, 1998).

Op het niveau van vakinhoud vinden leerlingen het ingewikkeld om de vakconcepten te herkennen in het model. Ze missen vaak de tijdsafhankelijkheid van de variabelen en ze hebben de neiging te om de invloeden van individuele variabelen afzonderlijk te beschouwen (Stratford et al., 1998). De invloed van terugkoppelingen in een model worden lang niet altijd doorzien door leerlingen. Bijvoorbeeld: de toenemende luchtwrijvingskracht tijdens een valbeweging leidt tot een afname van de versnelling, wat uiteindelijk zal leiden tot een constante valsnelheid. Leerlingen koppelen het effect van één variabele aan een andere en missen hierdoor het interactieve aspect van de variabelen in een model (Kurtz dos Santos & Ogborn, 1994).

Op het niveau van de gebruikte tools is het belangrijk een bewuste keuze te maken welke modelleersoftware wordt gebruikt.

Gelet op de eerder beschreven knelpunten voor leerlingen tijdens modelleeropdrachten is het belangrijk om als docent op een gefundeerde manier modelleeronderwijs vorm te geven. Gellert, Jablonka en Keitel (2001) en Galbraith en Stillman (2006) hebben onderzoek gedaan naar welke competenties cruciaal zijn bij het opstellen van dynamische modellen. Volgens deze onderzoekers bepalen de mate van wiskundige kennis en de handigheid van leerlingen met betrekking tot de gebruikte technologische tools hoe zij een probleem aanpakken. Daarom is het belangrijk dat er tijdens het doceren van dynamisch modelleren aandacht wordt besteed aan deze vaardigheden. Van Buuren (2014) kwam tot 4 bepalende factoren waar een docent rekening mee moet houden bij het ontwikkelen van modelleeropdrachten voor leerlingen.

1. De modelleersoftware.

Docent moet een bewuste keuze maken welke modelleersoftware wordt gebruikt.

1. Conceptuele begrip van leerlingen.

Leerlingen hebben kennis nodig van de natuurkundige concepten die van toepassing zijn op het te vormen model. Enerzijds om het probleem te vereenvoudigen tot een werkbaar model en anderzijds om zinvolle conclusies te kunnen trekken over het beschreven model.

1. Het begrijpen en analyseren van grafieken.

Leerlingen moeten in staat zijn om grafieken begrijpen voor het interpreteren en analyseren van de uitkomsten van het model.

1. Het modelleerproces.

Docent moet het volledige modelleerproces met leerlingen doorlopen. Zowel voor het inzien van beperkingen die modellen hebben als voor het begrip van de aard van modellen.

Deze 4 factoren worden hieronder gedetailleerd besproken.

**1. De modelleersoftware.**

De meeste middelbare scholen in Nederland werken met Coach 7. Een handige keuze omdat de dynamische modellen zoals deze gepresenteerd worden in het centraal examen natuurkunde tot stand worden gebracht met dit programma. Daarnaast is het een multifunctioneel programma waarbij eenvoudig zowel sensor – als videometingen kunnen worden gedaan (Heck, 2012). Coach 7 kent twee mogelijkheden om dynamische modellen op te stellen: grafisch en aan de hand van tekstregels. Bij grafisch modelleren worden grootheden ingevoerd als “blokken” en worden deze met elkaar verbonden om een relatie tussen de grootheden te beschrijven. Het voordeel van deze manier van modelleren is dat de relatie tussen de grootheden duidelijk te zien is. Leerlingen kunnen hierdoor eenvoudiger conceptueel redeneren (Niedderer, Schecker, & Bethge, 1991). Een nadeel kan zijn dat grafisch modelleren experimenteren uitlokt. Het is relatief eenvoudig om aanpassingen aan het model te maken waardoor er meer met het model gespeeld wordt in plaats van doelmatig gewerkt (Löhner, van Joolingen, Savelsbergh, & van Hout-Wolters, 2005). Een ander nadeel is dat leerlingen het lastig vinden om variabelen van elkaar te onderscheiden in een grafisch model. Zeker bij wat complexere modellen kunnen leerlingen het overzicht verliezen (Kurtz dos Santos, Thielo, & Kleer, 1997).

Bij tekstueel modelleren worden de verbanden tussen grootheden aangegeven met formules. Deze benadering is meer wiskundig en betreft voornamelijk de numerieke integratie van differentiaalvergelijkingen. Een voordeel van deze manier van modelleren is dat het inzichtelijker is welke rekenstappen een computer onderneemt bij het oplossen van het model (van Buuren, Heck, & Ellermeijer, 2016). Een ander voordeel is dat de relatie tussen de variabelen duidelijk wordt weergegeven. De iteratie die wordt doorlopen geeft het model structuur (Engelen & van den Brand, 2010). Daarnaast is er onderzocht dat wanneer leerlingen in staat zijn een model te maken met behulp van natuurkundige vergelijkingen ze daarna bijna net zo gemakkelijk een grafisch model op kunnen stellen (Chabay & Sherwood, 2008). Een nadeel van tekstueel modelleren is dat leerlingen het lastig vinden om te beslissen welke variabelen zij in welke volgorde moet kiezen in het model en worstelen ze vaak met het specificeren van de wiskundige relaties tussen de variabelen (Sweeney & Sterman, 2000).

**2. Conceptuele begrip van leerlingen.**

Leerlingen vormen eigen standpunten op basis alledaags taalgebruik. Dat elektrische apparaten stroom verbruiken en dat iemands gewicht wordt uitgedrukt in kilogram zijn bekende voorbeelden van dit soort alternatieve concepten. Deze voorbeelden, ook wel misconcepten genoemd, zijn vaak best logisch voor leerlingen omdat ze al heel hun leven worden gebruikt. Misconcepten worden gedefinieerd als onwetenschappelijke denk- en redeneerwijzen van leerlingen bij bepaalde natuurkundige onderwerpen (Lark, 2006) en zijn volop aanwezig binnen natuurkunde (Duit, 2007). Het is de verantwoordelijkheid van de docent om leerlingen bewust te maken van deze misconcepten en hen te helpen een correct conceptueel begrip te ontwikkelen. In het onderzoek naar misconcepten van Clement (1982) kwam naar boven dat de gedachten van een leerling neigen naar het idee dat een kracht in dezelfde richting werkt als de beweging. De meest opvallende vraag die in dit onderzoek werd gesteld was dat alle werkende krachten moesten tekenen op een munt die omhoog wordt gegooid. Maar liefst 88% van alle leerlingen gaf aan dat er een aandrijvende kracht was als de munt omhoog bewoog. Het is voor een docent de uitdaging om deze misconcepten bij leerlingen te ondervangen. Wat het lastig maakt is dat leerlingen misconcepten kunnen behouden naast correcte wetenschappelijke opvattingen (Gillbert & Swift, 1985). Het feit dat het woord kracht zowel een alledaags als een wetenschappelijke betekenis heeft, maakt het voor leerlingen extra ingewikkeld om misconcepten naast zich neer te leggen (McDermott, 1984; Terry, Jones, & Hurford, 1985). Andere onderzoekers beweren zelfs dat deze misconcepten ontstaan op de basisschool (Preece, 1997). Om deze misconcepten beter in beeld te krijgen is Driver (1985) opzoek gegaan naar consistenties tussen het redeneren van leerlingen. In haar onderzoek komen de 5 voornaamste misconcepten binnen het domein kracht en beweging naar voren.

1. Krachten hebben te maken met levende wezens.
2. Voor een constante beweging is een constante kracht vereist.
3. De hoeveelheid beweging is evenredig met de hoeveelheid kracht.
4. Als een lichaam in rust is, heeft het geen kracht die erop werkt.
5. Als een lichaam beweegt, werkt er een kracht op in de bewegingsrichting.

Er is veel onderzoek gedaan naar de manier van lesgeven welke effectief is voor het verbeteren van conceptueel begrip. Thornton & Sokoloff (1998) lieten zien conceptueel begrip te kunnen verbeteren met behulp van interactieve demonstraties in de klas. Dykstra, Boyle en Monarch (1992) lieten leerlingen zogenoemde tegenstrijdige testen uitzoeken. Zij moesten een fenomeen vinden wat een logische verklaring had, maar als het werd getest toch heel anders bleek te zijn. Een voorbeeld hiervan is dat leerlingen twee gelijkvormige objecten met een verschillende massa lieten vallen. De voorspelling was dat het object met de hoogste massa als eerste de grond zou raken. Toch bleek na het uitvoeren dat het experiment dat de objecten nagenoeg gelijktijdig de grond raakten. In de daaropvolgende discussie kwamen de juiste natuurkundige concepten naar boven. Halloun & Hestenes (1987) kwamen met de modelmatige instructie. Door nadruk te leggen op de modellen die schuilen achter verschillende situaties zijn de leerlingen beter in staat misconcepten te scheiden van de correcte theorie.

Het conceptuele begrip van leerlingen kan op verschillende manieren worden getoetst. Een bekende methode hiervoor is de Force Concept Inventory (FCI) (Hestenes, Wells, & Swackhamer, 1992). Dit is een instrument bestaat uit vragen met als gemeenschappelijk thema kracht. Deze vragenlijst dekt het domein kracht en beweging niet volledig zoals omschreven in de syllabus natuurkunde vwo. Daarnaast bevat deze lijst vragen over concepten die niet binnen het huidige examenprogramma vallen en zal daarom voor dit onderzoek aangepast moeten worden. Een andere vragenlijst die veel wordt gebruikt is de Force and Motion conceptual evaluation (FMCE). Ramlo (2002) liet in haar onderzoek zien dat deze vragenlijst, net als de FCI, een gevalideerde vragenlijst is om de conceptuele kennis van leerlingen te meten. Thornton, Kuhl, Cummings, & Marx (2009) vergeleken de FCI en de FMCE en concludeerde dat de FMCE nadruk legt op kinematica bij bewegingen in 1 richting waar de FCI meer de nadruk legt op het concept kracht.

**3. Het begrijpen en analyseren van grafieken**

Een combinatie van bovenstaande vragenlijsten zou nog niet het hele domein kracht en beweging dekken zoals omschreven in de syllabus. Een belangrijk onderdeel waar vwo leerlingen tijdens hun examen op worden getoets is hoe ze de begrippen kracht en beweging toe kunnen passen in grafieken. Daarnaast is eerder aangegeven dat deze vaardigheden belangrijk zijn in het begrijpen en analyseren van de grafieken die modellen genereren. De Test of Understanding Graphs in Kinematics (TGU-K) is een vragenlijst die laat zien of leerlingen in staat zijn plaats-, snelheid-, en versnelling- tijd grafieken te analyseren (Beichner, 1994).

**4. Het modelleerproces.**

Er zijn onderzoeken uitgevoerd die een positief effect laten zien op het begrijpen van natuurkundige concepten met behulp van dynamisch modelleren (Hwang, 2008; Löhner, 2005). Het is daarom niet de vraag of maar vooral hoe dynamisch modelleren kan worden toegepast in het middelbare onderwijs. Hiervoor is het essentieel meer inzicht te krijgen in de vraag hoe leerlingen modelleervaardigheden verwerven en hoe ze bekende wiskundige en natuurkundige concepten kunnen koppelen in een dynamisch model (Lijnse, 2008).

De didactische vaardigheden die horen bij modelleren zijn nog niet goed genoeg bekend bij docenten (Koponen, 2007). In de Nederlandse natuurkunde methodes wordt vaak gestart met modelleren in klas 4 (Mulder, Slooten, Uylings, & Wieberdink, 2008). Deze onderzoekers laten zien dat het mogelijk is om leerlingen in de leeftijd van 14 en 15 jaar succesvol te laten zijn in dynamisch modelleren. Het begrijpen van het systeem achter dynamisch modelleren kan echter moeilijk zijn voor leerlingen uit deze leeftijdscategorie (Booth Sweeney & Sterman, 2000). Leerlingen hebben namelijk een aanzienlijke hoeveelheid tijd nodig om zich deze nieuwe manier van denken eigen te maken. Mede daarom is het belangrijk dat leerlingen juist al vroegtijdig tijdens de schoolcarrière in aanraking komen met modelleren (van Buuren, Uylings, & Ellermeijer, 2009) en moet er een heldere structuur en systematiek zitten in de wijze waarop modelleren wordt uitgevoerd in de lessen (Westra, 2008). Diverse onderzoekers komen met een systematisch cyclisch proces dat gehanteerd kan worden tijdens modelleeropdrachten. Halloun (2004) beschrijft een modelleercyclus bestaande uit vijf opeenvolgende fases: De probleemverkenning, het bijeenbrengen van concepten, het formuleren van het model, het uitvoeren van het model en het analyseren van de uitkomsten van het model. Een cyclus als deze geeft leerlingen de mogelijkheid om na te denken over het gevormde model en te reflecteren op het proces. Ook Lijnse (2008) beschrijft het modelleerproces in vijf opeenvolgende fases. De realistische context situatie wordt vertaald naar een hanteerbaar probleem. Hierin worden alle inperkingen meegenomen. Vervolgens wordt het model opgesteld en worden er modeluitkomsten gegenereerd. De uitkomsten worden daarna geïnterpreteerd en getoetst om zo een terugkoppeling tot stand te brengen naar de realistische contextsituatie. Vergelijkbare modelleerheuristiek kunnen worden gevonden in onderzoeken van Maaß (2006), Savelsbergh (2008) en Powell & Willemain (2007).

In deze lessenreeks wordt gewerkt met de modelleercyclus van Halloun. Het is belangrijk om genoeg aandacht te besteden aan de eerste twee fases van deze cyclus. Leerlingen hebben namelijk de neiging om te snel te gaan experimenteren in plaats van stap voor stap bedenken wat er precies gebeurt. Voor de eerste twee fases, het verkennen van het probleem en het bijeenbrengen van concepten, hebben Teixeira, Dekkers, & van den Berg (2015) een inspirerende lesmethode gebruikt. Zij liet leerlingen met behulp van Post-its relaties leggen tussen grootheden van een bestaande context. Hierdoor werden leerlingen gedwongen na te denken over de natuurkundige wetten voordat ze het daadwerkelijke model gingen maken. Hestenes en Wells (1995) hadden een andere methode om deze fases met hun leerlingen te doorlopen. Wells liet zijn leerlingen modellen uitwerken op mini whiteboards. Op deze whiteboards schreven leerlingen hun visie op het model in de vorm van tekeningen, tekst, grafieken en grootheden met formules. Door middel van klassikale presentaties werd uiteindelijk een model gevonden waar iedereen het mee eens was. Deze twee didactische strategieën leggen nadruk op de natuurkundige relaties horend bij het model en hebben een positieve invloed op de conceptuele kennis van leerlingen (Wells, Hestenes, & Swackhamer, 1995). Daarnaast laat Ormel (2010) zien dat concepten beter blijven hangen als leerlingen vrijheid krijgen tijdens het formuleren van het dynamische model. Docenten kunnen deze vrijheid bijvoorbeeld vertalen naar open ontwerpopdrachten aan het einde van een lessenreeks modelleren.

**Aanbevelingen na uitvoeren van de lessenreeks**

Koponen (2007) geeft aan dat didactische vaardigheden die horen bij modelleren nog niet goed genoeg bekend zijn bij docenten en mede daardoor kan deze lessenreeks een uitkomst bieden voor natuurkunde docenten om lessen te verzorgen volgens inzichten uit wetenschappelijke literatuur.

De bekende natuurkundemethodes die op bijna alle middelbare scholen worden gebruikt, bespreken aan het einde van sommige hoofdstukken een aantal modelleeropdrachten. Dit gebeurt meestal binnen het domein kracht en beweging en de opdrachten zijn zo vormgegeven dat er direct met de het daadwerkelijke model wordt gewerkt. Westra (2008) erkende de essentie van structuur en systematiek binnen modelleeronderwijs en dat is precies wat er regelmatig bij deze opdrachten ontbreekt. Werken met modelleerfases, bijvoorbeeld die van Halloun (2004), kan het modelleeronderwijs voorzien van deze gewenste structuur. Halloun beschreef in zijn boek immers dat leerlingen die aandacht besteden aan alle fases van het modelleerproces beter in staat zijn modellen te begrijpen.

Er zijn een aantal aanpassingen aan te bevelen aan de lessenreeks. De leerlingen hebben de modelleeropdrachten in tweetallen op één laptop uitgevoerd. Hierbij bleek dat meestal dezelfde leerling alle handelingen uitvoerde en dat de andere leerling ernaast zat en meedacht. Het is nog steeds aan te bevelen om in tweetallen te werken maar voorzie de leerlingen dan wel van een eigen device. Hierdoor leren alle leerlingen beter werken met het programma Coach.

Tijdens de lessen bleek dat leerlingen het lastig vinden om bij het zien van een model in woorden uit te kunnen leggen wat het model voorstelt. Dit zou kunnen worden verholpen door opdrachten toe te voegen waarbij leerlingen modellen te zien krijgen waar ze zelf moeten achterhalen wat het model voorstelt. Het is wel belangrijk dat deze opdracht pas worden gedaan na de les waarin leerlingen een beeld hebben gekregen van een natuurkundig dynamisch model. Een bijkomend voordeel is dat leerlingen dan al een aantal dynamische modellen hebben gezien voordat ze zelf aan de slag gaan met modelleren.

Leerlingen stelden tijdens de open opdrachten veel technische vragen over Coach. Daarnaast kregen ze ook veel foutmeldingen door verkeerde invoer. De natuurkundige formules waren meestal correct maar door niet de juiste programmeertaal te gebruiken werkte het model niet. Leerlingen helpen met het oplossen van deze fouten heeft veel kostbare tijd gekost. Dit kan worden voorkomen door een aantal instructievideo’s of instructiebladen te maken waarin leerlingen kunnen zien hoe programmeerfouten opgelost kunnen worden. Zij kunnen deze dan raadplegen en het zelf oplossen in plaats dat ze hulp van de docent nodig hebben. Het grote voordeel hiervan is dat de docent meer tijd over houdt om waardevolle inhoudelijke discussies te voeren met leerlingen. Daarnaast zijn er tijdens het uitvoeren van de lessenreeks ook een aantal praktische aanbevelingen naar voren gekomen. Zorg ervoor dat alle leerlingen aan het begin van de les direct toegang hebben tot opgeslagen modellen en zorg dat ze werken met dezelfde versie van Coach. Bepaalde bewerkingen gaan anders en visueel zijn er ook verschillen welke voor onnodige onduidelijkheden kunnen zorgen.

De lessenreeks kende, naast de aanbevelingen, ook drie succesfactoren die nuttig kunnen zijn voor de modelleeractiviteiten. Ten eerste hebben leerlingen in de interviews duidelijk aangegeven dat modelleren een nuttige activiteit kan zijn om formules beter te begrijpen. Ook gaven ze aan modelleren juist moeilijk te vinden als er wordt gewerkt met onbekende formules. Daarom is het aan te bevelen modelleeractiviteiten te kiezen met voor leerlingen reeds bekende formules. De mechanica die vaak in vwo 4 wordt behandeld, leent zich hiervoor omdat de theorie grotendeels is gebaseerd op concepten en formules uit de derde klas. Ten tweede hebben leerlingen verteld dat ze het prettig vinden om eerst op weg geholpen te worden in de modelleersoftware. Dit kan zowel klassikaal worden behandeld als door middel van opdrachten die ze zelfstandig door het programma heen leiden. Ervaring binnen dit onderzoek heeft geleerd dat een klassikale demonstratie effectief en tijdbesparend kan werken.

Ten derde laat Ormel (2010) in zijn onderzoek zien dat concepten beter blijven hangen als leerlingen vrijheid krijgen tijdens het formuleren van dynamische modellen. Daarom kent de lessenreeks van dit onderzoek een afsluitende open opdracht waarin leerlingen zelf een model schrijven aan de hand van een casus. Deze open opdrachten bevorderen het zelf denken van de leerlingen en doen een beroep op hun creativiteit. Leerlingen worden hierdoor gedwongen zelf op zoek te gaan naar verbanden tussen de concepten en formules wat hen kan helpen bij een beter conceptueel begrip.

# Referenties

Beichner, R. (1994). Testing Student Interpretation of Kinematics Graphs. *American journal of Physics*(62), 750-762.

Boers, S., van Buuren, O., Haalboom, B., Heck, A., van Joolingen, W., van der Maas, H., . . . van Weert, C. (2018). Modelleren als onderdeel van het examenprogramma. Retrieved from www.slo.nl: https://slo.nl/thema/vakspecifieke-thema/natuur-techniek/modelleren/modelleren-onderdeel/

Booth Sweeney, L., Sterman, J. (2000). Bathtub Dynamics: Initial Results of a Systems Thinking Inventory. *System Dynamics Review*(16), 249-294.

Chabay, R., Sherwood, B. (1999). Bringing atoms into first-year phys- ics. *American Journal of Physics*(67), 1045-1050.

Chabay, R., Sherwood, B. (2008). Computational physics in the introductory calculus-based course. *American Journal of Physics*(76), 307-313.

Clement, J. (1982). Students’ preconceptions in introductory mechanics. *American Journal of Physics*, 66-71.

College voor Toetsen en Examens. (2017). www.examenblad.nl*.* Retrieved from https://www.examenblad.nl/examenstof/syllabus-2019-natuurkunde-vwo/2019/f=/natuurkunde\_2\_versie\_vwo\_2019.pdf

de Jong, T., van Joolingen, W. (1998). Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. *Review of educational research*, 179-201.

de Jong, T., van Joolingen, W. (2008). Model-Facilitated Learning. In J. Spector, M. Merrill, J. van Merriënboer, & M. Driscoll, *Handbook of research on educational communications and technology* (pp. 458-466). London: Lawrence Erlbaum Associates.

Doerr, H. (1996). Stella ten years later: A review of the literature. *International Journal of Computers for Mathematical Learning*(1), 116-130.

Driver, P. (1985). Children's Ideas in Science. Buckingham: Open University Press.

Duit, R. (2007). Students' and teachers' conceptions and science education. Retrieved from http://www.ipn.uni- kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html

Dykstra, D., Boyle, D., Monarch, I. (1992). Studying Conceptual Change in Learning Physics. *Science Education*(76), 615-652.

Engelen, L., van den Brand, M. (2010). Integrating Textual and Graphical Modelling Languages. Eindhoven University of Technology, Mathematics and Computer Science, Eindhoven.

Galbraith, P., Stillman, G. (2006). A framework for identifying student blockages during transitions in the modelling process. *Zentralblatt Für Didaktik Der Mathematik, 2*(38), 143-162.

Gellert, U., Jablonka, E., Keitel, C. (2001). Mathematical literacy and common sense. *Sociocultural research on mathematics education*, 55-77.

Gilbert, J., Boulter, C., Rutherford, M. (1998). Models in explanations, Part 1: Horses for courses? *International Journal of Science Education, 20*(1), 83-97.

Gilbert, S., Ireton, S. (2003). Understanding Models in Earth and Space Science. Arlington: NSTA Press.

Gobert, J., Buckley, B. (2000). Introduction to Model-based Teaching and Learning inScience Education. *International Journal of Science Education*(22), 891-894.

Grosslight, L., Unger, C., Jay, E., Smith, C. (1991). Understanding models and their use in science: Conceptions of middle and high school students and experts. *Journal of research in Science Teaching*, 799-822.

Halloun, I. (2004). Modeling Theory in Science Education. Dordrecht: Springer Netherlands.

Halloun, I., Hestenes, D. (1987). Modeling instruction in mechanics. *American Journal of Physics*, 455-462.

Harrison, A., Treagust, D. (1996). Secondary students' mental models of atoms and molecules: Implications for teaching chemistry. *Science Education, 80*(5), 509-534.

Heck, A. (2012). Perspectives on an integrated computer learning environment. University of Amsterdam. Amsterdam: Can Uitgeverij.

Hestenes, D. (1987). Toward a modeling theory of physics instruction. *American Journal of Physics*(55(5)), 440-454.

Hestenes, D., Wells, M., Swackhamer, G. (1992). Force Concept Inventory. *The Physics Teacher*(30), 141-158.

Hodson, D. (1993). Re-thinking old ways: towards a more critical approach to practical work in school science. *Studies in Science Education*(22), 85-142.

Hogan, K., Thomas, D. (2001). ognitive comparisons of students’ systems modelling in ecol- ogy. *Journal of Science Education and Technology, 4*(3), 319–345.

Hwang, F. (2008). An Instruction Model for Modeling with simulations: How to help student build their own model with simulations*.* Taiwan: National Taiwan Normal University.

Justi, R., Gilbert, J. (2002). Modelling, Teachers’ Views on the Nature of Modelling, andImplications for the Education of Modellers. *International Journal of Science Education*(24).

Koponen, I. (2007). Models and Modelling in Physics Education:A Critical Re-analysis of PhilosophicalUnderpinnings and Suggestions for Revisions. *Science & Education*(16), 751-772.

Kurtz dos Santos, A., Ogborn, J. (1994). Sixth form students’ ability to engage in computa- tional modelling. *Journal of Computer Assisted Learning*(10), 182 - 200.

Kurtz dos Santos, A., Thielo, M., Kleer, A. (1997). Students modelling environmental issues. *Journal of computer assisted learning*, 35-47.

Löhner, S. (2005). *Computer Based Modeling Tasks: The Role Of External Representation.* Amsterdam: University of Amsterdam.

Löhner, S., van Joolingen, W., Savelsbergh, E., van Hout-Wolters, B. (2005). Students’ reasoning during modeling in an inquiry learning environment. *Computers in Human Behavior*, 441-461.

Lark, A. (2006). Student misconceptions in newtonian mechanics. Bowling Green: Graduate College of Bowling Green State University.

Lijnse, P. (2008). Models of / for Teaching Modeling. Centre for Science and Mathematics Education. Utrecht: Utrecht University.

Maaß, K. (2006). What are modelling competencies. Freiburg: University of Education Freiburg.

McDermott, L. (1984). Research on conceptual understanding in mechanics. *Physics Today*, 24-32.

Mulder, C., Slooten, O., Uylings, P., Wieberdink, T. (2008). *Starten met grafisch modelleren in klas 3.* Utrecht: Werkgroep Natuurkunde Didactiek.

Niedderer, H., Schecker, H., Bethge, T. (1991). The role of computer‐aided modelling in learning physics. *Journal of Computer assisted learning*, 84-95.

Ogborn, J., Wong, D. (1984). A microcomputer dynamical modelling system. *Physics Education*(19), 138-142.

Oh, P., Oh, S. (2011). What Teachers of Science Need to Know about Models: An overview. *International Journal of Science Education, 33*(8), 1109-1130.

Ormel, B. (2010). Het natuurwetenschappelijk modelleren van dynamische systemen Naar een didactiek voor het voortgezet onderwijs. Utrecht, Nederland.

Powell, S., Willemain, T. (2007). How novices formulate models. Part I: qualitative insights and implications for teaching. *Journal of the Operational Research Society*(58), 983-995.

Preece, P. (1997). Forces and Motion: Pre-Service and Practising Secondary Science Teacher’ Language and Understanding. *Science and Technology Education*(15).

Ramlo, S. (2002). The Force and Motion Conceptual Evaluation*.* Department of Engineering & Science Technology. Akron: University of Akron.

Savelsbergh, E. (2008). Modelleren en computermodellen in de beta-vakken; Advies aan de gezamenlijke beta-vernieuwingscommissies*.* Universiteit Utrecht. Utrecht: Freudenthal Instituut voor Didactiek van Wiskunde en Natuurweten- schappen.

Schwarz, C., Gwekwerere, Y. (2007). Using a guided inquiry and modeling instructional framework (EIMA) to support preservice K-8 science teaching. *91*, 158–186.

Sins, P., Savelsbergh, E., & van Joolingen, W. (2005). The Difficult Process of Scientific Modelling: An analysis of novices’ reasoning during computer-based modelling. *International Journal of Science Education, 27*(14), 1695-1721.

Stratford, S., Krajcik, J., Soloway, E. (1998). Secondary students’ dynamic modelling processes: Analysing, reasoning about, synthesizing, and testing models of stream ecosystems. *Journal of Science Education and Technology, 7*(3), 215–234.

Sweeney, L., Sterman, J. (2000). Bathtub dynamics: Initial results of a systems thinking inventory. *System Dynamics Review, 16*(4), 249–286.

Teixeira, T., Dekkers, P., van den Berg, E. (2015). Leren modelleren met Post-its en Coach. *NVOX*(1), 8-11.

Terry, C., Jones, G., Hurford, W. (1985). Children’s Conceptual Understanding of Forces and Equilibrium. *Physics Education*, 162-165.

Thornton, R., Sokoloff, D. (1998). Assessing student learning of Newton’s laws: The Force and Motion Conceptual Evaluation and the Evaluation of Active Learning Laboratory and Lecture Curricula. *American Journal of Physics*(66), 338-352.

Thornton, R., Kuhl, D., Cummings, K., Marx, J. (2009). Comparing the force and motion conceptual evaluation and the force concept inventory. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*(5).

Treagust, D., Chittleborough, G., Mamiala, T. (2002). Students' understanding of the role of scientificmodels in learning scienc. *International Journal of Science Education, 24*(4), 357-368.

van Buuren, O. (2014). Development of a modelling learning path*.* Amsterdam: University of Amsterdam.

van Buuren, O., Heck, A., Ellermeijer, T. (2016). Understanding of relation structures of graphical models by lower secondary students. *Research in Science Education*, 633-666.

van Buuren, O., Uylings, O., Ellermeijer, T. (2010). Towards a learning path on computer modelling. Amsterdam: University of Amsterdam.

van den Akker, J., Thijs, A. (2009). Leerplan in ontwikkeling*.* Enschede: Stichting leerplanontwikkeling.

van der Valk, T., van Driel, J., de Vos, W. (2007). Common characteristics of models in present-day scientific practice. *Research in Science Education, 37*, 469–488.

van Driel, J. (1997). Het onderwijzen van modellen binnen ANW. *TDβ*, 177-195.

Wells, M., Hestenes, D., Swackhamer, G. (1995). A modeling method for high school physics instruction. *American Journal of Physics*, 606-619.

Westra, R. (2008). Learning and teaching ecosystem behaviour in secondary education*.* University of Utrecht. Utrecht: CDβ Press.

Windschitl, M., Thompson, J. (2006). Transcending simple forms of school science investigation: The impact of preservice instruction on teachers’ understanding of model-based inquiry. *American Educational Research Journal, 43*(4), 941-967.