

Leren door modelleren: doelen, benaderingen en praktijken

02.1 EEN VERKENNEND OVERZICHT VAN HET HUIDIGE
STATE-OF-THE-ART ONDERZOEK NAAR MBL IN HET
NATUURWETENSCHAPPELIJK ONDERWIJS.



2025



Empowering Teachers for Science Learning
Through Modelling-Based Approaches

Erasmus+-project EMPOWER

Leraren versterken in het onderwijzen van
natuurwetenschappelijke vakken door middel van op
modelleren gebaseerd leren

Tom Bielik (RU), Felicitas Haupts (IPN), Wouter van Joolingen (UU), Moritz Krell (IPN), Kim Krijtenburg-Lewerissa (UU), Kim Lobner (IPN), Victor Lopez Simo (UAB), Loucas Louca (EUC), Marios Papaevripidou (UCY), Kyriaki Vakkou (UCY).

Inhoud

Inleiding.....	1
Methode.....	2
Resultaten	3
Kaders voor het modelleren van competenties	3
Ondersteuning van de pedagogische behoeften van leerlingen op het gebied van modelleren	6
Domeinen	10
Hulpmiddelen	17
Algemene conclusie en discussie	21
Referenties	22

Inleiding

Dit rapport heeft tot doel een overzicht te geven van de huidige stand van zaken in het onderzoek naar op modelleren gebaseerd leren (MbL), met betrekking tot de gebruikte benaderingen, onderwerpen, hulpmiddelen en de leeftijd van de leerlingen, evenals de verwachte leerresultaten. Modelleren als leeractiviteit bestaat al sinds de jaren 1980 (Gilbert & Justi, 2016), zoals blijkt uit het werk van onder meer Jon Ogborn (Ogborn & Wong, 1984). Sindsdien heeft het onderwerp zich aanzienlijk ontwikkeld, zowel wat betreft theoretische inzichten in de rol van modelleren als wat betreft de ontwikkeling van hulpmiddelen en praktijken (bijv. Constantinou et al., 2019; Louca & Zacharia, 2012). In dit rapport willen we de meest recente ontwikkelingen in het onderzoek naar Modelling-based Learning (MbL) samenvatten. We richten ons op verschillende aspecten: de verwachte en waargenomen leerdoelen voor MbL, de (pedagogische) benaderingen die worden gebruikt bij het opzetten van MbL, de gebruikte modeleerinstrumenten en de domeinen waarin MbL is toegepast. We hebben deze kwesties behandeld in de context van het natuurwetenschappelijk onderwijs voor de leeftijdsgroep van 5 tot 15 jaar, de doelgroep van het Empower-project.

Om de grenzen van het project af te bakenen, definiëren we eerst de belangrijkste concepten die bij MbL een rol spelen, te beginnen met het meest fundamentele: het concept van *het model*. We definiëren dit als:

Een model is een representatief hulpmiddel dat wordt gebruikt om een fenomeen te begrijpen, te voorspellen of te verklaren.

Deze definitie is een vrij algemene beschrijving van wat modellen inhouden in de context van wetenschappelijke activiteiten: objecten, virtueel of concreet, die wetenschappers construeren om de dingen die ze bestuderen weer te geven. Dit omvat schaalmodellen, afbeeldingen, schematische voorstellingen, computersimulaties en meer. Belangrijk is dat modellen een functie hebben bij het begrijpen, voorspellen en verklaren: via het model zijn we in staat uitspraken te doen over het weergegeven systeem.

Vanuit deze definitie kunnen we verdergaan naar de definitie van wetenschappelijke modelleren:

Wetenschappelijk modelleren is het iteratieve proces van het construeren, vergelijken, testen, herzien en gebruiken van modellen bij de studie van verschijnselen.

In deze definitie is het woord 'wetenschappelijk' toegevoegd om te benadrukken dat modelleren een activiteit is om de bestudeerde verschijnselen beter te begrijpen, dat wil zeggen dat modelleren een wetenschappelijke activiteit is. Ten slotte moeten we op op modelleren gebaseerd leren definiëren als:

op modelleren gebaseerd leren is een onderwijs- en leerbenadering waarbij leerlingen zich bezighouden met wetenschappelijk modelleren.

Uit deze drie definities samen leiden we af dat op modelleren gebaseerd leren een onderwijs- en leeractiviteit is waarbij leerlingen zich bezighouden met een proces van het construeren, vergelijken, testen, herzien en gebruiken van representaties om verschijnselen te begrijpen, te voorspellen of te verklaren. Het doel van MbL omvat doorgaans twee aspecten: leren over de onderzochte verschijnselen en het opbouwen *van modelleercompetentie*, die we kunnen definiëren als het vermogen om te modelleren en een dieper begrip van modellen, vaak meta-modelleerkennis genoemd. Hieronder zullen we werken aan een solide basis voor het concept van modelleercompetentie.

Daarom zal dit overzicht zich richten op de volgende onderzoeksvragen:

1. Welke kaders voor modelleercompetentie zijn relevant en hoe onderscheiden ze zich wat betreft de ontwikkeling tussen de leeftijden van 5 en 15 jaar?
2. Welke pedagogische interventies voor MbL worden in de literatuur voorgesteld voor leerlingen tussen 5 en 15 jaar, en wat is er bekend over de effectiviteit ervan?
3. Welke onderwerpen, contexten en fenomenen worden gebruikt in MbL-activiteiten?
4. Welke tools (speciale modelleertools, generieke tools en/of AI-tools) worden volgens de rapporten gebruikt als modelleertools?

Methode

Aangezien het bij dit onderzoek gaat om een verkennend overzicht dat zich richt op recente ontwikkelingen, hebben we gekozen voor een pragmatische aanpak. We zijn begonnen met het samenvatten van zeven recente overzichtsstudies (Chang et al., 2024; Jin & Jian, 2024; Langbeheim & Bielik, 2025; Lobner et al., ingediend; Louca & Zacharia, 2012; Margolin et al., 2022; Nicolaou & Constantinou, 2014a) die relevant zijn voor onze onderzoeksvragen. Deze samenvattingen vormden de basis voor deze studie. Vervolgens zochten we naar recente literatuur uit de periode 2020-2025. Het jaar 2020 werd gekozen omdat aangenomen wordt dat de periode daarvoor al gedekt is door de overzichtsstudies die we als basis gebruikten. Voor elk van de onderzoeksvragen hebben we eerst de stand van zaken samengevat zoals die uit de overzichtsuitikelen naar voren kwam, gevolgd door de resultaten die in de gevonden literatuur werden gerapporteerd. We gebruikten de volgende zoekterm:

```
TS=(model-ba*)  
AND (TS=(learning) OR TS=(education))  
AND (TS=(Science) OR TS=(Biology) OR TS=(Physics) OR  
TS=(Chemistry) OR TS=(Geo*))  
NOT (TS=(hoger onderwijs))  
NOT (TS=(machine learning) OR (TS=(deep learning) OR  
TS=(robot*)))
```

Deze zoekopdracht leverde 132 resultaten op in Web of Science. We hebben deze set verder beperkt met de selectiefunctie van Web of Science, zodat alleen artikelen over onderwijskundige onderwerpen werden meegenomen en modellen in de context van AI

werden uitgesloten. Tenslotte hebben we de samenvattingen doorgenomen om alleen artikelen te selecteren die betrekking hadden op het basisonderwijs, het lager voortgezet onderwijs en de lerarenopleiding. We hielden uiteindelijk 49 artikelen in het Engels over. De zoek- en selectieprocedure werd herhaald in Duitstalige databases, wat 2 artikelen in het Duits opleverde, en in Spaanstalige databases (Enseñanza de las Ciencias en Eureka), wat 16 artikelen opleverde. Elk artikel werd beoordeeld op zijn relevantie voor elk van de onderzoeksvragen. Niet alle artikelen zijn relevant voor alle onderzoeksvragen.

Resultaten

Kaders voor het modelleren van competentie

Uit de reviews die we als uitgangspunt hebben bestudeerd, hebben we afgeleid dat wetenschappelijke modellen (hierna 'modellen' genoemd) worden gedefinieerd als doelgerichte abstracte representaties van fenomenen die worden gebruikt als media om wetenschappelijke ideeën weer te geven en te communiceren, en als epistemische instrumenten die worden gebruikt om wetenschappelijke fenomenen te onderzoeken en te begrijpen (Gouvea & Passmore, 2017; Lobner et al., ingediend). Wetenschappelijk modelleren (hierna 'modelleren' genoemd) is het iteratieve proces van het construeren en gebruiken van wetenschappelijke modellen. op modelleren gebaseerd leren (MbL) verwijst naar de instructieve benaderingen die worden gebruikt voor het leren met en over wetenschappelijke modellen. Het is een meerfasig proces waarin leerlingen zich bezighouden met het construeren en gebruiken van modellen (Louca & Zacharia, 2012; Margolin et al., 2022). Dit proces omvat het werken met praktijken zoals het ontwikkelen, evalueren, herzien, vergelijken en gebruiken van modellen om verschijnselen te verklaren en te voorspellen (Schwarz et al., 2009). Gouvea en Passmore (2017) benadrukten het belang van een cognitieve agent bij het ontwikkelen en gebruiken van modellen, waarbij de verschuiving plaatsvindt van 'model van' naar 'model voor' heuristieken. Deze oproep komt tot uiting in de niveaus van de metamodelleerkennis (Upmeier Zu Belzen et al., 2019), waarbij niveau I verwijst naar modellen als een replicatie van verschijnselen in de werkelijkheid en niveau III verwijst naar modellen als epistemische instrumenten die worden gebruikt om verschijnselen te verklaren en te voorspellen.

Het natuurwetenschappelijk onderwijs heeft tot doel de modelleercompetentie van leerlingen te ondersteunen. De definities van modelleercompetentie zijn divers en er bestaan verschillende kaders voor modelleercompetentie in de literatuur over het wetenschapsonderwijs. In brede zin kan modelleercompetentie worden gezien als "een systeem van kennis, vaardigheden en bekwaamheden die nodig zijn om deel te nemen aan het proces van het ontwikkelen en gebruiken van modellen voor het redeneren in de wetenschap, inclusief de motivatie om deze capaciteiten toe te passen voor het oplossen van problemen in specifieke situaties" (Göhner et al., 2022, p. 4). De meeste definities en

kaders van modelleercompetentie richten zich op drie kerndimensies: metamodelleerkennis, modelleerpraktijken en modelleerproduct.

Metamodelleerkennis verwijst naar epistemische ideeën en inzichten over modellen en het modelleerproces, d.w.z. de declaratieve kennis over modellen en modelleren (Chan et al., 2025). Nicolaou en Constantinou (2014a) stellen dat dit metamodelleerkennis over de aard van modellen en kennis over het modelleerproces omvat. Upmeyer zu Belzen et al. (2019) beschrijven vijf aspecten van de metamodelleerkennis: de aard van modellen, meerdere modellen, het doel van modellen, het testen van modellen en het wijzigen van modellen. Zij nemen ook niet-cognitieve aspecten op, zoals motivatie en wilskracht. Chiu en Lin (2019) stellen dat modelleerkennis ontologische, epistemologische en methodologische aspecten omvat, naast metacognitieve kennis van modellen en modelleren. Modelleerpraktijken verwijzen naar de waarneembare modelleeractiviteiten waarmee studenten zich bezighouden. Nicolaou en Constantinou (2014a) stellen dat de modelleerpraktijken activiteiten omvatten zoals het creëren, gebruiken, vergelijken, herzien en valideren van modellen. Het modelleerproduct verwijst naar de kwaliteit en nauwkeurigheid van de resulterende modelleerartefacten (Chan et al., 2025; Chiu & Lin, 2019; Göhner et al., 2022). In hun overzicht, gericht op het vaststellen van een overkoepelende definitie van de modelleercompetentie, stellen Lobner en collega's (in beoordeling) een raamwerk voor de modelleercompetentie voor dat bestaat uit vier dimensies: (1) disposities, waaronder metakennis over modelleren, vakspecifieke kennis en niet-cognitieve disposities, (2) situatiespecifieke vaardigheden, (3) modelleerpraktijken, en (4) modelleerproduct. Hoewel verwacht wordt dat alle meta-modelleerdimensies positief gecorreleerd zijn (Chiu & Lin, 2019; Schwarz et al., 2009), vonden de weinige empirische studies die deze mogelijke correlatie onderzochten, slechts zwak bewijs voor deze bewering. Schwarz en White (2005) richtten zich op studenten en concludeerden dat een grotere kennis van metamodelleren kan bijdragen aan de betrokkenheid van studenten bij het modelleerproces, vooral wanneer dit wordt ondersteund door expliciete reflectieve discussies. Sins et al. (2009) vonden een positieve correlatie tussen de diepgaande modelleerverwerkingsvaardigheden van studenten en een hoog niveau van epistemisch begrip van modelleren. Göhner et al. (2022) richtten zich op biologie leraren in opleiding en vonden slechts een zwakke correlatie tussen de complexiteit van het modelleerproces bij leraren en de kwaliteit van hun modelproducten, zonder correlatie met enige andere modelleerdimensie. Engelschalt et al. (2024) vonden een matige correlatie tussen de kennis van leraren over het iteratieve karakter van het modelleerproces en metamodelleerkennis van modellen als instrumenten om verschijnselen te voorspellen. Daarom is er behoefte aan verder empirisch onderzoek naar de relaties tussen de dimensies van modelleercompetentie bij zowel docenten als studenten.

Er zijn verschillende aanvullende beperkingen die voortvloeien uit de huidige literatuur over MBL. Zoals gesuggereerd door Lobner et al. (ingediend), heeft de modelleercompetentie vakspecifieke bijzonderheden waarmee rekening moet worden gehouden en deze moeten ook domeinen buiten de natuurwetenschappen omvatten. Er moet ook worden opgemerkt

dat andere modelleerkaders zich richten op alternatieve termen zoals vaardigheden, bekwaamheden en praktijken, die overlappen met de meeste dimensies van de modelleercompetentie, maar mogelijk aanvullende aspecten omvatten. Bovendien zijn empirische studies over modelleercompetentie bij kleuters en basisschoolleerlingen ondervertegenwoordigd in de literatuur.

Van de 49 Engelstalige artikelen die over de afgelopen 5 jaar werden gevonden, werden er 23 als relevant beschouwd voor het onderwerp modelleerkaders. Uit deze artikelen kwamen verschillende thema's naar voren met betrekking tot de belangrijkste theoretische kaders en definities die werden gebruikt in onderzoeksstudies die in de afgelopen 5 jaar zijn gepubliceerd.

Het meest voorkomende kader in de geïdentificeerde literatuur, dat in 11 van de 23 artikelen werd gebruikt (bijv. Lacy et al., 2022; Peretz et al., 2023), is het kader voor modelleerpraktijken, afkomstig uit het Framework for K-12 Science Education (NGSS, 2012). Het raamwerk voor modelleerpraktijken beschouwt modelleren als een van de kernpraktijken op het gebied van wetenschap en techniek die leerlingen moeten ontwikkelen, waarbij wordt verwezen naar zowel de kennis als de vaardigheden om modellen te construeren en te gebruiken om fenomenen te begrijpen.

Een soortgelijk patroon komt naar voren in de Spaanstalige artikelen: van de 16 geanalyseerde artikelen baseren er 7 zich expliciet op modelleerpraktijken als hun belangrijkste theoretische of instructieve kader (bijv. Jiménez-Liso et al., 2021; Oliva et al., 2021), wat een aandeel laat zien dat vergelijkbaar is met dat van het Engelstalige corpus. Deze convergentie suggereert dat modelleerpraktijken ook een centraal referentiepunt zijn geworden in het Spaanstalige onderzoek naar het wetenschapsonderwijs, zowel voor het structureren van instructiesequenties als voor het analyseren van de betrokkenheid van leerlingen bij kernprocessen van modelleren.

Het op één na meest gebruikte kader was het modelgebaseerde onderzoeksraamwerk, dat in 7 van de 23 geïdentificeerde artikelen voorkwam (bijv. Campbell et al., 2025; Pedrera et al., 2025). Dit raamwerk, dat oorspronkelijk door Windschitl et al. (2008) werd voorgesteld, beschouwt het leren van natuurwetenschappen als een systeem van onderzoeksactiviteiten en discours dat leerlingen betreft bij diepgaand inhoudelijk leren. Dit gebeurt in een proces van cyclisch construeren, testen, herzien en gebruiken van modellen om op bewijs gebaseerde verklaringen voor verschijnselen in de echte wereld te ontwikkelen. Op basis van dit kader worden de ideeën van leerlingen weergegeven in de vorm van modellen die toetsbaar, herzienbaar, verklarend, speculatief en generatief zijn. In de Spaanstalige subgroep vinden we ook 3 van de 16 studies die expliciet gebruikmaken van op modelleren gebaseerd onderzoek, zoals Guimarães & Peticarrari (2025).

Modelleercompetentie kwam in vijf van de 23 artikelen aan bod. Slechts twee van deze artikelen (bijv. Garrido en Couso, 2024) verwezen echter naar het raamwerk voor modelleringscompetentie van Upmeyer & Belzen et al. (2019), dat aspecten omvat die verband houden met de metamodeleringskennis van studenten – dat wil zeggen hun kennis over de aard en het doel van wetenschappelijke modellen en modellering – naast hun

vaardigheden om zich bezig te houden met modelleringspraktijken en een passend modelproduct te produceren. De overige drie artikelen noemden modelleercompetentie op een bredere en niet-specifieke manier. In het Spaanstalige overzicht passen geen studies het competentiekader voor modellering expliciet toe. Hoewel sommige artikelen verwijzen naar modelleervaardigheden of het gebruik van modellen, is er geen enkele die zijn analyse structureert rond metamodelleerkennis, modelleerpraktijken of modelleerproducten in de zin zoals gedefinieerd door dit kader. Deze afwezigheid suggereert dat er in de Spaanstalige onderzoekscontext nog geen sterke traditie bestaat om “modelleercompetenties” te conceptualiseren als een afzonderlijk theoretisch construct, in tegenstelling tot het meer gevestigde gebruik in de internationale (voornamelijk Engelstalige en Duitstalige) literatuur. op modelleren gebaseerd leren kwam voor in 4 van de 23 Engelstalige artikelen (bijv. Erumit & Yuksel, 2023), waaronder ook sociaal-wetenschappelijk op modelleren gebaseerd leren (SIMBL, bijv. Durak & Topçu, 2025), en ook in vier van de 16 Spaanstalige artikelen (bijv. Domènech-Casal, 2020). Op modelleren gebaseerde verklaringen kwamen voor in drie van de 23 artikelen (bijv. Lindgren et al., 2021), en modelgebaseerd redeneren werd in twee artikelen genoemd (bijv. Lacy et al., 2022),

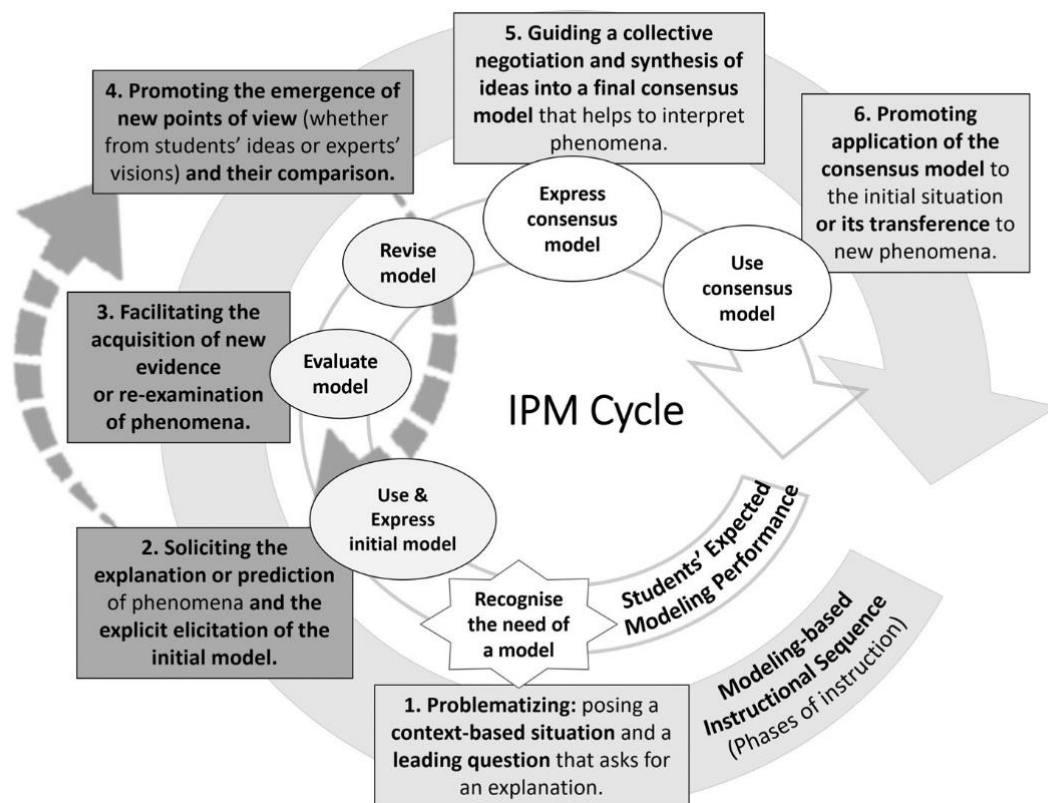
Andere kaders die slechts één keer in de geïdentificeerde literatuur aan bod kwamen, waren onder meer kaders over mentale modellen, de epistemologie van modellen, conceptuele modelleren, modelleervaardigheden, op modelleren gebaseerd onderwijs en modelleerprestaties.

In de geïdentificeerde literatuur werden modellen doorgaans gedefinieerd als representaties van fenomenen uit de echte wereld en natuurlijke systemen, en omvatten ze relevante componenten van het onderzochte fenomeen, hun kenmerken en hun interacties. In het grootste deel van de geïdentificeerde literatuur worden modellen gebruikt om de mechanismen en causale relaties in het systeem te beschrijven en te verklaren en om voorspellingen te doen. Mentale modellen worden gedefinieerd als modellen die in de geest van individuen worden geconstrueerd als resultaat van cognitieve processen. Modelleren wordt in de geïdentificeerde literatuur over het algemeen opgevat als het iteratieve proces van het ontwikkelen, evalueren, vergelijken, herzien en gebruiken van modellen om verschijnselen te verklaren en te voorspellen. In de onderwijscontext wordt modelleren gezien als een pedagogisch instrument dat essentieel is voor het proces van het ontwikkelen van wetenschappelijke kennis.

Ondersteuning van de pedagogische behoeften van leerlingen op het gebied van modelleren

In de overzichtsstudies die we als uitgangspunt hebben gebruikt, zijn pedagogische benaderingen van modelleren vaak gebaseerd op het betrekken van leerlingen bij daadwerkelijke modelleerprocessen, dat wil zeggen het construeren, verkennen en herzien van modellen. Veel auteurs hebben zich gebogen over de vraag hoe dergelijke modelleerpraktijken in het onderwijs kunnen worden geïntroduceerd. Windschitl en collega's (2008) relateren de modelleerpraktijk bijvoorbeeld aan wetenschappelijk

redeneren en daarmee samenhangende 'gesprekken', samengevat als 'Wat weten we al?', 'Hypothesen genereren', 'Bewijs zoeken' en 'Een argument opbouwen'. Bielik et al. (2022) definiëren verschillende aspecten die meer gericht zijn op het construeren van het model zelf: grenzen definiëren, componenten en grenzen bepalen, bewijs en redenering gebruiken en het gedrag van het model interpreteren. In hun zoektocht om leraren te ondersteunen baseren Campbell et al. (2025) hun instructieplanningsinstrument op een vergelijkbare schets van het modelleerproces. Een poging om deze en vele andere benaderingen te integreren is de “Instruction Performance Modelling (IPM)”-cyclus (Garrido & Couso, 2025). Een belangrijk kenmerk van deze cyclus is dat deze de modelleerprestaties van leerlingen en de bijbehorende instructiefasen van elkaar scheidt (zie Figuur 1).



Figuur1 De IPM-cyclus zoals weergegeven door Garrido en Couso (Garrido & Couso, 2025)

Als we naar de cyclus kijken, zien we inderdaad deze scheiding, hoewel de instructiefasen nog steeds in grote mate de modelleerfasen nabootsen. In de cyclus kunnen we drie hoofdfasen onderscheiden, die we Oriëntatie, modelleren en Toepassing zouden kunnen noemen, in de IPM-cyclus weergegeven als de fasen 1, 2-4 en 5-6. Toch beschrijven deze instructiefasen het modelleerproces op een abstract niveau, maar bieden ze geen inzicht in de instructieve of pedagogische interventie ter ondersteuning van deze fasen van het modelleerproces.

Een ander punt is dat het feit dat studenten een modelleerproces uitvoeren, niet automatisch betekent dat ze (meta-)modelleerkennis over dat proces of over de rol van modellen in de wetenschap zullen verwerven. Het gevolg is dat we naast ondersteuning

voor het modeleerproces ook meer abstract redeneren over modellen en modelleren moeten ondersteunen.

Dit betekent dat wanneer leerlingen zich bezighouden met het leren modelleren of het leren over modellen en modelleren, zij voor, tijdens en na het modeleerproces met veel verschillende vragen en kwesties worden geconfronteerd. In de volgende tabel wordt een inventarisatie van dergelijke vragen gepresenteerd.

Tabel1 Vragen met betrekking tot het modeleerproces, modeleercompetentie en metamodelercompetentie

<i>modeleerfase</i>	<i>Vragen over modellen en modelleren</i>	<i>Vragen over metamodeleren</i>
<i>Het probleem verkennen</i>	Wat is het probleem? Wat weten we al?	Is het geschikt voor modelleren Welke aannames moeten worden gedaan? Wanneer zijn we tevreden met het model? Wat is het doel van het model?
<i>Maak het model</i>	Wat zijn de relevante elementen, variabelen en parameters? Hoe verhouden deze zich tot elkaar?	Welke aspecten moeten worden gemodelleerd en welke niet? Hoe geeft dit model de werkelijkheid weer?
<i>Test het model</i>	Hoe vergelijken we het model met de werkelijkheid?	Wat is in dit geval een goed model? Welke criteria hanteren we voor ons model?
<i>Herzie het model</i>	Welke aanpassingen zijn nodig voor het model? Hoe worden de wijzigingen doorgevoerd?	Welke aspecten van het model moeten worden herzien en waarom?
<i>Gebruik het model</i>	Wat voorspelt het model over nieuwe situaties? Hoe stel je de variabelen/parameters in om bruikbare resultaten uit het model te halen?	Wat zijn de beperkingen van het model? Kan ik de voorspellingen vertrouwen, gezien de aannames van de modelleren?
<i>Reflectie op het model</i>	Dient het model ons doel?	Is er consensus over het model? Zijn er andere modellen mogelijk? Wat zouden de voor- en nadelen daarvan zijn? Is één model voldoende?
<i>Nadenken over het modeleerproces</i>	Hebben we de nodige stappen ondernomen om een bevredigend model te creëren en te evalueren?	Wat zijn de redenen om vertrouwen te hebben in een modeleerproces?

De bovenstaande 'vragen' bieden een kader om te beschrijven op welk deel van het modeleerproces pedagogische ondersteuning kan worden gericht. De daaruit voortvloeiende interventies kunnen vanuit de leeromgeving komen of door de leraar

worden geleid. Dergelijke benaderingen van scaffolding sluiten aan bij eerdere studies over scaffolding voor onderzoekend leren, bijvoorbeeld de scaffolding-kwalificaties van Quintana en Lazonder (Lazonder & Harmsen, 2016; Quintana et al., 2004). Hoogtepunten in de hier besproken literatuur zijn *bifocale modelleren* (Blikstein, 2014), wat inhoudt dat modellen direct aan experimenten worden gekoppeld, progressies met onder meer tekenen, kwalitatieve en kwantitatieve modelleren, het belang van hoogwaardige representatie en visualisatie, en het gebruik van fysieke interfaces om modellen te bouwen en te verkennen, zoals haptische feedback en fysieke objecten met RFID-tags om modellen te construeren. Ten slotte hebben we informatie verzameld, indien aanwezig, over de effectiviteit van de pedagogische interventie.

In de besproken artikelen sinds 2020 zagen we alleen ondersteuning voor het modeleerproces, het maken van modellen. We zagen geen expliciete instructieve interventies ter ondersteuning van het redeneren over metamodelleren, noch in de Engelstalige, noch in de Spaanstalige literatuur. Dit betekent niet dat de studies niet bijdragen aan de ontwikkeling van kennis over metamodelleren; men kan stellen dat deelname aan een modeleeractiviteit essentieel is voor de ontwikkeling van kennis over metamodelleren, maar er werden geen expliciete maatregelen gevonden.

De maatregelen die betrekking hebben op het maken van modellen richten zich op verschillende aspecten van het modeleerproces. *Het verkennen van het probleem* werd ondersteund door studenten tekeningen te laten maken (Lindgren et al., 2021; Liu, 2021; Samarapungavan et al., 2023) en andere door studenten gegenereerde visualisaties, zoals animaties (Lin & Wu, 2021). Voor *het maken van het model* geven Arik en Topçu (2022) expliciete uitleg over het modeleerformalisme.

Voor *het testen van het model* zijn door Bhattacharya et al. (2021) prompts in de vorm van ondersteunende vragen gebruikt om gegevens te interpreteren. Ook is het ondersteunen van voorspellingen en observaties met behulp van echte en gesimuleerde experimenten geïmplementeerd als ondersteunende strategie (Bozzo et al., 2022). Dit sluit aan bij het idee van *bifocale modelleren* zoals geïntroduceerd door Blikstein (2014). Het herzien van het model werd in twee studies expliciet ondersteund. Bielik en collega's gebruikten video's en experimenten als triggers om het model uit te breiden tot voorbij de huidige status (Bielik et al., 2022) en Lucas en collega's ontdekten dat studenten die hun modellen na een prompt herzien, hoger scoren op een post-test (Lucas et al., 2022). Over het geheel genomen vertoont het Spaanstalige corpus een duidelijke onevenwichtigheid: alle studies leggen de nadruk op het verkennen van het probleem en het creëren van het model, terwijl veel minder studies systematische fasen van het testen en herzien van modellen omvatten. Ten slotte boden verschillende studies geen ondersteuning voor specifieke fasen van het modeleerproces, maar wel voor het proces als geheel. Twee studies baseren zich op de IPM-cyclus (zie Figuur 1) en stelden vast dat het ondersteunen van leerlingen bij het volgen van deze cyclus hen helpt om hun interesse, concentratie en tevredenheid te vergroten (Jimenez-Liso et al., 2022; Pedrera et al., 2025). Een andere benadering is om het modeleerproces te baseren op verhaallijnen en storytelling. Lindgren en collega's lieten

leerlingen een verhaallijn opstellen op basis van een uitgangsvraag (waarom is een vijver groen in de zomer?) en van deze vraag uitgaan naar een op modelleren gebaseerde verklaring van het fenomeen (Lindgren et al., 2021).

Samenvattend zien we dat studies het modelleerproces als geheel trachten te ondersteunen of specifieke onderdelen aanpakken. Er is niet veel empirisch bewijs over de effecten van individuele ondersteuning, maar verschillende studies melden een over het algemeen positief resultaat van het modelleren. De belangrijkste punten die we uit de verschillende benaderingen kunnen halen, zijn:

- **Het gebruik van visuele en/of fysieke voorstellingen, zoals tekeningen, manipuleerbare objecten of door de gebruiker gemaakte animaties, is meerdere keren toegepast, vooral in de verkennende fasen van het modelleerproces.**
- **Bij computationele modelleren is het leren en gebruiken van het modelleerformalisme cruciaal. Op dit vlak is specifieke ondersteuning nodig. Een mogelijke ondersteuning kan worden gevonden in kwalitatieve modelleertechnieken die het mogelijk maken modellen te creëren zonder code of vergelijkingen te schrijven.**
- **Wat lijkt te ontbreken is expliciete ondersteuning voor metamodelleren, dat wil zeggen, het reflecteren op de aard van modellen en hun rol in de wetenschap en daarbuiten.**

Bij de interpretatie van dit alles moeten we opmerken dat dit overzicht betrekking heeft op pedagogische interventies die in de leeromgeving zijn ingebouwd. Dit betekent dat eventuele ad-hocinterventies door de docent niet in aanmerking zijn genomen. Oh en Oh (2011) hebben de internationale literatuur onderzocht om te beschrijven wat docenten natuurwetenschappen moeten weten over wetenschappelijke modellen (d.w.z. inhoudelijke kennis over wetenschappelijke modellen en modelleren).

Zij stelden voor dat leraren de betekenis van een wetenschappelijk model, de doelen en toepassingen van wetenschappelijke modelleren, de veelheid aan wetenschappelijke modellen en eventuele veranderingen daarin zouden moeten begrijpen. Wat betreft de pedagogiek voor het onderwijzen van wetenschappelijke modellen en modelleren, benadrukten zij dat natuurkundeleraren niet alleen een modelinhoudgerichte benadering moeten hanteren die zich richt op het overbrengen van de inhoud van de modellen, maar ook modeldenkgerichte en modelproductiegerichte benaderingen, die leerlingen betrekken bij het creëren en gebruiken van modellen om wetenschappelijke verschijnselen te verklaren. Ze stelden ook voor dat leraren vijf soorten modelleerpedagogieën zouden moeten ontwikkelen, namelijk verkennende, expressieve, experimentele (of onderzoekende), evaluatieve en cyclische modelleren, zoals later bevestigd in een overzicht van 81 empirische studies door Campbell et al. (2015).

Domeinen

De geselecteerde referentieartikelen beschrijven op modelleren gebaseerd leren in het natuurwetenschappelijk onderwijs. Natuurkunde en biologie komen in de literatuur het vaakst voor, terwijl scheikunde en aard- of milieuwetenschappen minder uitgebreid aan bod komen. In **de natuurkunde** zijn voorbeelden onder meer beweging en versnelling, kracht en

beweging, diffusie en temperatuurregeling in een huis. **Astronomie** komt aan bod in onderzoek naar het zonnestelsel en ruimtelijke astronomische concepten. In **de biologie** hebben studies zich gericht op plantengroei, celstructuren, mariene ecosystemen en beekecosystemen. Voorbeelden uit **de scheikunde** zijn moleculaire structuren en chromatografie, chemische reacties en chemisch evenwicht. Studies op het gebied van **aard- en milieuwetenschappen** hebben betrekking op platentektoniek, vulkanen, beekecosystemen, de opwarming van de aarde, de watercyclus door middel van filtratieactiviteiten en het ontwikkelen van modellen voor waterkwaliteit. Tabel 1 geeft een overzicht van de onderwerpen die in de geselecteerde overzichten worden beschreven, samen met de geschatte leeftijdsgroep waarvoor elke modelleeractiviteit bedoeld is. In deze tabellen worden secundaire verwijzingen naar de artikelen die zijn beoordeeld, vermeld.

Tabel 2 gebieden die aan bod komen op basis van de basisoverzichtsartikelen (inclusief secundaire referenties).

Vakgebied	Onderwerp	Leeftijdsgroep	Referentie
<i>Natuurkunde</i>	Beweging en versnelling	11–12; 16–17	(Louca et al., 2011; Sins et al., 2009)
	Kracht en beweging	12–13	(Schwarz & White, 2005)
	Diffusie	11–12	(Louca et al., 2011)
	Temperatuurregeling binnenshuis	16–17	(Löhner et al., 2003)
	Zonnestelsel en ruimtelijke astronomie	18–22	(Barab et al., 2000; Hansen et al., 2004)
<i>Biologie</i>	Plantengroei	14	(Ergazaki et al., 2007)
	Celstructuren	4–5	(Cruz-Guzmán et al., 2020)
	Mariene ecosystemen	10–11	(Papaevripidou et al., 2007)
	Beekecosystemen	14–15; 21–23	(Crawford & Cullin, 2005; Stratford et al., 1998)
<i>Chemie</i>	Moleculaire structuren & chromatografie	21–23	(Aalbergsjø & Sollid, 2021)
	Chemische reacties	17–18	(Dori & Kaberman, 2012)
	Chemisch evenwicht	14–15	(Maia & Justi, 2009)
<i>Aard- en milieuwetenschappen</i>	Platentektoniek	12–17	(Gobert, 2000)
	Vulkanen	12–13	(Pluta et al., 2011)
	Beekecosystemen	14–15	(Stratford et al., 1998)
	Opwarming van de aarde	16–17	(van Borkulo et al., 2012)
	modelleren van waterkwaliteit	22–25	(Zhang et al., 2006)

De besproken artikelen uit de periode 2020-2025 bestrijken biologie, natuurkunde, scheikunde, geowetenschappen en milieuwetenschappen. In de biologie richt modelleren zich op systemen zoals het spijsverteringsstelsel, ecosystemen en biodiversiteit. De natuurkundige onderdelen richten zich voornamelijk op verschijnselen die niet direct waarneembaar zijn, zoals energie, geluid en elektrostatica. Het chemieonderwijs richt zich op verklaringen op deeltjesniveau, zoals het gedrag van gassen, warmte en druk.

Aardwetenschappen en milieuwetenschappen betrekken leerlingen bij het begrijpen van klimaatverandering, waterkwaliteit en de invloed van de mens op de systemen op aarde.

Tabel 2 below geeft een overzicht van de domeinen die aan bod komen in de artikelen die uit de geselecteerde artikelen zijn gehaald. In vergelijking met Tabel 2 konden we meer informatie opnemen over de context waarin de domeinen werden behandeld, omdat we de originele artikelen waarnaar werd verwezen, hebben bekeken.

Tabel 3 Overzicht van disciplines, onderwerpen, leeftijdsgroepen en contexten die aan bod komen in de artikelen die in het overzicht zijn opgenomen.

Discipline	Onderwerp	Leeftijdsgroep	Context	Referentie
<i>Biologie</i>	Spijverteringsstelsel	Middelbare school	modelleren ondersteund door computationeel denken om complexe interacties tussen organen te begrijpen. Sluit aan bij de focus van het Turkse leerplan op voedingssystemen.	(Arik & Topçu, 2022)
	Ecosystemen en biodiversiteit	Groep 6-8	Op SSI gebaseerde lesmodule gericht op een lokaal ecologisch probleem ("witte vlinder"); gebruik van MbL binnen het Turkse natuurkundecurriculum.	(Durak & Topcu, 2023)
	Waterecologie, ecosystemen	Groep 5–6	Op de NGSS afgestemde verhaallijnmodule over algenbloei; langdurige ecologische onderzoeken uitgevoerd in de VS.	(Lindgren et al., 2021)
	Cardiovasculair (bloedsomloop) systeem	Leeftijd 5–6	Deze lesreeks is ontworpen volgens het Mexicaanse voorschoolse programma en behandelt aders, de hartfunctie, de bloedsomloop en thermoregulatie.	(De Alba Villaseñor & Ramos de Robles, 2020)
	Cellen, weefsels en micro-organismen	Leeftijd 10–13	Onderzoek in Chileense openbare scholen gericht op het visualiseren van celstructuren, microscopie en het weergeven van microscopische biologische verschijnselen	(Rodríguez Mora & Blanco López, 2020)
	Waterecologie en ecosystemen	Groep 7	Praktische implementatie in de klas van een lesreeks rond een lokaal milieuprobleem (massale sterfte van vissen en algen veroorzaakt door lozing van pekel)	(Jiménez-Liso et al., 2021)

<i>Discipline</i>	Onderwerp	Leeftijdsgroep	Context	Referentie
	Immuunsysteem (antigenen, geheugencellen, enz.)	Leeftijd 11–16	Geïmplementeerd in een gemeentelijke school in Praia Grande (Brazilië) tijdens de COVID-19-pandemie, waarbij concepten van het immuunsysteem en vaccinatie werden onderzocht	(Guimarães Siles & Peticarrari, 2025)
	Dynamiek van ecosystemen	Leerjaar 10	Deze studie maakt gebruik van een spreadsheetomgeving (Calc/Excel) om computationele modellen van ecosysteemdynamica te bouwen en iteratief te verfijnen	(Domènech-Casal, 2020)
<i>Natuurkunde</i>	Elektrostatica	Leeftijd 9-10	De rol van praktische experimenten en PhET-simulaties bij de ontwikkeling van een model en het relateren hiervan aan de echte fysische wereld. Een lesmodule natuurkunde voor de basisschool die aansluit bij het Italiaanse nationale leerplan voor natuurwetenschappen.	(Bozzo et al., 2022)
	Geluid	Groep 6	Vergelijking van op modelleren gebaseerd onderzoek (MBI) en door argumentatie ondersteund MBI, geïmplementeerd in Turkse openbare scholen.	(Geçgil & Akçay, 2024)
	Vormen, overdracht en transformatie van energie	Groep 4–5	Ontwikkeling en evaluatie van de op de NGSS afgestemde module 'Focus on Energy', met behulp van MBI. Getest in Amerikaanse basisscholen in de bovenbouw.	(Geçgil & Akçay, 2024)
	Deeltjesmodel van materie	Kleuterschool	Onderzoek naar hoe door technologie ondersteunde MBI de ontwikkeling van kinderenmodellen van materie in de VS beïnvloedt.	(Samarapungavan et al., 2023)

<i>Discipline</i>	Onderwerp	Leeftijdsgroep	Context	Referentie
	Meting en onzekerheid	Groep 5	Een lesmodule waarin de nadruk ligt op meetonzekerheid, interpretatie van resultaten en redeneren binnen een praktijkgerichte context, in het Chinese basisonderwijs.	(Tang et al., 2024)
	Drijfvermogen	Groep 1	Onderzoeksgerichte activiteiten waarbij gebruik wordt gemaakt van voorspellings-, observatie- en verklaringsroutines en gestuurde vragen om de oorzaken van het drijfvermogen te onderzoeken.	(García-Rodeja et al., 2023)
<i>Scheikunde</i>	Oplossen (gas in vloeistof)	Leeftijd 13–14	Een reeks van 14 activiteiten gekoppeld aan de kinetische moleculaire theorie; geïmplementeerd in het Spaanse secundaire natuurwetenschappelijk onderwijs.	(Cañero-Arias et al., 2024)
	Drijfvermogen, warmtecapaciteit, vloeistofdruk	Groep 8-9	Het effect van MBI ondersteund door Virtual-lab. De lesmodules zijn samen met docenten ontworpen en toegepast in het Taiwanese natuurkundecurriculum voor de onderbouw van de middelbare school.	(Chang et al., 2024)
	Zuren en basen	Leeftijd 13-14	MBI-lesreeks die gericht is op het bevorderen van de betrokkenheid van leerlingen. Geïmplementeerd in Spaanse scholen op het platteland waar op dit niveau zelden les wordt gegeven in de chemie van zuren en basen.	(Jimenez-Liso et al., 2022)
	Kinetische moleculaire theorie, diffusie, dichtheid, gaswetten	Groep 7-11	Vergelijking van MbL met sonificatiemodellen voor blinde leerlingen en visuele modellen voor ziende leerlingen; geïmplementeerd in Israël.	(Peleg et al., 2024)

<i>Discipline</i>	Onderwerp	Leeftijdsgroep	Context	Referentie
	Gisting	Leerjaar 10	met behulp van een praktijkgerichte context rond voeding en gezondheid om fermentatie en chemische reacties te onderzoeken in Spanje.	Muñoz-Campos et al., 2020
	Oplossingen en scheidingsmethoden	Groep 9 en 10	Lesmodule voor het voortgezet onderwijs in Spanje over drinkwaterconsumptie (kraanwater versus flessenwater), de chemische samenstelling van water, zuiverheid, scheidingsmethoden, gezondheidseffecten en milieukwesties die verband houden met het grootschalige gebruik van flessenwater.	(Rodríguez Mora & Blanco López, 2020)
<i>Geowetenschappen</i>	Wereldwijde klimaatverandering, temperatuur van de aarde	Groep 9	Vergelijking van op modelleren gebaseerde en niet op modelleren gebaseerde onderzoeken naar het klimaat van de aarde. Voor de modelleren werd gebruikgemaakt van EzGCM-klimaat simulaties. Focus op bewijs, systeemredenering en menselijke impact.	(Bhattacharya et al., 2021)
	Variatie in de massa van de aarde en chemische transformaties	Groep 8–9	Mentaal-experimentactiviteit uitgevoerd in tweetalige en Spaanse scholen waarbij scheikunde en biologie werden geïntegreerd binnen een aardwetenschappelijke context om de variatie in de massa van de aarde en chemische transformaties te onderzoeken	(Oliva et al., 2021)

<i>Discipline</i>	Onderwerp	Leeftijdsgroep	Context	Referentie
	Geologie, ruimtevaart, luchtvervuiling, menselijke gezondheid	Groep 1–6	Curriculaire analyse van het Spaanse basisonderwijssysteem, waarbij de marginalisering van aardwetenschappelijke inhoud wordt benadrukt door de plaatsing ervan binnen de sociale wetenschappen in plaats van de natuurwetenschappen	(Achurra et al., 2022)
	Externe geodynamica en geologisch erfgoed	Groep 9	Lesreeks over wetenschappelijke praktijken en sociaal-wetenschappelijke kwesties met betrekking tot het geologisch erfgoed van Spanje, met de nadruk op externe geodynamica en landschapsvorming	(Paz Otero & Puig, 2020)
<i>Milieukunde (interdisciplinair)</i>	Broeikaseffect, ecologische voetafdruk, energie, fossiele brandstoffen, ontbossing	Groep 8	Een module waarin SSI, wetenschappelijke modelleren en systeemdenken worden gecombineerd, gebaseerd op het SIMBL-raamwerk. Geïmplementeerd in Turkije.	(Durak & Topcu, 2023)
	Waterkwaliteit en -zuivering	Groep 8	Op SIMBL gebaseerd onderwijs gericht op empirisch onderbouwd redeneren in natuurkundelessen op de middelbare school in China.	(Jia & Ren, 2025)

Uit Tabel 2 en Tabel 3 blijkt dat op modelleren gebaseerd leren vooral wordt toegepast bij lesstof die betrekking heeft op dynamische en vaak onzichtbare verschijnselen, waarbij begrip afhankelijk is van het weergeven van interacties, mechanismen en veranderingen in de loop van de tijd. Sociaal-wetenschappelijke kwesties spelen een prominente rol, waarbij het leren plaatsvindt in realistische contexten die van studenten verlangen dat ze bewijsmateriaal evalueren, meerdere perspectieven in overweging nemen en redeneren over interacties tussen mens en milieu. Samen tonen deze studies aan dat op modelleren gebaseerd leren wordt toegepast op inhoud waarbij redeneren op systeemniveau, causaal inzicht en betrokkenheid bij maatschappelijke kwesties centraal staan in de onderzochte fenomenen.

Hulpmiddelen

Onderzoek naar modelgebaseerd leren laat een diversiteit aan hulpmiddelen en benaderingen zien die worden gebruikt om de modelleercompetentie van studenten te ontwikkelen. Een belangrijk onderscheid is dat tussen niet-computergebaseerde hulpmiddelen en computergebaseerde hulpmiddelen. Voor beide gevallen afzonderlijk hebben we een typologie opgesteld op basis van de basisbeoordelingen en hebben we het gebruik en de toepassing van hulpmiddelen onderzocht binnen de artikelen die uit onze zoekopdracht naar voren kwamen.

Niet-computergebaseerde modelleerhulpmiddelen

Chan *et al.* (2025) en Margolin *et al.* (2022) beschrijven verschillende niet-computergebaseerde modelleerhulpmiddelen die worden gebruikt in de opleiding van natuurkundeleraars. **Fysieke modellen** zoals maquettes, pasta en ventilatoropstellingen werden gebruikt om moleculaire structuren en chromatografieprocessen weer te geven (Aalbergsjø & Sollid, 2021; Cruz-Guzmán *et al.*, 2020). **Tekeningen, diagrammen en conceptkaarten** werden gebruikt om mentale modellen te visualiseren en te herzien (Cruz-Guzmán *et al.*, 2023; Nelson & Davis, 2012; Torres & Vasconcelos, 2016, 2021; Valanides & Angeli, 2008). **Manipulatieven** zoals M&M's en gummibeertjes dienden als analogen voor cellen en modeltypen, ter ondersteuning van kritische beschouwing en speelse verkenning (Everett *et al.*, 2009). **Praktische activiteiten, eenvoudige experimenten en black-box-opstellingen** met touwen en buizen werden gebruikt voor het evalueren van modellen (Aalbergsjø & Sollid, 2021; Crawford & Cullin, 2005; Jimenez-Liso *et al.*, 2022). Er werd melding gemaakt van **belichaamde activiteiten** en **rollenspel** (Enyedy *et al.*, 2012; Schwarz *et al.*, 2022), evenals het gebruik van **augmented reality** en **haptische feedback**. In de recente artikelen die we hebben bekeken, zien we ook het gebruik van tekeningen en praktische activiteiten, bijvoorbeeld in de vorm van energiekubussen.

In het Spaanstalige overzicht vinden we een vergelijkbare reeks niet-computergestuurde modelleerinstrumenten. Tekeningen en diagrammen worden vaak gebruikt om de verklaringen van leerlingen te visualiseren en te verfijnen (Jiménez-Liso *et al.*, 2021; Muñoz Campos *et al.*, 2020; Paz Otero & Puig, 2020). Ook praktische laboratoriumactiviteiten komen vaak voor, ter ondersteuning van het onderzoek naar drijfvermogen, cellulaire processen, chemische veranderingen of waterchemie (García-Rodeja *et al.*, 2023; Grimalt-Álvaro *et al.*, 2021; Muñoz Campos *et al.*, 2020; Rodríguez Mora & Blanco López, 2020). Veel studies vertrouwen echter ook alleen op 'pen-en-papierwerk' voor het schrijven en verfijnen van modellen en verklaringen (García-Rodeja *et al.*, 2023; Guimarães Siles & Peticarrari, 2025; Muñoz Campos *et al.*, 2020; Oliva *et al.*, 2021; Rodríguez Mora & Blanco López, 2020). Daarentegen vonden we in het Spaanse corpus geen voorbeelden van black-box-activiteiten, rollenspel of belichaamde modelleren, augmented reality of haptische feedbacktools.

Hulpmiddelen voor computermodelleren

Nicolaou en Constantinou (2014b) hebben voorbeelden uit de literatuur ingedeeld volgens de categorieën die Löhner heeft voorgesteld (Löhner et al., 2005). Löhner maakt onderscheid tussen **systemenmodeleerhulpmiddelen** – waaronder vergelijkingsgerichte en diagram-/structuurgerichte hulpmiddelen – en **op emergentie gebaseerde hulpmiddelen**, die zich richten op interacties tussen afzonderlijke eenheden.

- Vergelijkingsgerichte tools omvatten programmeeromgevingen die codering vereisen (LOGO, Boxer) en op vergelijkingen gebaseerde tools die geen programmering vereisen (DMS, Modellus, Dynamo).
- Diagram-/structuurgerichte tools kunnen kwantitatief (Stella, Powersim, Dynasim, Vensim, Functional Blocks) of semi-kwantitatief (IQON, VISQ, LinkIt, Modellt) zijn.
- Op emergentie gebaseerde tools omvatten objectgebaseerde tools (StarLogo, OOTL's) en cellulaire automaten (AgentSheets, Stagecast Creator).

Sommige tools uit de onderzochte studies passen niet helemaal in de taxonomie van Löhner. Colab-gebaseerde tools combineren diagrammatische (simulatie) en vergelijkingsgerichte (tekst) elementen, terwijl Microworlds LOGO zowel functioneert als een vergelijkingsgerichte programmeeromgeving en, in sommige gevallen, als een agentgebaseerd platform.

Langbeham en Bielik (2025) maken onderscheid tussen **op beperkingen gebaseerde modellen** en **op agenten gebaseerde modellen**. Op beperkingen gebaseerde modellen richten zich op het systeem als geheel, terwijl op agenten gebaseerde modellen zich richten op de weergave van componenten of entiteiten in een systeem. **Systeemdynamische modellen**, de belangrijkste vorm van op beperkingen gebaseerde modellen, gebruiken differentiaalvergelijkingen om te beschrijven hoe systeemvariabelen in de loop van de tijd veranderen en maken het mogelijk deze variabelen aan te passen om de effecten op het gehele systeem te zien.

Voorbeelden van computationele modeleerhulpmiddelen voor op beperkingen gebaseerde modellen zijn bijvoorbeeld Model-it, Stella en SageModeler. Op agenten gebaseerde modellen kunnen worden geconstrueerd in generieke programmeeromgevingen zoals Boxer (DiSessa et al., 1991), Scratch (Resnick et al., 2009) en Logo (Papert, 1980). Complexere modellen met veel agenten kunnen worden gemaakt in NetLogo (Wilensky & Reisman, 2006) en StarLogo (Han & Uhm, 2024; Pierson & Brady, 2020).

Naast tools die zijn ontworpen om algemene modelleren mogelijk te maken, bestaan er tools die zijn toegespitst op het modelleren van specifieke domeinen, zoals deeltjessystemen of modellen van celademhaling¹. Dergelijke tools zijn beperkt tot hun specifieke domein, maar kunnen geavanceerder zijn in die zin dat gangbaar gedrag voor een specifiek domein in de tool kan worden ingebouwd.

In de recente artikelen die voor dit overzicht zijn verzameld, zien we dat er in 13 gevallen gebruik wordt gemaakt van een computationele modeleerhulpmiddel, waarvan er acht

¹ <https://cellcollective.org/>

generieke modelerhulpmiddelen gebruiken en vijf gebruikmaken van domeinspecifieke hulpmiddelen. De volgende tabel geeft een overzicht van deze hulpmiddelen. Voor dit overzicht hebben we ons niet beperkt tot studies

Tabel4 Overzicht van modelleerinstrumenten die in de beoordeelde artikelen zijn aangetroffen

Type tool	Onderwijsniveau	Onderzoeksdomein	Onderwerp van de studie	Referentie
<i>Systeemdynamica</i>	Middelbare school	Aardwetenschappen	Wereldwijde klimaatverandering , temperatuur van de aarde	(Bhattacharya et al., 2021)
	Universiteit	Milieukunde, Biologie	Bevordering van systeemdenken en het innemen van perspectieven door middel van modelgebaseerd leren.	(Jordan et al., 2023)
	Universiteit	Scheikunde	Modelgebaseerd redeneren in de scheikunde	(Khan, 2025)
<i>Op vergelijkingen gebaseerde modellen</i>	Universiteit	Andere	Begeleide computationele modelleer- en simulatieprojecten in de bacheloropleiding techniek.	(Magana et al., 2024)
	Universiteit	Biologie	Dynamica van het cellulaire ademhalingssysteem	(Lucas et al., 2022)
<i>Agent-gebaseerde modellen</i>	Middelbare school	Natuurkunde	Kinetische moleculaire theorie en gaswetten	(Peleg et al., 2024)26/06/2026 06:35:00
	Universiteit	Overige	Evaluatie van softwareontwerp met behulp van UML-diagrammen	(Prasad & Iyer, 2022)
	Universiteit	Overig	De opleiding van natuurkundeleraren. Het bouwen van natuurkundige simulaties op basis van programmeren en het epistemologisch begrip van modellen.	(L. Vasconcelos & Kim, 2022)

<i>Type tool</i>	Onderwijsniveau	Onderzoeksdomein	Onderwerp van de studie	Referentie
<i>Domein-specifieke modelleertools</i>	Kleuteronderwijs	Natuurkunde	Toestanden van materie en faseveranderingen (deeltjeskarakter van materie)	(Samarapungavan et al., 2023)
	Hoger basisonderwijs	Natuurkunde	Elektrostatistische interacties	(Bozzo et al., 2022)
	Hoger secundair	Natuurkunde	Drijfkracht, warmtecapaciteit en druk in een vloeistof	(Chang et al., 2024)
	Hoger secundair	Scheikunde	Elektrochemie (elektrochemische cellen, elektrolyse, galvaniseren).	(Lin & Wu, 2021)
	Universiteit	Transdisciplinair	Systeendenken en conceptuele modelleren (OPM/OPCloud) in interdisciplinaire contexten	(Peretz et al., 2023)

Uit de tabel blijkt dat de generieke tools voornamelijk worden gebruikt in het hoger secundair onderwijs en hoger, terwijl de doelgroep van het basisonderwijs en het lager secundair onderwijs in de studies die deel uitmaken van dit overzicht meestal wordt aangesproken met domeinspecifieke tools. Dit zou erop kunnen wijzen dat de generieke tools vaardigheden vereisen die buiten het bereik van jongere kinderen liggen. De huidige literatuur toont enkele voorbeelden die een aanwijzing kunnen geven om generieke modelleer-tools toegankelijk te maken voor jongere kinderen. Een voorbeeld is het gebruik van op AI gebaseerde technieken om kwalitatieve conceptkaarten om te zetten in computationele modellen, zoals gebeurt in het MentalModeler-systeem (Jordan et al., 2023). Andere voorbeelden zijn de integratie van domeinspecifieke elementen en kwalitatieve en semi-kwantitatieve modelleertechnieken in systeemdynamische modelleerinstrumenten, zoals gebeurt in SageModeler (Damelin et al., 2017). In tegenstelling tot het bovenstaande is het gebruik van computergebaseerde modelleerinstrumenten in het Spaanstalige overzicht veel beperkter dan in het internationale corpus. Slechts één studie maakt gebruik van digitale modelleeromgevingen: een op spreadsheets gebaseerde simulatie voor ecosysteemdynamica (Domènech-Casal, 2020). modelleerinstrumenten voor algemeen gebruik (bijv. systeemdynamische of agentgebaseerde omgevingen) ontbreken grotendeels in de Spaanse dataset, wat suggereert dat computationele modelleren in deze literatuur nog steeds nauw verbonden is met concrete disciplinaire contexten in plaats van met generieke modelleerformalismen.

Algemene conclusie en discussie

Voor de eerste onderzoeksvraag zien we drie dominante kaders: het kader voor modelleerpraktijk (NGSS, 2012), het kader voor op modelleren gebaseerd onderzoek (Windschitl et al., 2008) en het kader voor modelleercompetentie (Upmeier Zu Belzen et al., 2019). Prominente thema's zijn de componenten van modelleercompetentie, zoals metamodelleerkennis, modelleerpraktijk, domeinspecifieke elementen van modelleercompetentie en aspecten van houding en motivatie. De literatuur biedt inzichten in deze aspecten als input voor een kader dat binnen het EMPOWER-project kan worden gebruikt.

Voor de tweede onderzoeksvraag zien we allereerst de noodzaak van een uitwerking van de modelleerprocessen (om explicieter te maken hoe we pedagogische ondersteuning kunnen vormgeven voor studenten die zich bezighouden met op modelleren gebaseerd leren). In de literatuur zijn verschillende versies van een modelleercyclus te vinden, met de IPM-cyclus als recente toevoeging. Hoewel cycli aantrekkelijke manieren zijn om processen weer te geven, moeten we ons ervan bewust zijn dat de processen in de praktijk minder geordend en minder gestructureerd kunnen zijn. Daarom is het wellicht beter om ons te richten op de afzonderlijke modelleerprocessen (stappen in de modelleercyclus) en het soort ondersteuning dat voor elk van deze stappen nodig is. In Tabel 1 hebben we deze benadering gepresenteerd in de vorm van een aantal vragen om ondersteuning te bieden voor elk van de fasen. Een belangrijk kenmerk van deze tabel is de aandacht voor zowel het modelleerproces als de metamodelleeraspecten. De besproken artikelen geven verschillende voorbeelden van manieren om verschillende aspecten van het modelleerproces te ondersteunen. De belangrijkste bevindingen zijn:

- Het gebruik van visuele en/of fysieke representaties, zoals tekeningen, manipuleerbare objecten of door de gebruiker gemaakte animaties, is meerdere malen toegepast, met name in de verkennende fasen van het modelleerproces.
- Bij computationele modelleren is het leren en gebruiken van het modelleerformalisme cruciaal. Op dit aspect is specifieke ondersteuning nodig. Een mogelijke ondersteuning kan worden gevonden in kwalitatieve modelleertechnieken die het mogelijk maken modellen te creëren zonder code of vergelijkingen te schrijven.
- Wat lijkt te ontbreken is expliciete ondersteuning voor metamodelleren, dat wil zeggen het reflecteren op de aard van modellen en hun rol in de wetenschap en daarbuiten.

Uit het volledige corpus van artikelen, inclusief de Spaanse en Duitse artikelen, blijkt dat er ondersteuning wordt geboden voor het creëren van modellen, met contextgebonden praktische taken (bijv. osmose, drijfvermogen, drinkwaterchemie), en dat slechts enkele studies expliciet ondersteuning bieden voor het testen en herzien van modellen. In alle studies ligt de nadruk op “Verkennen” en “Creëren”, maar er zijn aanzienlijk minder voorbeelden van het “Testen”, “Herzien” en “Gebruiken” van modellen.

Wat betreft de domeinen, het onderwerp van de derde onderzoeksvraag, zien we een verscheidenheid aan onderwerpen verspreid over de natuurwetenschappen. Een zichtbare trend is de toenemende aandacht voor sociaal-wetenschappelijke kwesties, zoals klimaatmodelleren, waardoor modelleren verschuift van iets dat 'intern' is aan de wetenschap naar een relevante competentie voor iedereen. Ook is zichtbaar dat modelleren wordt toegepast in alle leeftijdsgroepen, inclusief 5-15 jaar, de doelgroep van het huidige project. Spaanstalige studies zijn eveneens verankerd in authentieke sociaal-ecologische contexten (bijv. kustbeheer, consumptie van flessenwater, COVID-19-vaccinatie), die weliswaar modelbouw op gang brengen, maar modelleren vaak gebonden houden aan disciplinaire inhoud in plaats van aan overdraagbare modelleerformalismen.

Ten slotte zien we voor de vierde onderzoeksvraag dat MbL kan worden ondersteund door niet-computergebaseerde hulpmiddelen, zoals fysieke objecten, tekeningen en belichaamde activiteiten, evenals door computergebaseerde hulpmiddelen. In de laatste categorieën zien we een overvloed aan traditionele benaderingen, systeemdynamica, vergelijkingen en agentgebaseerde modellen, evenals domeinspecifieke modelleerhulpmiddelen.

Als we de conclusies samenvatten, zien we een groeiende tendens om modelleercompetentie te begrijpen in termen van het ontwikkelen van kaders, maar tegelijkertijd een gebrek aan didactische ondersteuning voor de hogere-ordevaardigheden van dergelijke modelleercompetenties. Voor de jongere leeftijdsgroep waarop het EMPOWER-project zich richt, is echter nog niet duidelijk hoe modelleercompetentie zich met de leeftijd ontwikkelt. Tegelijkertijd is, als we kijken naar de domeinen die vaak worden gebruikt in op modelleren gebaseerde onderwijsactiviteiten, metamodelleren belangrijk, omdat de domeinen meestal systemen omvatten die niet direct zichtbaar zijn, wat betekent dat het begrijpen van het model als een representatief systeem cruciaal is. Ten slotte zien we dat generieke modelleerinstrumenten meer worden geassocieerd met leeftijden boven de 15 jaar, wat ouder is dan onze doelgroep. Dit betekent dat het een open vraag is of en hoe dergelijke instrumenten inderdaad nuttig zijn voor de doelgroep van het project.

Referenties

- Aalberg, S. G., & Sollid, P. Ø. (2021). Learning through modelling in science: Reflections by pre-service teachers.
- Achurra, A., Berreteaga, A., & Zamalloa, T. (2022). La desnaturalización de las Ciencias de la Tierra en el currículo LOMCE de Educación Primaria: Un análisis curricular desde la perspectiva de la práctica científica. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 20(1), 1303. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2023.v20.i1.1303
- Arik, M., & Topçu, M. (2022). Computational Thinking Integration into Science Classrooms: Example of Digestive System. *Journal of science education and technology*, 31(1), 99–115. <https://doi.org/10.1007/s10956-021-09934-z>
- Barab, S. A., Hay, K. E., Barnett, M., & Keating, T. (2000). Virtual solar system project: Building understanding through model building. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(7), 719–756.
- Bhattacharya, D., Steward, K., & Forbes, C. (2021). Climate education in secondary science: Comparison of model-based and non-model-based investigations of Earth's climate.

- International journal of science education*, 43(13), 2226–2249.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2021.1958022>
- Bielik, T., Stephens, L., McIntyre, C., Damelin, D., & Krajcik, J. S. (2022). Supporting Student System Modelling Practice Through Curriculum and Technology Design. *Journal of Science Education and Technology*, 31(2), 217–231. <https://doi.org/10.1007/s10956-021-09943-y>
- Blikstein, P. (2014). Bifocal Modeling: Promoting Authentic Scientific Inquiry Through Exploring and Comparing Real and Ideal Systems Linked in Real-Time. *Gaming Media and Social Effects*, (Chapter 15), 317–352.
- Bozzo, G., Lopez, V., Couso, D., & Monti, F. (2022). Combining real and virtual activities about electrostatic interactions in primary school. *International journal of science education*, 44(18), 2704–2723. <https://doi.org/10.1080/09500693.2022.2149284>
- Campbell, T., Gray, R., Bai, Y., & Chase, S. (2025). The Iterative Design of a Model-Based Inquiry Unit Planning Tool for Preservice Science Teachers. *Journal of science teacher education*, 36(6), 732–757. <https://doi.org/10.1080/1046560X.2024.2449289>
- Campbell, T., Oh, P. S., Maughn, M., Kiriazis, N., & Zuwallack, R. (2015). A Review of Modeling Pedagogies: Pedagogical Functions, Discursive Acts, and Technology in Modeling Instruction. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 11(1), 159–176. <https://doi.org/10.12973/eurasia.2015.1314a>
- Cañero-Arias, J., Blanco-López, A., & Oliva, J. (2024). Model-based analysis of the impact of a teaching-learning sequence about carbonated drinks on students' understanding of the dissolution of gases in liquids. *International journal of science education*, 46(17), 1848–1878. <https://doi.org/10.1080/09500693.2023.2300772>
- Chan, K. K. H., Lau, D. S. P., & Van Driel, J. (2025). Different Designs, Different Outcomes? A Critical Systematic Review of Interventions for Preparing Preservice Science Teachers to Teach Scientific Models and Modeling. *Science Education*, 109(2), 386–428. <https://doi.org/10.1002/sce.21911>
- Chang, H., Liu, C., Wen, C., Chang, M., Chiang, S., & Hwang, F. (2024). The effect of the cyclic curricular design of modelling-based instruction with virtual labs. *International journal of science education*, 46(1), 46–72. <https://doi.org/10.1080/09500693.2023.2219365>
- Chiu, M.-H., & Lin, J.-W. (2019). Modeling competence in science education. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 1(1), 12–12. <https://doi.org/10.1186/s43031-019-0012-y>
- Constantinou, C. P., Nicolaou, C. Th., & Papaevripidou, M. (2019). A Framework for Modeling-Based Learning, Teaching, and Assessment. In A. Upmeyer zu Belzen, D. Krüger, & J. van Driel (Eds.), *Towards a Competence-Based View on Models and Modeling in Science Education* (pp. 39–58). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30255-9_3
- Crawford, B., & Cullin, M. (2005). Dynamic assessments of preservice teachers' knowledge of models and modelling. In *Research and the Quality of Science Education*. https://doi.org/10.1007/1-4020-3673-6_25
- Cruz-Guzmán, M., García-Carmona, A., & Criado, A. M. (2020). Analysis of the models proposed by prospective pre-primary teachers when studying water. *International Journal of Science Education*, 42(17), 2876–2897. <https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1841327>
- Cruz-Guzmán, M., García-Carmona, A., & Criado, A. M. (2023). “Teach Your Classmates About the Behavior of Water with School-Level Science Models”: An Experience in Initial Preschool Teacher Education. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 23(2), 262–281. <https://doi.org/10.1007/s42330-023-00283-0>
- Damelin, D., S. Krajcik, J., McIntyre, C., & Bielik, T. (2017). Integrating Technology: Students Making System Models. *Science Scope*, 40(5), 78–83. https://doi.org/10.2505/4/ss17_040_05_78
- De Alba Villaseñor, V., & Ramos de Robles, S. L. (2020). Modelización científica escolar para explorar el sistema circulatorio en Educación Infantil. *Enseñanza de Las Ciencias*, 38(1), 105–125.

- DiSessa, A. A., Abelson, H., & Ploger, D. (1991). An Overview of Boxer. *Journal of Mathematical Behavior*, 10, 3–15.
- Domènech-Casal, J. (2020). Diseñando un simulador de ecosistemas. Una experiencia STEM de enseñanza de dinámica de los ecosistemas, funciones matemáticas y programación. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 17(3), 3202. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i3.3202
- Dori, Y. J., & Kaberman, Z. (2012). Assessing high school chemistry students' modeling sub-skills in a computerized molecular modeling learning environment. *Instructional Science*, 40(1), 69–91.
- Durak, B., & Topcu, M. (2023). Integrating socioscientific issues and model-based learning to decide on a local issue: The white butterfly unit. *Science activities-projects and curriculum ideas in stem classrooms*, 60(2), 90–105. <https://doi.org/10.1080/00368121.2023.2179967>
- Durak, B., & Topçu, M. (2025). Exploring Teachers' Professional Development on Socioscientific Issues and Model-Based Learning: A Multiple Case Study. *Science & education*. <https://doi.org/10.1007/s11191-025-00628-1>
- Engelschalt, P., Bielik, T., Krell, M., Krüger, D., & zu Belzen, A. U. (2024). Investigating pre-service science teachers' metaknowledge about the modelling process and its relation to metaknowledge about models. *International Journal of Science Education*, 46(7), 691–714. <https://doi.org/10.1080/09500693.2023.2253368>
- Enyedy, N., Danish, J. A., Delacruz, G., & Kumar, M. (2012). Learning physics through play in an augmented reality environment. *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, 7(3), 347–378. <https://doi.org/10.1007/s11412-012-9150-3>
- Ergazaki, M., Zogza, V., & Komis, V. (2007). Analysing students' shared activity while modeling a biological process in a computer-supported educational environment. *Journal of Computer Assisted Learning*, 23(2), 158–168.
- Erumit, B., & Yuksel, T. (2023). Developing and Using Physical Dynamic Models On Socioscientific Issues to Present Nature Of Science Ideas. *International journal of science and mathematics education*, 21(4), 1031–1056. <https://doi.org/10.1007/s10763-022-10296-0>
- Everett, S. A., Otto, C. A., & Luera, G. R. (2009). Preservice elementary teachers' growth in knowledge of models in a science capstone course. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 7(6), 1201–1225. <https://doi.org/10.1007/s10763-009-9158-y>
- García-Rodeja, I., Rodríguez Rouco, E. V., Lorenzo Flores, M., & Sesto Varela, V. (2023). Construyendo modelos precursores sobre la flotabilidad de objetos macizos a los seis años. *Enseñanza de Las Ciencias*, 41(2), 137–154.
- Garrido, A., & Couso, D. (2025). The IPM cycle: An instructional tool for promoting students' engagement in modeling practices and construction of models. *Journal of Research in Science Teaching*, 62(2), 391–425. <https://doi.org/10.1002/tea.21979>
- Geçgil, T., & Akçay, H. (2024). Investigating the Effects of Different Model Based Inquiries on Students' Science Achievement, Scientific Process Skills and Motivation. *International journal of education in mathematics science and technology*, 12(3). <https://doi.org/10.46328/ijemst.3997>
- Gilbert, J. K., & Justi, R. (2016). The Contribution of Visualisation to Modelling-Based Teaching. In *Models and Modeling in Science Education Modelling-based Teaching in Science Education* (9th ed., pp. 121–148). Springer International Publishing Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29039-3_7
- Gobert, J. D. (2000). A typology of causal models for plate tectonics: Inferential power and barriers to understanding. *International Journal of Science Education*, 22, 937–977.
- Göhner, M. F., Bielik, T., & Krell, M. (2022). Investigating the dimensions of modeling competence among preservice science teachers: Meta-modeling knowledge, modeling practice, and modeling product. *Journal of Research in Science Teaching*, 59(8), 1354–1387. <https://doi.org/10.1002/tea.21759>

- Gouvea, J., & Passmore, C. (2017). 'Models of' versus 'Models for.' *Science & Education*, 26(1), 49–63. <https://doi.org/10.1007/s11191-017-9884-4>
- Grimalt-Álvaro, C., Ortega Torres, E., Couso Lagarón, D., & Paloma Romeu, L. (2021). Influencia en la autoeficacia del grado de autenticidad de la indagación de dos proyectos de ciencia de secundaria: Estudio de caso. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 18(2), 2101. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2021.v18.i2.2101
- Guimarães Siles, C., & Peticarrari, A. (2025). El uso de modelos en la enseñanza investigativa para promover la participación activa de los alumnos de la educación primaria. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 23(1), 1102. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2026.v23.i1.1102
- Han, M., & Uhm, J. (2024). Enhancing Students' Emotional, Epistemic, and Conceptual Aspects in Scientific Practice through Computational Modeling on a Food Web. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 22(S1), 145–165. <https://doi.org/10.1007/s10763-024-10509-8>
- Hansen, J. A., Barnett, M., MaKinster, J. G., & Keating, T. (2004). The impact of three-dimensional computational modeling on student understanding of astronomical concepts: A quantitative analysis. *International Journal of Science Education*, 26(11), 1365–1378. <https://doi.org/10.1080/09500690420001673757>
- Jia, S., & Ren, S. (2025). The Significance of Science Content Knowledge for Socioscientific Reasoning Competency: Evidence from SSI Instruction on Environmental Topics Based on the SIMBL Model. *Science & education*. <https://doi.org/10.1007/s11191-025-00645-0>
- Jimenez-Liso, M., Bellocchi, A., Martinez-Chico, M., & Lopez-Gay, R. (2022). A Model-Based Inquiry Sequence as a Heuristic to Evaluate Students' Emotional, Behavioural, and Cognitive Engagement. *Research in science education*, 52(4), 1313–1334. <https://doi.org/10.1007/s11165-021-10010-0>
- Jiménez-Liso, M. R., Delgado, L., Castillo-Hernández, F. J., & Baños-González, I. (2021). Contexto, indagación y modelización para movilizar explicaciones del alumnado de secundaria. *Enseñanza de Las Ciencias*, 39(1), 5–25.
- Jin, D., & Jian, M. (2024). Research hotspots and development trends of model and modelling education research: Bibliometric analysis based on CiteSpace. *Heliyon*, 10(11), e32590. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32590>
- Jordan, R., Gray, S., Boyse-Peacor, A., Sorensen, A., Frantz, C., Jauernig, J., Brehm, P., Shammin, M., & Petersen, J. (2023). Promoting systems thinking through perspective taking when using an online modeling tool. *Frontiers in education*, 8. <https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1215436>
- Khan, S. (2025). Reasoning in chemistry teacher education. *Chemistry teacher international*, 7(2), 345–357. <https://doi.org/10.1515/cti-2024-0099>
- Lacy, S., Tobin, R., Crissman, S., DeWater, L., Gray, K., Haddad, N., Hammerman, J., & Seeley, L. (2022). Telling the energy story: Design and results of a new curriculum for energy in upper elementary school. *SCIENCE EDUCATION*, 106(1), 27–56. <https://doi.org/10.1002/sce.21684>
- Langbeheim, E., & Bielik, T. (2025). Student engagement in constructing computer models in K-12 science education: A systematic review. *Studies in Science Education*, 1–28. <https://doi.org/10.1080/03057267.2025.2576997>
- Lin, C., & Wu, H. (2021). Effects of different ways of using visualizations on high school students' electrochemistry conceptual understanding and motivation towards chemistry learning. *Chemistry education research and practice*, 22(3), 786–801. <https://doi.org/10.1039/d0rp00308e>
- Lindgren, S., Morris, K., & Price, A. (2021). Designing environmental storylines to achieve the complementary aims of environmental and science education through science and engineering practices. *Journal of environmental education*, 52(4), 239–255. <https://doi.org/10.1080/00958964.2021.1949569>

- Liu, S. (2021). Using drawings to examine undergraduate students' mental models of the greenhouse effect: A factor analysis approach. *International journal of science education*, 43(18), 2996–3017. <https://doi.org/10.1080/09500693.2021.2004466>
- Lobner, K., Voitle, F., Ziernwald, L., Bielik, T., & Krell, M. (submitted). Definitions and Frameworks of Modeling Competence in Science Education Research – A Scoping Review.
- Löhner, S., van Hout-Wolters, B., van Joolingen, W., & Savelsbergh, E. R. (2005). Computer based modeling tasks: The role of external representation [Graphic]. In *Society and behavioral sciences* (Issue Chapter 13, pp. 243–263). University of Amsterdam. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-4366-3_13/fulltext.html
- Löhner, S., van Joolingen, W., & Savelsbergh, E. R. (2003). The Effect of External Representation on Constructing Computer Models of Complex Phenomena. *Instructional Science*, 31, 395–418.
- Louca, L. T., & Zacharia, Z. C. (2012). Modeling-based Learning in Science Education: Cognitive, Metacognitive, Social, Material and Epistemological Contributions. *Educational Review*, 64(4), 471–492. <https://doi.org/10.1080/00131911.2011.628748>
- Louca, L. T., Zacharia, Z. C., & Constantinou, C. P. (2011). In Quest of productive modeling-based learning discourse in elementary school science. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(8), 919–951.
- Lucas, L., Helikar, T., & Dauer, J. (2022). Revision as an essential step in modeling to support predicting, observing, and explaining cellular respiration system dynamics. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENCE EDUCATION*, 44(13), 2152–2179. <https://doi.org/10.1080/09500693.2022.2114815>
- Magana, A., Arigye, J., Udosen, A., Lyon, J., Joshi, P., & Pienaar, E. (2024). Scaffolded team-based computational modeling and simulation projects for promoting representational competence and regulatory skills. *International journal of stem education*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s40594-024-00494-3>
- Maia, P. F., & Justi, R. (2009). Learning of Chemical Equilibrium through Modelling-based Teaching. *International Journal of Science Education*, 31, 603–630. <https://doi.org/10.1080/09500690802538045>
- Margolin, J., Pinerua, I., & Gerdeman, D. (2022). Modeling in Science Education: A Synthesis of Recent Discovery Research PreK-12 Projects. *American Institutes for Research*. <https://par.nsf.gov/biblio/10358422-modeling-science-education-synthesis-recent-discovery-research-prek-projects>
- Muñoz Campos, V., Franco-Mariscal, A. J., & Blanco-López, Á. (2020). Integración de prácticas científicas de argumentación, indagación y modelización en un contexto de la vida diaria. Valoraciones de estudiantes de secundaria. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 17(3), 3201. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i3.3201
- Nelson, M. M., & Davis, E. A. (2012). Preservice Elementary Teachers' Evaluations of Elementary Students' Scientific Models: An aspect of pedagogical content knowledge for scientific modeling. *International Journal of Science Education*, 34(12), 1931–1959. <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.594103>
- Nicolaou, C. T., & Constantinou, C. P. (2014a). Assessment of the modeling competence: A systematic review and synthesis of empirical research. *Educational Research Review*, 13, 52–73.
- Nicolaou, Chr. Th., & Constantinou, C. P. (2014b). Assessment of the modeling competence: A systematic review and synthesis of empirical research. *Educational Research Review*, 13, 52–73. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2014.10.001>
- Ogborn, J., & Wong, D. (1984). A microcomputer dynamical modelling system. *Physics Education*, 19, 138–142.

- Oh, P. S., & Oh, S. J. (2011). What Teachers of Science Need to Know about Models: An overview. *International Journal of Science Education*, 33(8), 1109–1130.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2010.502191>
- Oliva, J. M., Aragón Méndez, M. M., Soto Mancera, F., Vicente Martorell, J. J., Matos Delgado, J., Marín Barrios, R., & Franco-Mariscal, R. (2021). ¿Varía la masa de la Tierra? Modelizando a partir de un experimento mental. *Enseñanza de Las Ciencias*, 39(2), 25–43.
- Papaevripidou, M., Constantinou, C. P., & Zacharia, Z. C. (2007). Modeling complex marine ecosystems: An investigation of two teaching approaches with fifth graders. *Journal of Computer Assisted Learning*, 23(2), 145–157.
- Papert, S. (1980). “Mindstorms” Children. *Computers and Powerful Ideas*.
<https://ci.nii.ac.jp/naid/10003835700/en/>
- Paz Otero, A., & Puig, B. (2020). Una secuencia para promover la alfabetización geocientífica y educación patrimonial en secundaria. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 17(2), 2202.
https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i2.2202
- Pedrerá, O., Barrutia, O., & Díez, J. (2025). Effectiveness of a model-based inquiry instructional sequence in overcoming students’ teaching-learning difficulties on plant nutrition. *International journal of science education*, 47(6), 794–816.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2024.2350705>
- Peleg, R., Lahav, O., Hagab, N., Talis, V., & Levy, S. (2024). Listening to or looking at models: Learning about dynamic complex systems in science among learners who are blind and learners who are sighted. *Journal of computer assisted learning*, 40(2), 452–464.
<https://doi.org/10.1111/jcal.12886>
- Peretz, R., Tal, M., Akiri, E., Dori, D., & Dori, Y. (2023). Fostering engineering and science students’ and teachers’ systems thinking and conceptual modeling skills. *Instructional science*, 51(3), 509–543. <https://doi.org/10.1007/s11251-023-09625-9>
- Pierson, A. E., & Brady, C. E. (2020). Expanding Opportunities for Systems Thinking, Conceptual Learning, and Participation through Embodied and Computational Modeling. *Systems*, 8(4), 48. <https://doi.org/10.3390/systems8040048>
- Pluta, W. J., Chinn, C. A., & Duncan, R. G. (2011). Learners’ epistemic criteria for good scientific models. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(5), 486–511.
<https://doi.org/10.1002/tea.20415>
- Prasad, P., & Iyer, S. (2022). VeriSIM: A model-based learning pedagogy for fostering software design evaluation skills in computer science undergraduates. *Research and practice in technology enhanced learning*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s41039-022-00192-0>
- Resnick, M., Maloney, J., Monroy-Hernández, A., Rusk, N., Eastmond, E., Brennan, K., Millner, A., Rosenbaum, E., Silver, J., Silverman, B., & Kafai, Y. (2009). Scratch: Programming for all. *Commun. ACM*, 52(11), 60–67. <https://doi.org/10.1145/1592761.1592779>
- Rodríguez Mora, F., & Blanco López, Á. (2020). Diseño de una secuencia de enseñanza-aprendizaje para el desarrollo de competencias científicas en el contexto del consumo de agua envasada. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 18(1), 1803.
https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2021.v18.i1.1803
- Samarapungavan, A., Bryan, L., Staudt, C., Sapkota, B., Pinto, H., Broadhead, J., & Kimball, N. (2023). Using technology-mediated inquiry to help young learners reimagine the visible world through simple particle models. *Journal of research in science teaching*, 60(2), 390–422.
<https://doi.org/10.1002/tea.21802>
- Schwarz, C. V., Ke, L., Salgado, M., & Manz, E. (2022). Beyond assessing knowledge about models and modeling: Moving toward expansive, meaningful, and equitable modeling practice. *Journal of Research in Science Teaching*. <https://doi.org/10.1002/tea.21770>
- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D., Shwartz, Y., Hug, B., & Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific

- modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632–654.
- Schwarz, C. V., & White, B. Y. (2005). Metamodeling Knowledge: Developing Students' Understanding of Scientific Modeling. *Cognition and Instruction*, 23(2), 165–205.
- Sins, Patrick. H. M., Savelsbergh, E. R. E. R., van Joolingen, W. W. R., & van Hout-Wolters, B. H. A. M. (2009). The Relation between Students' Epistemological Understanding of Computer Models and Their Cognitive Processing on a Modelling Task. *International Journal of Science Education*, 31(9), 1205–1229. <https://doi.org/10.1080/09500690802192181>
- Stratford, S. J., Krajcik, J., & 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(3), 215–234.
- Tang, X., Shu, G., Wei, B., & Levin, D. (2024). Emergent learning about measurement and uncertainty in an inquiry context: A case from an elementary classroom. *Science education*, 108(1), 308–331. <https://doi.org/10.1002/sce.21837>
- Torres, J., & Vasconcelos, C. (2016). Models in Geoscience Classes: How Can Teachers Use Them? In C. Vasconcelos (Ed.), *Geoscience Education: Indoor and Outdoor* (pp. 25–41). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43319-6_2
- Torres, J., & Vasconcelos, C. (2021). Models and the Nature of Science: What Mediates Their Implementation in Portuguese Biology and Geology Classes? *Education Sciences*, 11(11), 688. <https://doi.org/10.3390/educsci11110688>
- Upmeier Zu Belzen, A., Van Driel, J., & Krüger, D. (2019). Introducing a Framework for Modeling Competence. In A. Upmeier Zu Belzen, D. Krüger, & J. Van Driel (Eds.), *Towards a Competence-Based View on Models and Modeling in Science Education* (Vol. 12, pp. 3–19). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30255-9_1
- Valanides, N., & Angeli, C. (2008). Professional development for computer-enhanced learning: A case study with science teachers. *Research in Science & Technological Education*, 26(1), 3–12. <https://doi.org/10.1080/02635140701847397>
- van Borkulo, S. P., van Joolingen, W. R., Savelsbergh, E. R., & de Jong, T. (2012). What can be learned from computer modeling? Comparing expository and modeling approaches to teaching dynamic systems behavior. *Journal of Science Education and Technology*, 21, 267–275.
- Vasconcelos, L., & Kim, C. (2022). Preservice science teachers coding science simulations: Epistemological understanding, coding skills, and lesson design. *Educational technology research and development*, 70(4), 1517–1549. <https://doi.org/10.1007/s11423-022-10119-7>
- Wilensky, U., & Reisman, K. (2006). Thinking Like a Wolf, a Sheep, or a Firefly: Learning Biology Through Constructing and Testing Computational Theories—An Embodied Modeling Approach. *Cognition and Instruction*, 24(2), 171–209.
- Windschitl, M., Thompson, J., & Braaten, M. (2008). Beyond the scientific method: Model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations. *Science Education*, 92(5), 941–967. <https://doi.org/10.1002/sce.20259>
- Zhai, X., & Yin, Y. (2024). Using educative learning progression to support novice science teachers' lesson plan critiques. *International journal of science education*, 46(13), 1281–1310. <https://doi.org/10.1080/09500693.2023.2285259>
- Zhang, B., Liu, X., & Krajcik, J. S. (2006). Expert Models and Modeling Processes Associated with a Computer-Modeling Tool. *Science Education*, 90(4), 579–604.