

# Verwondering, enthousiasme en kritisch denken in de natuurkundeles

- Anita Tol

## Intro

Mama, waarom valt de maan niet naar benee? Mijn oudste dochter stelde mij deze vraag een aantal jaar geleden toen ze 3 jaar oud was. We waren Rineke Tineke Peuleschil aan het luisteren. Een gedicht van Annie MG Schmidt waar o.a. VOF de Kunst een muzikale versie van heeft gemaakt. Het gaat zo:

*Rineke Tineke Peuleschil bij ons in Amsterdam  
Die vroeg de hele tijd maar door hoe alles eigenlijk kwam  
Rineke Tineke Peuleschil die vroeg bijvoorbeeld: 'Hee,  
waarom, waarom, waarom valt de maan niet naar benee?'*

*Ze vroeg het aan de bakker met zijn dikke bolle wangen  
Die zei: 'Ze hebben 'm misschien met touwtjes opgehangen.'  
Ze vroeg het aan de melkboer en de melkboer zei: 'O, jee!  
Vandaag of morgen valt die maan misschien wel naar benee.'*

*Ze vroeg het aan meneer Verheul de deftige notaris  
Die zei: 'Ik denk punaises maar ik weet niet of het waar is.'  
Maar laten we 't gaan vragen aan een hele knappe man  
De directeur van 't postkantoor die weet er alles van*

*De directeur van 't postkantoor zei: 'Wel dat is bekend.  
Daar zijn bepaalde wetten voor dat staat in 't reglement.'  
En iedereen zei: 'Dank u wel wat fijn om dat te weten.'  
Toen gingen ze naar huis toe om een boterham te eten*

*Maar Rineke Tineke Peuleschil is niet zo erg tevree  
Ze vraagt nog altijd waarom valt de maan niet naar benee*

Zoals veel gedichten van Annie MG Schmidt heeft ook dit gedicht een prachtige boodschap. De volwassenen in het lied geven snelle en simplistische antwoorden waar ze blijkbaar ook tevreden mee zijn. Het lijkt wel alsof ze nooit eerder hebben nagedacht over Rineke's vraag, terwijl ze de maan toch regelmatig zien. Rineke blijft echter doorvragen. Haar leren stopt niet na het ontvangen antwoord. Ze blijft kritisch. En dat is waar deze lezing onder andere over gaat: over verwondering, enthousiasme en kritisch denken, maar dan in de natuurkundeles.

## Natuurkundedocent van het jaar

Ik ben Anita Tol en ik werk nu vier jaar op het Murmellius Gymnasium in Alkmaar, nadat ik eerder 12 jaar les heb gegeven op het Zaanlands Lyceum in Zaandam. Ik ben gevraagd om als natuurkundedocent van het jaar 2025 een lezing te verzorgen tijdens de WND.

Een van de doelen is om meer aandacht te vragen voor de verkiezing van Natuurkundedocent van het jaar. We bereiken hier, tijdens de WND, namelijk een hele grote groep docenten. Voor docenten die worden voorgedragen is het de bedoeling dat er een A4 wordt geschreven met daarin onderbouwd waarom juist deze docent de titel zou moeten krijgen. Voor de kandidaten die doorgaan naar de volgende ronde, kan vervolgens extra informatie worden aangeleverd. Dit kan in veel verschillende vormen. Docenten kunnen tot 31 januari 2026 worden voorgedragen. Het is een mooie kans om de inzet en het enthousiasme van een natuurkundedocent extra aandacht te geven.

## **Enthousiasme en verwondering**

Als ik terugdenk aan de lessen die ik zelf op de middelbare school en de universiteit heb gevolgd, zijn het vooral de demo's, practica en enthousiaste docenten die mij zijn bijgebleven. Mijn natuurkundedocent op de middelbare school begon zijn lessen vaak met een demo of goocheltruc die we dan aan het eind van de les natuurkundig moesten verklaren. Het zorgde voor verwondering en zette ons aan het denken over natuurkunde.

En ook op de universiteit werd ik niet teleurgesteld als het gaat om het enthousiasmeren van studenten. Ik had het voorrecht om les te krijgen van inspirerende professoren. Zo zat ik bij het laatste cohort studenten dat les kreeg van Robbert Dijkgraaf voordat hij naar Princeton vertrok. Ik herinner me nog hoe enthousiast hij uitleg gaf over de symmetrie van een gelijkzijdige driehoek. Relatief eenvoudige natuurkunde, maar zó verteld dat het indruk maakt en blijft hangen. Dat is wat studenten zich blijkbaar de rest van hun leven herinneren.

## **Van passieve ontvanger naar betrokken leerling**

Enthousiasme en verwondering dus...

Stel je dan eens een zesde klas voor van 32 leerlingen. Je stelt ze een klassikale vraag en er komt geen antwoord. Niet omdat ze het antwoord op de vraag niet weten, maar omdat ze niet gewend zijn om hun ideeën en gedachten te delen. Ik heb dit zelf ervaren toen ik les gaf op een nieuwe school. En ik schrok hier van. Er was geen zicht op hun (kritische) manier van denken, geen zicht op wat ze weten en geen zicht op hoe deze leerlingen leren.

Er was werk aan de winkel, voor mij. Want... om even een beeld te schetsen van de sfeer die vanaf dag één in die klas heerste: er werd slecht huiswerk gemaakt, ik kreeg van een leerling te horen dat ik hem deed denken aan zijn basisschooljuf nadat ik iemand voor het bord had gehaald. Ik legde het idee van een nieuwe werkvorm uit en er werd gezegd: mevrouw waarom moet dit nou zo moeilijk? U kunt het toch ook gewoon op papier aan ons geven?

Juist... Ik had twee opties. Of ik ga lesgeven zoals zij gewend zijn: PowerPoint afdraaien en 50 minuten zenden óf een leerklimaat creëren waarin leerlingen zich veilig en gemotiveerd genoeg voelen om hun ideeën te delen en met elkaar te discussiëren waardoor ik beter zicht kreeg op wat zich in hun hoofd afspeelde én waar ze natuurkunde echt beleefden. Uiteraard koos ik voor het laatste. Er was dus ook werk aan de winkel was voor de leerlingen: zij moesten leren op een andere manier te werken. Zij moesten van passieve ontvanger naar actieve, betrokken leerling.

Dat gebeurde natuurlijk niet van de ene op de andere dag. Ik herinner me nog de eerste keer dat ik een practicum deed met deze klas. De leerlingen onderzochten het verband tussen de middelpuntzoekende kracht en de snelheid van de ronddraaiende massa. Er vlogen toen letterlijk stoppen door het lokaal. Per ongeluk natuurlijk. De praktische vaardigheden van deze leerlingen waren nog onvoldoende ontwikkeld.

Dit was wel één van de eerste lessen waarin deze leerlingen kennismaakten met de werkvorm Modeldidactiek. Een werkvorm die hopelijk zou zorgen voor meer enthousiasme in de klas en kritisch denkende leerlingen.

## **Modeldidactiek**

Modeldidactiek wordt al sinds de jaren '80 in de Verenigde Staten gebruikt om het natuurkundeonderwijs vorm te geven en is in Nederland ondertussen ook onder steeds meer natuurkundedocenten bekend en wordt door steeds meer docenten uitgetoetst. Tijdens de WND wordt er de laatste jaren steeds meer aandacht aan besteed in werkgroepen en lezingen.

Modeldidactiek is gebaseerd op het Amerikaanse *Modeling Instruction*™. Het is een didactiek waarbij leerlingen geconfronteerd worden met een verschijnsel en dat verschijnsel vervolgens, vaak in groepjes van drie leerlingen, verder gaan onderzoeken. Het doel is dat ze uiteindelijk tot een conceptueel model komen. Dit doen leerlingen deels door zelf experimenten te ontwerpen en uit te voeren. De resultaten verwerken ze in allerlei vormen op een whiteboard: tabellen, grafieken, schetsen, formules, tekst enz. Aan het eind van de les delen de groepjes hun bevindingen met elkaar. Dit kan bijvoorbeeld in de vorm van een groepsdiscussie. Leerlingen komen gezamenlijk tot een model. En hoewel de docent daarbij behoorlijk veel sturing geeft, merken de leerlingen dat zelf eigenlijk niet.

Modeldidactiek kan bijvoorbeeld gebruikt worden om de formule  $s=v*t$  af te leiden. Leerlingen gebruiken hier twee IKEA-treintjes voor die met verschillende snelheden bewegen. De leerlingen meten zo nauwkeurig mogelijk de positie van de treintjes als functie van de tijd en maken een (x,t)-diagram van beide treintjes op het whiteboard. De resultaten geven een rechte lijn door de oorsprong. Leerlingen denken na over de betekenis van deze lijn en wat deze lijn zegt over de beweging van het treintje. Vanuit wiskunde weten ze allemaal hoe ze de richtingscoëfficiënt moeten bepalen. Ze ontdekken dat de helling in deze situaties iets is in m/s. Met de klas samen komen ze tot een formule die past bij alle grafieken:  $s=v*t$ . Leerlingen zijn dus bezig met het ontwikkelen van een model voor bewegingen met een constante snelheid.

Vervolgens passen ze hun 'constante snelheidsmodel' toe in een nieuwe situatie. Ze moeten een onderbouwde voorspelling doen over waar de treintjes zullen botsen als een baan van drie meter is uitgezet. Het snelle treintje begint aan de ene kant, het langzame treintje aan de andere kant.

Vaak zijn er twee manieren waarop leerlingen dit aanpakken. Leerlingen met wiskunde B pakken de formules erbij, andere leerlingen tekenen de beweging van beide treintjes in een x,t diagram en bepalen op welk tijdstip de lijnen elkaar kruisen. De strategieën zijn dus verschillend, maar het einddoel is hetzelfde. En dat is vaak zo bij de experimenten die we kiezen.

Deze activiteit is ontzettend leuk: het voegt een spelelement toe en laat leerlingen controleren of hun berekeningen kloppen én of hun metingen nauwkeurig waren. In de discussie kan worden gesproken over de nauwkeurigheid van de bepalingen/berekeningen en de verschillende oplossingsstrategieën.

Daarna onderzoeken ze situaties waarin het eenvoudige model van constante snelheid niet meer geldt, zodat ze leren hun modellen aan te passen.

## **Reacties**

Tijdens mijn lessen merk ik telkens weer hoe enthousiast leerlingen worden wanneer we met modeldidactiek werken. Ze zijn veel actiever dan tijdens de traditionele lessen. Werken in kleine groepjes stimuleert ze om vragen te stellen en fouten te maken. Het klaslokaal verandert in een plek waar actief wordt nagedacht, overlegd en geredeneerd over natuurkunde. Zo leren leerlingen niet alleen welke grootheden er in een formule staan, maar ontwikkelen ze een dieper begrip van wat die grootheden daadwerkelijk betekenen.

En terwijl ze samen proberen tot een model te komen, ervaren ze dat er meerdere routes zijn om tot hetzelfde model te komen én hoe wetenschappelijke inzichten tot stand komen. De whiteboards spelen hierbij een grote rol: ze maken het denkproces van leerlingen letterlijk zichtbaar en helpen mij om snel misconcepten te herkennen. Hierdoor kan ik ze gericht feedback geven en blijft de betrokkenheid hoog. Tegelijkertijd versterkt het samenwerken het groepsgevoel en sluiten we ongemerkt aan bij de doelen van burgerschap. Bovendien ontdekken leerlingen dat modellen — net als weersvoorspellingen — hun beperkingen hebben, en dat die beperkingen ook gewoon bij wetenschap horen.

## Artikel NVOX

Er komt binnenkort een artikel in de NVOX met de resultaten van een onderzoek dat Cathy Baars en Ed van den Berg hebben uitgevoerd onder leerlingen van het Martinuscollege (leerlingen van Cathy Baars) en leerlingen van het Amsterdams Lyceum (leerlingen van Onne Slooten). Het betreft hier leerlingen die zeer regelmatig (meer dan 70% van de lessen) met modeldidactiek werken. In dit artikel worden ook de uitdagingen van werken met Modeldidactiek besproken.

## Werkzame ingrediënten Modeldidactiek

Modeldidactiek heeft een groot aantal werkzame ingrediënten die ook goed ‘los’ kunnen worden gebruikt.

### WHITEBOARDS (INZICHT IN DENKPROCES EN FAST FEEDBACK)

Een voorbeeld zijn de whiteboards. Die geven veel inzicht in het denkproces van leerlingen. Ik laat mijn leerlingen daarom ook regelmatig examenopdrachten of lastige opgaven uit het lesboek uitwerken op de whiteboards. Of samenvattingen maken van het hoofdstuk voorafgaand aan een toets. Dit laatste vooral bij klas 2 en 3.

Door whiteboards te gebruiken, kun je leerlingen snelle en gerichte feedback geven. Je kunt leerlingen ook vragen om bewust een fout in hun uitwerking te stoppen. De andere groepjes moeten vervolgens achterhalen waar de fout zit. Mijn ervaring is dat leerlingen op deze manier kritisch zijn en actief betrokken.

### HEEN-EN-WEER DENKEN TUSSEN VERSCHIJNSELEN EN MODELLEN (PREDICT EXPLAIN OBSERVE EXPLAIN)

Ik laat leerlingen ook wel eens voorafgaand aan een demo hun voorspelling met onderbouwing noteren op het whiteboard.

Ik hou heel erg van demo's met huis, tuin en keukenmateriaal, omdat ik altijd hoop dat de leerlingen de demo dan tijdens het avondeten aan hun ouders laten zien. Een voorbeeld is het experiment met appel, hamer en mes. Ik laat leerlingen voorspellen wat er gaat gebeuren en verwacht dat ze hun voorspelling ook natuurkundig onderbouwen. Dit noteren ze op een whiteboard of in een schrift en wordt na een minuut besproken. Daarna wordt het experiment uitgevoerd. Wat was het verschil tussen de observatie en de eerste verwachting?

We hebben zojuist gebruik gemaakt van de werkvorm PEOE (Predict Explain Observe Explain). Ook bij deze werkvorm zijn leerlingen, net als bij modeldidactiek, aan het heen en weer denken tussen verschijnselen en modellen/begrippen. Er worden idealiter demo's gebruikt waarbij leerlingen denken te weten wat er gaat gebeuren maar die vaak een verrassende uitkomst hebben. We kunnen namelijk niet altijd van onze intuïtie op aan.

### ACTIEVE LEERLINGEN EN NATUURKUNDE-TALK (CONCEPTVRAGEN)

Op dinsdagochtend om half negen, wanneer klas 6 nog half slaperig binnenkomt, begin ik mijn les vaak met een prikkelende vraag, een concept cartoon of een andere aandachtstrekker om het brein van de leerlingen meteen “in de natuurkundestand” te zetten. En het mooie is: op vragen die op het eerste gezicht heel simpel lijken, krijg ik vaak een verrassend grote variatie aan antwoorden. Dáár begint het leren.

Die vragen gebruik ik niet alleen om iedereen wakker te krijgen. Soms om te kijken wat ze al weten, soms om het redeneren te oefenen en soms als startpunt voor een onderzoekje. De aanpak is vaak hetzelfde, maar daar is wel in te variëren: eerst denken ze individueel na, dan halen we de antwoorden op, luisteren we naar een paar leerlingen die hun uitleg geven, praten ze in tweetallen verder — en daarna kiezen ze opnieuw.

En bijna altijd gebeurt er dan iets interessants: een leerling die eerst heel zeker was, begint ineens te twifelen. Iemand die dacht dat het antwoord voor de hand lag, ontdekt dat er toch een addertje onder het gras zit. De vragen zijn namelijk zo geformuleerd dat *alle* antwoorden in

theorie zouden kunnen kloppen. Het is voor leerlingen lang niet altijd meteen duidelijk wat het juiste antwoord is. Kritisch denken dus. Actieve leerlingen. En natuurkunde – talk. Net zoals bij modeldidactiek. Er staan veel voorbeelden van conceptvragen in ‘The physics teacher’.

#### STAPSGEWIJS REDENEREN MET AANNAMES (FERMI-VRAGEN)

Laat me jullie meenemen naar een maandagochtend in juli 1945. Het is negenentwintig minuten over vijf, ergens diep in de woestijn van New Mexico. 100 km ten noordwesten van Alamogordo staat een groep wetenschappers in spanning te wachten. En dan ontploft de allereerste atoombom ter wereld. Een paddenstoelwolk stijgt de lucht in en iedereen staat met open mond te kijken.

Enrico Fermi is één van de sleutelfiguren achter het Manhattanproject is één van de eerste personen die beweegt. Hij doet iets verrassends eenvoudigs. Hij had vóór de explosie een vel papier in kleine snippers gescheurd. Toen hij de schokgolf voelde aankomen, liet hij die snippers los boven zijn hoofd. Ze dwarrelden omlaag en landden zo’n tweeënhalve meter achter hem. Fermi kijkt even, rekent in zijn hoofd en zegt dan: “De energie van deze bom is ongeveer gelijk aan tienduizend ton TNT.”

Later, na weken van metingen en analyses, bleek dat hij bijna precies goed zat met zijn schatting.

En dat brengt mij bij wat we tegenwoordig een *Fermi-probleem* of *Fermi-vraag* noemen. Dat is een vraag waarvan je in eerste instantie géén idee hebt wat het antwoord zou kunnen zijn. Het lijkt alsof je cruciale informatie mist. Maar zodra je zo’n probleem opdeelt in kleinere, beter behapbare stukjes, kun je tóch een verrassend goede schatting maken, die vaak binnen de juiste orde van grootte uitkomt — gewoon met gezond verstand.

Bij Modeldidactiek vragen we leerlingen om iets vergelijkbaars te doen. Wanneer ze een experiment opzetten moeten ze eerst nadenken over welke variabelen een rol spelen. Hoe deze variabelen met elkaar zouden kunnen samenhangen en hoe ze deze informatie kunnen combineren tot een bruikbaar model.

Een klassieke Fermi-vraag is: ‘hoeveel pianostemmers wonen er in Amsterdam’? Als je écht zeker wilt weten hoeveel pianostemmers er in Amsterdam zijn, moet je ze simpelweg één voor één gaan tellen. Als Fermivraag pakken we deze vraag als volgt aan. Eerst gaan we na welke informatie we nodig hebben om deze vraag te beantwoorden. Die informatie gaan we schatten en combineren we op de juiste manier tot ons eindantwoord. Die schattingen werken goed want in een lange reeks aannames maken we allemaal wel wat fouten: we schatten iets te groot in, iets anders te klein. Hierdoor schuift je uiteindelijke schatting vaak richting het echte antwoord. Het schatten en werken met orde-grootte zie je ook steeds vaker terug in de eindexamens en ik zou zo graag willen dat leerlingen een gevoel ontwikkelen voor orde-groottes en er tijdens toetsen alarmbellen gaan rinkelen als ze een dosisequivalent uitrekenen van  $10^{24}$  Sv of een snelheid die duizend keer groter is dan de lichtsnelheid.

#### REFLECTIE/INZICHT IN BEGRIP (EXIT-KAARTEN)

Bij modeldidactiek gebruik ik vaak whiteboards om snel te zien wat leerlingen begrijpen en hoe de les verloopt. Maar ook exit-kaarten zijn hier geschikt voor. Dit zijn kleine kaartjes waarop leerlingen aan het einde van de les kort reflecteren op hun eigen leerproces óf waarmee ze laten zien of ze de concepten begrijpen die in die les zijn behandeld. De leerlingen vullen deze kaartjes de laatste vijf minuten van de les in en leveren ze in voordat ze het lokaal verlaten. Zo is er direct een duidelijke reflectiefase aanwezig. En het mooiste is dat de leerlingen daardoor mede bepalen wat er in de volgende les behandeld wordt.

### **Slot deel 1**

Bij modeldidactiek komt eigenlijk alles samen waar ik als docent een warm hart voor heb. Het gaat over leerlingen uitdagen, kritisch denken stimuleren, burgerschap ontwikkelen, ze natuurkunde laten ervaren, vragen laten stellen en ze vooral enthousiasmeren. Het gaat zoveel verder dan informatie simpelweg aannemen zoals die wordt aangeboden.

We willen leerlingen uitnodigen om te onderzoeken, om dóór te vragen, om verschillende perspectieven te overwegen voordat ze een oordeel vormen of een beslissing nemen. Eigenlijk een beetje zoals Rineke Tineke Peuleschil — iemand die niet zomaar alles klakkeloos overneemt.

### **Slot deel 2**

Ik weet niet hoe dat voor jullie is, maar als ik mensen vertel dat ik docent natuurkunde ben, krijg ik standaard twee reacties: “Jeetje, dat lijkt me pittig hoor, zo'n klas vol 16-jarigen...” En: “Natuurkunde? Dat vond ik zó lastig en saai, ik heb het na de derde meteen laten vallen.”

En dan vertel ik ze over Daan, die op een zondagmiddag urenlang bezig was om de y-component van de elektrische veldsterkte binnen én buiten een oneindig lange plaat uit te rekenen — voor zijn plezier! Ik vertel ze over Gijs, die het lokaal nooit verlaat zonder te zeggen: “Bedankt voor de les, mevrouw.” Over Puck en Wende, die elke woensdag langskomen met een ‘vraag van de week’ om hun docenten beter te leren kennen. En over Storm, die “De sublieme eenvoud van relativiteit” zit te lezen en niet kan wáchten om verder te gaan omdat hij het zulke leuke natuurkunde vindt.

Voor mij gaat doceren dus niet alleen over zenden. Het gaat over talenten ontdekken, leerlingen inspireren en ze uitdagen op hun eigen niveau. We weten allemaal wat een fantastisch beroep het docentschap is en als we leerlingen natuurkunde laten ervaren, als we ze er met elkaar over laten praten en hun eigen vragen laten onderzoeken, dan zullen ze volgens mij niet zo snel zeggen dat natuurkunde saai is.