

4.2 Domeinspecifieke leerstofopbouw

4.2.9 Geofysica

Achtergrondinformatie

Geofysica / Aarde en klimaat

Ton van der Valk

Inleiding

Eén van de vier keuzedomeinen in het examenprogramma natuurkunde voor vwo is *Geofysica*, deeldomein G2 van domein G *Leven en Aarde*. Voor havo gaat het om het domein E *Aarde en heelal*, deeldomein E2 *Aarde en klimaat*. Ze worden als keuzedomein in het schoolexamen (SE) getoetst.

De formulering van de eindterm is voor het vwo- en havo-deeldomein hetzelfde, zoals weergegeven in figuur 1. Onder de term ‘geofysisch’ in de eindterm blijkt NiNa zowel de fysica van de vaste Aarde als van de atmosfeer te bedoelen: zie figuur 3 en 5. Op de universiteiten en hogescholen wordt de term geofysica echter vooral gebruikt als het gaat over de vaste Aarde: zie figuur 2. Voor studies over weer en klimaat moet men bij meteorologie zijn. Met het oog op een oriëntatie op vervolgstudies zou de term ‘geofysisch’ in de eindterm daarom problematisch kunnen zijn.

Om de school en de leraar een grote vrijheid te geven bij het inhoudelijk invullen van de keuzedomeinen, is er in de syllabi geen specificatie voor deze keuzedomeinen opgenomen. De inhoud wordt bepaald door de (vaak breed geformuleerde) eindterm bij het betreffende (deel)domein in de examenprogramma’s. Men heeft in de examenprogramma’s niet willen vastleggen welk deel van de studielast natuurkunde in de tweede fase (vwo: 480 studielastuur (slu), havo 400 slu) aan een keuzedomein moet worden besteed. NiNa heeft voorbeeldmateriaal geofysica ontwikkeld voor havo (Van Buuren et al, 2012) en vwo (Groenewold, 2012), en is daarbij uitgegaan van 15 lessen van 50 minuten per keuzedomein, wat overeen komt met 20 slu. De ervaring met het havo-voorbeeldmateriaal leert dat het lastig is zowel het deelthema *Weer en klimaat* als het deelthema *De vaste Aarde* in die tijd met een bevredigende diepgang te behandelen (NiNa, 2010).

In het eerste deel van dit stuk beschrijven we welke inhoudelijke keuzen voor de domeinen *Geofysica* en *Aarde en klimaat* gemaakt zijn in het NiNa- voorbeeldmateriaal en in de commerciële lesmethodes bij het examenprogramma natuurkunde. In het tweede deel focussen we op de deelthema’s *De vaste Aarde* en *Weer en klimaat*. We geven aan welke voorkennis relevant is, met aandacht voor leerlingdenkbeelden die bij de begripsvorming een rol kunnen spelen. Ook werken we een mogelijke didactische structuur uit, met als doel de leraar te helpen bij het kiezen van een inhoudelijke invulling.

Leerstof

In dit eerste deel geven we de inhoudelijke keuze van NiNa aan en gaan we na welke inhoudelijke keuzes de verschillende lesmethodes bij de examenprogramma’s 2013 hebben gemaakt.

Aan de hand van de suggesties die Paus (2012) doet in zijn handreiking aan scholen, onderscheidt Kortland (2017, blz. 237) voor geofysica in het *Handboek Natuurkundedidactiek* vier deelthema’s: het weer, klimaat, platentektoniek en getijden. We zullen deze indeling hier volgen, waarbij we de naam ‘platentektoniek’ vervangen door ‘De vaste Aarde’. En met de kanttekening dat het deelthema ‘getijden’ beter past in een leerstofdomein als astrofysica (zie paragraaf 4.2.8 in het *Handboek natuurkundedidactiek*).

Inhoud

Leerstof	1
Havo: Aarde en klimaat	2
Vwo: Geofysica	2
Criteria voor inhoudskeuze	3
Focus op twee deelthema’s	4
1 De vaste Aarde	4
2 Weer en klimaat	9

Vwo examenstof keuzedomein

G2 Geofysica

Havo examenstof keuzedomein

E2 Aarde en klimaat

De kandidaat kan in de context van geofysische systemen fysische verschijnselen en processen beschrijven, analyseren en verklaren.

Figuur 1 – Algemene omschrijving van de examenstof in de examenprogramma’s natuurkunde vwo en havo.

Geofysica is de studie van de natuurkundige verschijnselen die zich voordoen in de Aarde. Geofysica wordt tot de aardwetenschappen gerekend, maar is ook te zien als een specialisatie binnen de natuurkunde. In ruimere zin bestudeert de geofysica alle onderdelen van het systeem Aarde, maar er kan een onderscheid gemaakt worden tussen de geofysica van de dampkring (bijvoorbeeld meteorologie en klimatologie), de geofysica van de oceanen (fysische oceanografie) en de geofysica van de vaste Aarde. In engere zin betreft de geofysica alleen de geofysica van de vaste Aarde, en heeft dan veel raakvlakken met de geologie en de geochemie.

Figuur 2 – Het lemma *Geofysica* op Wikipedia (dd. 5 maart 2018).

Geofysische verschijnselen en processen komen aan de orde als voorbeelden van deels uit andere domeinen bekende verschijnselen en processen, maar nu op de schaal van kilometers. De invloed die de zon heeft op tal van geofysische verschijnselen en processen wordt verbonden met de bestaansvoorwaarden voor leven op aarde.

Figuur 3 – Omschrijving van het havo-domein *Aarde en klimaat* in het NiNa-eindadvies.

Havo: Aarde en klimaat

In figuur 3 staat de omschrijving van het havo-keuzedomein in het NiNa-eindadvies (2010). Door de formulering ‘de invloed van de zon’ verwijst deze omschrijving expliciet naar het deelthema ‘Het weer’. De NiNa-voorbeeldmodule *Aarde en atmosfeer* voor havo (Van Buuren et al, 2012) bespreekt het deelthema *Weer en klimaat* uitgebreid, maar gaat ook kort in op het deelthema *De vaste Aarde*.

Er zijn bij de educatieve uitgeverijen zes natuurkunde-methodes verschenen bij het NiNa-examenprogramma havo. Vijf daarvan bevatten een uitwerking van het deeldomein *Aarde en klimaat*. De zesde methode, *Stevin*, verwijst naar de NiNa-voorbeeldmodule.

De tabel van figuur 4 laat zien welke deelthema’s in welke lesmethodes aan de orde komen. Daaruit blijkt dat drie lesmethodes het NiNa-voorbeeldmateriaal volgen en de drie deelthema’s – het weer, klimaat en de vaste Aarde – behandelen. Twee lesmethodes beperken zich tot het weer en klimaat.

Deelthema	Havo-methode en titel hoofdstuk/katern				
	<i>Systematische Natuurkunde katern C havo Weer en klimaat</i>	<i>Overall Natuurkunde hoofdstuk AK</i>	<i>Newton keuzekatern K3 Aarde en klimaat</i>	<i>Nova 4H hoofdstuk 7 Aarde en klimaat</i>	<i>Pulsar 5H (3^e ed.) hoofdstuk 16 Aarde en klimaat</i>
Weer en klimaat	Luchtdruk en weer De atmosfeer Wind Neerslag De temperatuur op aarde	Het systeem aarde Wolken Het klimaat	Stromingen in de atmosfeer Straling en energie in de atmosfeer Oceanen en de algemene circulatie	Eigenschappen van de atmosfeer Seizoenen Wind Drukverdeling en klimaatgordels Opwarming van de aarde Straling in de atmosfeer	Luchtdruk Regen en wind Zomer en winter De temperatuur op Aarde
De vaste Aarde		De vaste aarde	Stromingen in de aarde		Aardbevingen

Figuur 4 – Inhoudelijke uitwerking van *Aarde en klimaat* in de verschillende havo-methodes. In de tabel zijn de titels van de (deel)paragrafen uit de betreffende lesmethodes ingevuld. Bij de analyse is aanvullende informatie op de methodesites (experimenten, onderzoeken en contexten) niet meegenomen.

Bij het onderwerp Aarde gaat het om fysische begrippen en processen die een rol spelen in het beschrijven en verklaren van weer en klimaat. Gas- en stromingswetten spelen daarin een belangrijke rol. In de context van de energiebalans van het aarde-zonsysteem worden het broeikaseffect en consequenties daarvan behandeld. Leerlingen kunnen door eigen waarnemingen en modelleeropdrachten hun kennis verdiepen.

Figuur 5 – Omschrijving van het vwo-domein *Geofysica* in het NiNa-eindadvies.

Vwo: Geofysica

In figuur 5 staat de omschrijving van het vwo-keuzedomein in het NiNa-eindadvies (2010). Net als bij de havo beperkt deze omschrijving het domein tot de deelthema’s weer en klimaat. Die inperking kan aanleiding geven tot een incorrecte beeldvorming van studies als geologie (met het vak geofysica) en meteorologie (een specialisatie binnen de natuurkundestudie). Weer en klimaat zou bij deze invulling van het keuzedomein G2 een juistere titel geweest zijn.

De NiNa-voorbeeldmodule *Weer en klimaat* voor vwo (Groenewold, 2012) beperkt zich tot de in de moduletitel genoemde deelthema’s. NiNa-voorbeeldmateriaal over het deelthema *De vaste Aarde* ontbreekt. Dat is jammer, want dat is een heel nieuw onderwerp voor het natuurkundeonderwijs. Over het weer, daarentegen, is veel, zij het wat ouder lesmateriaal beschikbaar: onder andere verschillende katernen bij de vwo-keuzegroep *Weerkunde* (bijvoorbeeld Van Welie, 1980). Voor NLT zijn er verschillende modules over weer en klimaat (onder andere *IJs en klimaat* en *Klimaatverandering*). Voor het deelthema *De vaste Aarde* is er de NLT-module *De Bewegende Aarde*.

Er zijn bij de educatieve uitgeverijen zes natuurkunde-methodes verschenen bij het NiNa-examenprogramma vwo. Vijf daarvan bevatten een uitwerking van het deeldomein *Geofysica*. De zesde methode, *Stevin*, verwijst naar de NiNa-voorbeeldmodule.

De tabel van figuur 6 vat samen welke deelthema’s in welke lesmethodes

aan de orde komen. Er is slechts één methode, *Newton*, die de keuze van NiNa om zich te beperken tot weer en klimaat heeft overgenomen. De methodes *Pulsar* en *Overal Natuurkunde* behandelen onderwerpen uit elk van de drie deelthema's. Twee methodes, *Systematische natuurkunde* en *Nova*, richten zich volledig op het deelthema De vaste Aarde. Deze twee beperken zich in hun havo-methode tot weer en klimaat. Daarmee komen ze tegemoet aan de wens van NiNa om een duidelijk verschil te maken tussen havo en vwo. De methode *Pulsar* biedt voor havo en vwo grotendeels dezelfde inhoud, zij het met een verschil in diepgang.

Deelthema	Vwo-methode en titel hoofdstuk/katern				
	<i>Systematische Natuurkunde</i> katern B Geofysica	<i>Overal Natuurkunde</i> hoofdstuk G	<i>Newton</i> keuzekatern K1 Geofysica: weer en klimaat	<i>Nova 4V</i> hoofdstuk 6 Geofysica: de natuurkunde van de vaste aarde	<i>Pulsar 6V (3^e ed.)</i> hoofdstuk 16 Geofysica
Weer en klimaat		De atmosfeer Stromingen Warmte	Atmosfeer Wind Straalstroom en storingen Regen en zonneschijn		Luchtdruk Regen en wind Zomer en winter De temperatuur op aarde
De vaste Aarde	Inwendige van de aarde Bewegingen van de aarde Valversnelling Aardmagnetisme	De aarde Seismologie Warmte		Het inwendige van de aarde Zwaartekrachtmetingen Seismologie en seismiek Warmte E-, m- en em-meetmethoden	Aardbevingen

Figuur 6 – Inhoudelijke uitwerking van *Geofysica* in de verschillende vwo-methodes. In de tabel zijn de titels van de (deel)paragrafen uit de betreffende lesmethodes ingevuld. Aanvullende informatie op de methodesites (experimenten, onderzoeken en contexten) is niet in deze tabel opgenomen.

Criteria voor inhoudskeuze

Niet alleen de methode-auteurs, maar ook de leraar heeft de vrijheid om inhoudelijke keuzes te maken bij *Geofysica / Aarde en klimaat*, binnen de grenzen van de eindterm. Welke criteria kun je daarbij hanteren?

Een belangrijk argument om te kiezen voor het onderwijzen van *Geofysica/Aarde en klimaat* kan zijn dat je zelf veel afweet van het vakgebied geofysica of meteorologie, bijvoorbeeld omdat daar je specialisatie in je studie lag. Keuzedomeinen geven volop mogelijkheden de leerlingen iets te laten zien van je (vroegere) onderzoeksgebied of beroepspraktijk. Als je zelf geen specialistische geofysische of meteorologische kennis hebt, kan 'meer willen weten over geofysica' een goed motief zijn. Je kunt dan misschien profiteren van de kennis van een collega die veel van geofysica of meteorologie afweet.

Bij het kiezen van een keuzedomein spelen praktische redenen een belangrijke rol. Bijvoorbeeld de hoeveelheid tijd je beschikbaar hebt voor het inwerken in nieuwe leerstof. In geval van te weinig tijd kun je (of je sectie) terugvallen op ervaringen uit voorgaande jaren. Ook is van belang rekening te houden met de leerlingen die NLT doen: als daar bijvoorbeeld de module *De Bewegende Aarde* in zit, is er grote kans op overlap met het deelthema De vaste Aarde.

Wanneer je (sectie) kiest voor *Geofysica/Aarde en klimaat*, is de vervolgkeuze: welke deelthema's? Het ligt voor de hand hierin het natuurkundeboek dat je gebruikt te volgen, maar je kunt ook eigen keuzes maken. Als je het deelthema klimaat wilt behandelen, is het eigenlijk onvermijdelijk ook het deelthema het weer te kiezen.

De keuze van deelthema's kun je ook overlaten aan de leerlingen, bijvoor-

beeld door differentiatie: elke groepje leerlingen mag een deelthema kiezen en verder uitpluizen. Het resultaat van hun werk kunnen ze aan de klas presenteren, zodat het resultaat is dat alle leerlingen een beetje afweten van de verschillende deelthema's.

Focus op twee deelthema's

1 De vaste Aarde

Hieronder werken we de voorkennis en de begripsopbouw uit voor geofysica in engere zin: het deelthema De vaste Aarde.

Voorkennis

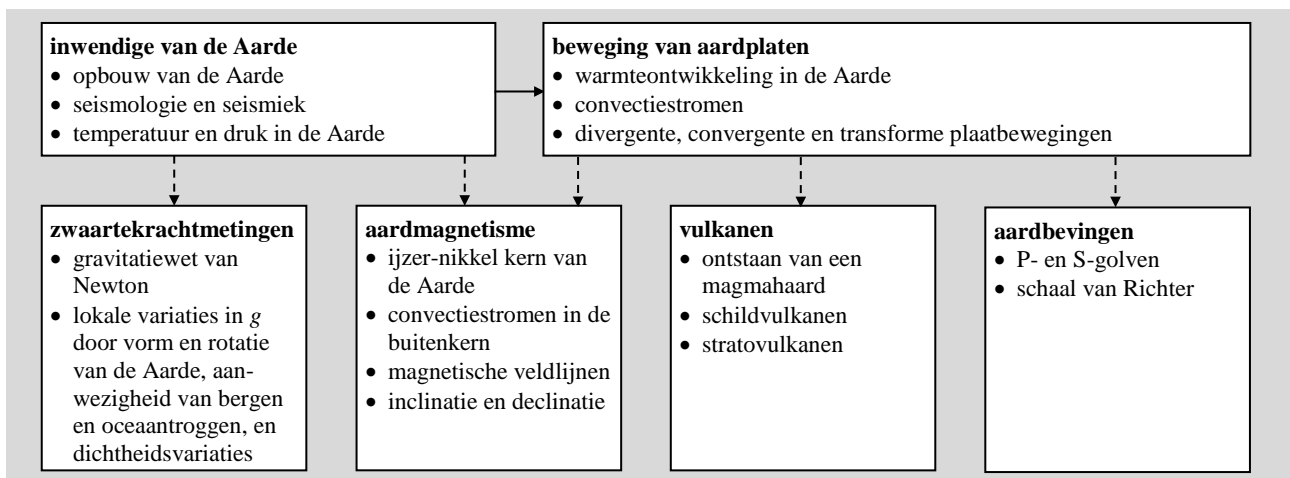
In de onderbouw komt de natuurkunde van de vaste Aarde niet expliciet aan de orde. Basisbegrippen zoals dichtheid, temperatuur, faseovergang, warmte, energie en magnetisme zijn onontbeerlijk als voorkennis bij het deelthema De vaste Aarde.

Bij de processen die in de vaste Aarde een rol spelen, neemt het begrip tijd een bijzondere plaats in. Immers, de meeste relevante processen in de vaste Aarde verlopen erg langzaam. De Alpen, bijvoorbeeld, worden als 'een jong gebergte' beschouwd. Het alpiene landschap werd 'slechts' twee miljoen jaar geleden, in het kwartaal, gevormd. Dat is geologisch gezien zeer kort geleden. Leerlingen zullen aan de geologische tijdschaal moeten wennen en denkbeelden overboord moeten zetten. Bijvoorbeeld het denkbeeld dat de vroege mens in de dinosaurustijd leefde, een denkbeeld dat zij onder invloed van films gevormd kunnen hebben. Leerlingen die op grond van de Bijbel of de Koran geloven dat de Aarde ongeveer 6000 jaar geleden werd geschapen, zullen een manier moeten vinden hoe om te gaan met de discrepantie tussen wat hun geloof hen zegt en wat de natuurwetenschap gevonden heeft. Door een klassendiscussie over het verschil tussen geloof en wetenschap over wat 'waar' is, kan worden voorkomen dat zij de resultaten van de wetenschap afwijzen zoals sommige [creationisten](#) dat doen. Die trekken bijvoorbeeld de validiteit van de C-14 datering in twijfel.

Bij de uitwerking van de begripsopbouw hieronder gaan we verder in op mogelijke leerlingdenkbeelden bij dit deelthema (King, 2010; Francek, 2013).

Begripsopbouw

De inhoudelijke kern van het deelthema De vaste Aarde omvat globaal twee onderwerpen: de opbouw van het inwendige van de Aarde en de beweging van de aardplaten. Daarnaast kan een aantal onderwerpen uitgediept worden, zoals aardbevingen, vulkanen, aardmagnetisme en variaties in de zwaartekracht. Het schema van figuur 7 geeft een mogelijke begripsopbouw.



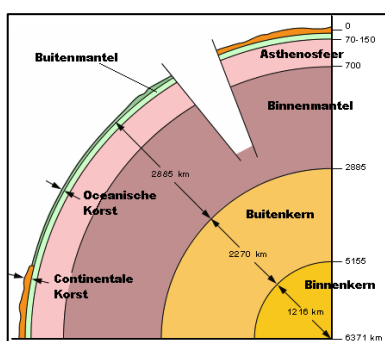
Figuur 7 – Een mogelijke begripsopbouw van het deelthema De vaste Aarde. De gestippelde lijnen geven verdiepingsmogelijkheden aan bij de inhoudelijke kern 'inwendige van de Aarde' en 'beweging van aardplaten'.

Inwendige van de aarde – Om de opbouw van de Aarde te beschrijven, worden twee indelingen gebruikt. Bij de eerste indeling – aardkorst, aardmantel, buitenkern en binnenkern – gaat het om de chemische samenstelling. De *buiten- en binnenkern* bestaan voornamelijk uit ijzer en nikkel en vormen een bol met een straal van 3500 km. De *mantel* is een bolschil van 2900 km dikte. Hij bestaat uit mineralen die voor meer dan 90% bestaan uit zuurstof, ijzer, silicium en magnesium, zoals olivijn $(Mg,Fe)_2SiO_4$. De *aardkorst* is relatief dun. De continentale korst is gemiddeld 35 km dik en bestaat uit graniet en sedimenten. De oceanische korst is gemiddeld slechts 7 km dik en bestaat uit basalt.

De tweede indeling is gebaseerd op de fysische eigenschappen die van belang zijn voor de platen tektoniek. De lithosfeer bestaat uit stijf en relatief koud materiaal dat in grote brokken is gebroken: de tektonische platen. De lithosfeer omvat de aardkorst, samen met de buitenste laag van de mantel en reikt tot 80 à 100 km diepte. Door hun vaste karakter bewegen de tektonische platen als een geheel en bevatten ze hier en daar scheuren.

Onder de platen zijn de temperatuur en de druk hoog genoeg voor een viskeuze stroming ('creep') van het vaste mantelmateriaal. Het deel van de mantel waarop de lithosfeer rust, wordt de asthenosfeer genoemd. Het mantelmateriaal aldaar stroomt horizontaal en sleept de bovenliggende tektonische plaat mee. Aan de ene rand van een plaat welt het materiaal op. Daar groeit de plaat aan (onder andere bij de midoceanische ruggen). Aan de andere kant zinkt (relatief koud) materiaal in de diepte weg (subductiegebied). De plaatrand stijgt daar in temperatuur en gaat deel uitmaken van de asthenosfeer.

Behalve de vloeibare buitenkern bestaat vrijwel de hele Aarde uit vast materiaal. Overgangen, bijvoorbeeld van de korst naar de mantel, worden gemarkeerd door breking en terugkaatsing van seismische golven. Die breking en terugkaatsing worden veroorzaakt door vrij plotselinge verschillen in dichtheid van de gesteenten. Zulke grenslagen zijn ontstaan door scheiding van zwaardere en lichtere bestanddelen bij het ontstaan van de Aarde. Maar ook kan een mineraal op zekere diepte door de hoge druk en temperatuur overgaan naar een meer compacte kristalstructuur en zo een grotere dichtheid krijgen. Een voorbeeld daarvan is het mineraal olivijn dat op zo'n 660 km diepte van de spinelstructuur overgaat naar de perovskietstructuur.



Figuur 8 – De opbouw van de Aarde. De korst en de buitenmantel vormen samen de lithosfeer, die in tektonische platen is opgedeeld. (Bron: Van Buuren et al, 2012)

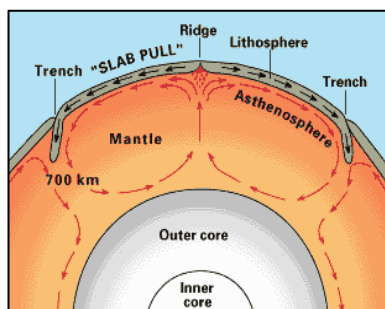
Leerlingdenkbeelden

Uit het gegeven dat in vulkanen vloeibaar gesteente uit de ondergrond naar boven komt, kan zich het denkbeeld vormen dat de Aarde vanaf een zekere diepte vloeibaar is. Convectiestromen kunnen dan opgevat worden als een soort circulerende magmastromen in de aardmantel.

De relatieve dikte van de aardkorst wordt wel overschat. Samenhangend daarmee komt het denkbeeld voor dat de tektonische platen niet dieper reiken dan de aardkorst.

Figuur 9 – Denkbeelden over de structuur van de Aarde.

Beweging van aardplaten – Overall in de Aarde vindt warmteproductie plaats door radioactief verval van langlevende radioactieve isotopen. In volgorde van hun huidige bijdrage aan het warmtevermogen zijn dat thorium-232, uraan-238, kalium-40 en uraan-235. Aan het aardoppervlak wordt warmtevermogen afgegeven: verdeeld over het gehele aardoppervlak is dat $44 \cdot 10^{12}$ W, op land komt dat neer op $7,0 \cdot 10^{-3}$ W/m². Er is dus een constante warmtestroom van binnen naar buiten. De aardkern heeft de hoogste temperatuur. Van daar stroomt warmte naar de aardmantel. Er bestaat een groot temperatuurverschil tussen de onder- en bovenkant van de mantel. Daardoor, en door de lage viscositeit van het mantelmateriaal, is er sprake van materiaalstroming ('kruipen'), op sommige plaatsen horizontaal, op andere verticaal. Er heeft zich een convectiestroom in de aardmantel ingesteld: een langzame (enkele cm/jaar) circulaire stroming in de (vaste, maar viskeuze) aardmantel. Er zijn plaatsen waar het mantelmateriaal omhoog welt (bij de mid-oceanische ruggen) en plaatsen waar het afgekoelde materiaal terugzakt (bij de diepzee-troggen): zie figuur 10. Zonder deze convectie zou de geproduceerde warmte alleen door geleiding naar het aardoppervlak afgevoerd kunnen worden. Omdat de (geleidings)warmteverstand van gesteente groot is,



Figuur 10 – Schematische tekening van de Aarde met convectiestromen in de mantel. (Bron: <http://pubs.usgs.gov>)

leidt een model van de Aarde waarin de warmtestroom beperkt is tot geleiding tot onwaarschijnlijk hoge temperaturen in de aardkern. Convectiestromen (en dus warmtetransport door stroming) veroorzaken een aanzienlijke daling van de warmteweerstand. Modellen die daarmee rekening houden, voorspellen een veel reëlere, lagere temperatuur voor de aardkern. Bij de grensovergangen van de buitenkern naar de mantel en van asthenosfeer naar de lithosfeer vindt geen convectie plaats, waardoor temperatuur daar sprongsgewijs afneemt.

De horizontale stroming in de asthenosfeer is de oorzaak van de beweging van de daarboven in de lithosfeer gelegen tektonische platen. De lithosfeer bestaat uit negen grote en ongeveer twintig kleine aardplaten, die ten opzichte van elkaar bewegen. Er zijn drie soorten beweging (zie figuur 11):

- Van elkaar af – Een *divergente* beweging die plaats vindt waar materiaal uit de diepe mantel omhoog welt: bij de mid-oceanische ruggen en bij continentale slenken, zoals de Rift Valley in Afrika.
- Naar elkaar toe – Een *convergente* beweging die plaats vindt waar de ene plaat onder de andere schuift (subductie): een diepzeetrog ter plaatse van de onderduikende plaat en een hooggebergte waar de andere plaat wordt ‘opgetild’.
- Schuivend langs elkaar – Deze *transforme* beweging vinden we onder andere bij de San Andreasbreuk in Californië.

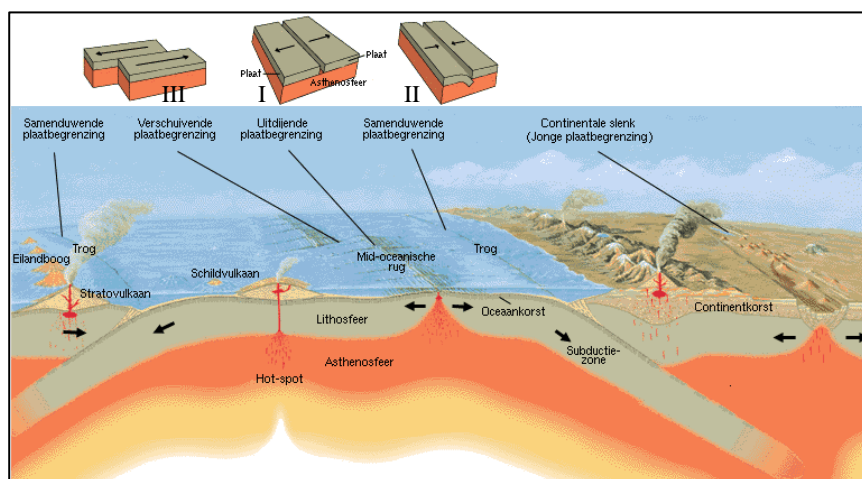
Plaattektoniek

Meer informatie is te vinden in de NLT-module *De Bewegende Aarde*, hoofdstuk 2: Plaattektoniek.

Warmteproductie in de Aarde

In een verrijkende opdracht [Warmteproductie in de Aarde](#) voor 5/6 vwo rekenen de leerlingen na waarom ‘historische’ verklaringen voor de warmteproductie in de Aarde, zoals afkoeling van de Aarde of het verbranden van steenkool in de Aarde, niet juist zijn en waarom radioactief verval wel tot een adequate verklaring leidt.

Figuur 12 – Een leerlingopdracht over historische hypothesen rond de oorsprong van de warmteproductie in de Aarde.



Figuur 11 – Dwarsdoorsnede van de Aarde die de divergente (I), convergente (II) en transforme (III) beweging van de aardplaten laat zien. (Bron: www.usgs.com)

Leerlingdenkbeelden

De website [TeachTheEarth](#) geeft een overzicht van ‘misconceptions’ over onder andere platentektoniek, zoals de misvatting dat alleen de continenten bewegen en het oceanische deel van de platen niet.

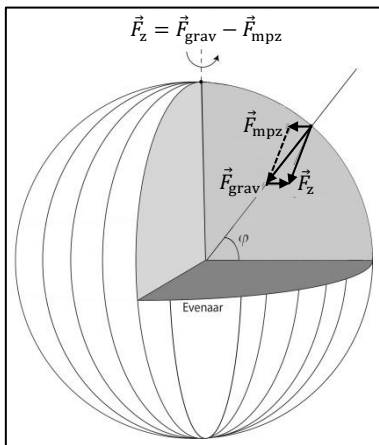
In het verlengde van het denkbeeld ‘het inwendige van de Aarde is vloeibaar’ kan zich het idee vormen dat de continenten (of de tektonische platen) drijven op een soort oceaan van vloeibaar mantelmateriaal.

Leerlingen die zich weinig kunnen voorstellen bij het kruipen van een vaste stof kunnen het denkbeeld vormen dat het mantelmateriaal ‘half vloeibaar, half vast’ is.

Figuur 13 – Denkbeelden over platentektoniek.

Zwaartekrachtmetingen – De valversnelling varieert enigszins van plaats tot plaats op Aarde. Om de oorzaken van deze variaties aan te geven kan het verhelderend zijn een onderscheid te maken tussen de gravitatiekracht en de zwaartekracht (Van der Valk, 2017). De (theoretische) gravitatiekracht wordt met behulp van de gravitatieformule van Newton berekend. De direct te meten zwaartekracht is een samenspel van de gravitatiekracht en de centripetale kracht die nodig is om een voorwerp om de as van de Aarde te laten draaien. De valversnelling volgt uit de zwaartekracht: $F_z = m \cdot g$ en is direct te meten. De variaties in g van plaats tot plaats op Aarde worden veroorzaakt door variaties in de centripetale versnelling en in de gravitatieversnelling.

We onderscheiden *globale* en *lokale* variaties in de valversnelling. Globale



Figuur 14 – Het (overdreven) verschil in richting en grootte tussen de zwaartekracht en de gravitatiekracht.

variaties hangen af van de breedtegraad. Er zijn twee globale variaties. De *centripetale versnelling* hangt af van de breedtegraad omdat de straal van de cirkelbeweging die een voorwerp doorloopt, daarvan afhangt: hoe dichterbij de noord- of de zuidpool, hoe kleiner de straal van de cirkelbaan. En dus: hoe kleiner de centripetale versnelling. Omdat die van de gravitatieversnelling afgetrokken moet worden, is de resulterende valversnelling groter naarmate je dichterbij een van de polen komt. Omdat de centripetale versnelling niet naar het zwaartepunt van de Aarde maar loodrecht op de aardas is gericht, is ook de richting van de valversnelling enigszins afhankelijk van de breedtegraad (zie figuur 14). De tweede oorzaak waardoor het gravitatiedeel van de valversnelling op de polen groter is dan op de evenaar is de globale vorm van de Aarde: geen perfecte bol, maar afgeplat aan de polen. Een kleinere aardstraal bij de polen leidt volgens de gravitatiewet van Newton tot een grotere gravitatiekracht.

De *lokale variaties* in de valversnelling worden veroorzaakt door een ongelijke verdeling van de massa over de Aarde vanwege hoogte- en dichtheidsverschillen. Ze kunnen veel vertellen over het inwendige van de Aarde, met name van de aardkorst. Dat vergt precisieingen, want deze variaties zijn veel kleiner dan de globale variaties. De grotere afstand op een berg tot het zwaartepunt van de Aarde kan ervoor zorgen dat de valversnelling op een berg kleiner is dan een stukje verder, op zeeniveau. Anderzijds draagt de grote massa van de berg ertoe bij dat de valversnelling op een berg juist wat groter kan zijn dan op zeeniveau. Dan zijn er nog variaties in de dichtheid van de ondergrond. Aan de trog-zijde van een subductiezone schuift relatief licht afzettingsgesteente de diepte in. Samen met de aanwezigheid van diep water aldaar geeft dat een kleinere valversnelling. Aan de andere kant van de subductiezone, waar zich de bergen en vulkanen bevinden, wordt materiaal opgestuwd boven een relatief zware oceanische plaat. Daar is de valversnelling vergroot. Ook boven de Mid-Atlantische rug, waar zwaar mantelmateriaal naar boven komt, is de valversnelling vergroot. In Nederland is de valversnelling in Oost Brabant wat kleiner dan elders in het land door de aanwezigheid van dikke steenzoutlagen met relatief kleine dichtheid.

Aardmagnetisme – Het aardmagnetisme wordt veroorzaakt door convectiestromen in de buitenkern. Deze onderscheiden zich van de convectiestromen in de mantel doordat het stroming van vloeibaar materiaal betreft: gesmolten ijzer en nikkel. Bovendien is dat elektrisch geleidend, terwijl het mantelmateriaal een isolator is.

De temperatuur van de buitenkern is zo hoog dat het ijzer en nikkel geïoniseerd zijn. De convectiestromen met deze ionen zijn, elektrisch gezien, kringstromen en leiden dus tot een magnetisch veld. Dit veld wordt versterkt door extra wervelingen die optreden door de Corioliskracht op de convectiestromen. Deze corioliskracht zorgt er ook voor dat de polen van het aardmagnetisch veld altijd in de buurt van de geografische polen liggen.

De zuidpool van het aardmagnetisch veld ligt nu vlak bij de geografische noordpool van de aarde en verschuift elkaar jaar een beetje. De in heet, viskeus gesteente aanwezige magnetische materialen richten zich in het aardmagnetisch veld. Koelt dat gesteente af, dan wordt de richting van het magnetisch veld in het gesteente vastgelegd. Dat gebeurt bijvoorbeeld in de buurt van de midoceanische ruggen. Uit de aldaar vastgelegde gesteenten leidt men af dat het aardmagnetisch veld in de loop van miljoenen jaren regelmatig is omgepoold.

Declinatie en inclinatie

Magnetische declinatie is de hoek waarmee de (horizontale component van) de magnetische veldlijn afwijkt van de richting van de geografische noordpool. Bij magnetische inclinatie gaat het om de hoek die de veldlijn maakt met de raaklijn aan het aardoppervlak.

Figuur 15 – Magnetische declinatie en inclinatie.

Leerlingdenkbeelden

Rond het aardmagnetisme bestaan bij (jonge) leerlingen verschillende onjuiste denkbeelden. Het meest voor de hand liggende denkbeeld is dat de geografische noordpool ook de magnetische noordpool is. Verder kunnen de leerlingen uit de stand van een (gebruikelijke, horizontaal opgestelde) kompasnaald concluderen dat de magnetische veldlijnen horizontaal zijn gericht.

Leerlingen denken wel dat er midden in de Aarde een permanente magneet zit, vergelijkbaar met een ijzeren staafmagneet.

Men veronderstelt wel dat het omklappen van de polariteit van het aardmagnetisch veld gepaard zal gaan met een wereldwijde ramp (bijvoorbeeld aardbevingen, vulkaanuitbarstingen). Dergelijke rampen zijn dan echter niet te verwachten.

Bij het gebruik van een kompas worden de magnetische invloeden uit de directe omgeving vaak vergeten, bijvoorbeeld de nabije aanwezigheid van ijzer. Door geïnduceerd magnetisme kan de richting van de kompasnaald aanzienlijk afwijken van het noorden. Er bestaan fietsbellen met een ingebouwd kompas. Die zijn wellicht bruikbaar bij een aluminium frame, niet bij een fiets met een ijzeren frame.

Figuur 16 – Denkbeelden over aardmagnetisme.

Vulkanen – Vulkanisme kan ontstaan op een mid-oceanische rug, op plaatsen in de aardkorst waar een ‘hot spot’ is en in een subductiegebied.

Op een mid-oceanische rug welt heet materiaal uit de mantel op. Daardoor is de druk daar plaatselijk verlaagd, waardoor mantelmateriaal kan smelten en een magmahaard ontstaat. Dit is bijvoorbeeld het geval bij de vulkanen op IJsland. De lava die deze vulkanen uitspuwen is basaltrijk en weinig viskeus, waardoor de lava relatief ver wegstroomt. De hellingshoek blijft daardoor klein. Zulke vulkanen heten schildvulkanen.

Er zijn ook plaatsen ver van randen van een tektonische plaat waar plaatselijk een mantelpluim opstijgt (‘hot spot’). Als deze pluim de aardkorst bereikt, kan door drukverlaging mantelmateriaal smelten. Dan ontstaat er een magmahaard, die na een reeks uitbarstingen een schildvulkaan vormt.

Bij de subductiezones ligt een ander soort vulkanen: stratovulkanen (strato: afwisselend). Dat gesteente bij een subductiezone smelt, is toe te schrijven aan de beweging de diepte in. Met het subducerende mantelmateriaal wordt zeewater de diepte in gevoerd. De vermenging met water leidt tot verlaging van het smeltpunt van het mantelmateriaal, waardoor zich daar een magmahaard kan vormen. Die magma is viskeuzer dan de magma bij de mid-oceanische ruggen. De uitgestoten lava stroomt daardoor minder uit en stolt sneller, met als gevolg een grote hellingshoek. Bovendien is er een grote uitstoot van as, waardoor gestolde lavalagen op de vulkaanhelling wordt afgewisseld met aslagen. Stratovulkanen zoals de Vesuvius staan bekend om hun explosieve uitbarstingen, wat mede door de aanwezigheid van stoom in het magma wordt veroorzaakt.

Leerlingdenkbeelden

De website [Beyond Penguins and Polar Bears](#) geeft een overzicht van ‘misconcepties’ over vulkanen, zoals het idee dat vulkanen alleen op land te vinden zijn of dat elke vulkaan er als een stratovulkaan uitziet, met een krater in het midden.

Men is geneigd de positieve gevolgen van vulkaanuitbarstingen te vergeten. Ze hebben op de korte termijn inderdaad vooral negatieve gevolgen. Een lange-termijneffect is echter de vruchtbaarheid van vulkanische grond. Vulkanisme heeft een grote rol gespeeld in de evolutie van het leven op Aarde.

Figuur 17 – Denkbeelden over vulkanen.

Aardbevingen – De beweging van de aardplaten gaat niet overal geleidelijk. Met name in de subductiezones kunnen schoksgewijze verschuivingen optreden die we als aardbevingen voelen. De daardoor opgewekte schokken planten zich als longitudinale en transversale ruimtegolven voort in de Aarde. Er zijn ook oppervlaktegolven die zich over het aardoppervlak uitbreiden. Bij een aardbeving zorgen die voor de meeste schade.

De golfsnelheid van de longitudinale ruimtegolven is het hoogst, en die golven komen dus als eerste in een meetstation aan. Daarom heten ze primaire (of P-)golven. Daarna volgen de secundaire (S-)golven met een transversaal karakter. En ten slotte volgen de oppervlaktegolven. Omdat de ruimtegolven breking vertonen waar zich verschillen in dichtheid voordoen, is er veel informatie over de samenstelling van de Aarde uit af te leiden. Daartoe moeten de data uit verschillende meetstations gecombineerd worden. Dat de (buiten)kern van de Aarde vloeibaar is, bijvoorbeeld, volgt uit het gegeven dat de transversale S-golven zich niet in vloeistof kunnen voorplanten. Meetstations die zich bij een bepaalde aardbeving in de ‘schaduw’ van de aardkern bevinden, zullen daardoor geen S-golven meten.

Aardbevingen treden op bij subductiezones en zones met een transforme beweging (of een combinatie van beide, zoals in 2004 bij Sumatra, met een grote tsunami als gevolg).

Leerlingdenkbeelden

In gebieden waar veel aardbevingen voorkomen, zoals in Californië, heersen denkbeelden of '[mythen over aardbevingen](#)' zoals: 'Aan het gedrag van dieren kun je zien dat er een aardbeving op komst is' en 'Aardbevingen vinden vooral plaats in de morgen of bij bepaalde weersomstandigheden'. Leerlingen denken ook wel dat aardbevingen allen in warme landen plaatsvinden en dat er in Nederland geen 'natuurlijke' aardbevingen kunnen plaatsvinden.

Als leerlingen zich een zware aardbeving voorstellen, verwachten ze dat er grote kloven in het aardoppervlak ontstaan waarin gebouwen of zelfs hele steden kunnen verdwijnen.

Er is in de VS ongerustheid over het optreden van aardbevingen die (mede) door menselijke activiteiten worden veroorzaakt, bijvoorbeeld door 'fracking' bij het zoeken naar olie. Een voorbeeld van zo'n denkbeeld over deze '[induced earthquakes](#)' is dat er door het onttrekken van gas uit de bodem holten ontstaan die plotseling instorten en zo een aardbeving veroorzaken. Dit soort denkbeelden kan wellicht in Nederland opduiken in discussies over de aardbevingen die door de gaswinning in Groningen optreden.

Aardbevingen worden alleen met negatieve (korte-termijn)effecten in verband gebracht, zoals het beschadigen van huizen. De lange-termijneffecten ervan, zoals gebergtevorming of het opbreken van een continent, zijn niet alleen maar negatief. Het van Afrika 'wegdrijven' van Madagaskar, bijvoorbeeld, heeft geleid tot de bijzondere soortvorming in dat gebied.

Figuur 18 – Denkbeelden over aardbevingen.

2 Weer en klimaat

Voorkennis

In het beginnend natuurkundeonderwijs komen allerlei begrippen aan de orde die een toepassing hebben in het deelthema 'het weer'. Naast algemene begrippen als massa en volume is (lucht)druk daar het duidelijkste voorbeeld van (zie paragraaf 4.2.7 in het *Handboek natuurkundendidactiek*). Leerlingen kunnen met dat begrip moeite hebben: ze vragen zich bijvoorbeeld af waarom de volumes van twee lokalen die worden samengevoegd wel bij elkaar opgeteld moeten worden, maar de 'drukken' niet.

Je merkt niet zoveel van de luchtdruk omdat je er aan gewend bent. Ook dat maakt het tot een lastig begrip. Luchtdrukveranderingen zijn makkelijker waar te nemen. Het is handig daar in de klas enkele voorbeelden van bij de hand te hebben. Een eerste voorbeeld betreft luchtdruk en hoogte. Veel leerlingen zullen weten dat je het aan je oren voelt als je met de auto een diepe tunnel in rijdt of met een lift snel omlaag gaat. Je oren zijn heel gevoelig voor drukverandering. Met een eenvoudige barometer kun je laten zien dat die op de derde verdieping van een gebouw een lagere druk aangeeft dan op de grond. Dat maakt duidelijk dat de luchtdruk afneemt met de hoogte. Daarmee kunnen leerlingen zich voorstellen dat de luchtdruk op grote hoogte bijna nul is. Velen blijken luchtdruk dan te koppelen aan de zwaartekracht: "Als de luchtdruk nul is, is de zwaartekracht ook nul want daar ben je gewichtloos". Een tweede voorbeeld is dat je soms kunt merken dat er slecht weer aan komt: dan ruik je het riool. Door de afname van de luchtdruk zet de lucht in de riolen uit en komt die boven de grond. Als derde voorbeeld kun je de mogelijke ervaring van leerlingen tijdens een vliegreis in herinnering brengen: een plastic flesje water dat ze (half) leeg in het vliegtuig hebben dichtgeschroefd, is flink ingedrukt als ze dat op de grond weer uit hun tas pakken.

Het begrip luchtdruk toepassen op het weer kent ook zo zijn valkuilen. De regel 'lucht stroomt van een plaats met hoge naar een plaats met lage luchtdruk' kun je vanwege de draaiing van de Aarde niet zomaar toepassen op het weer, op gebieden met hoge en lage druk. Die draaiing zorgt ervoor dat de lucht (bij weinig wrijving zoals boven zee) vrijwel evenwijdig aan de isobaren gaat stromen en zo van hoge- naar lagedrukgebied 'wervelt'. Een belangrijk effect daarvan is dat de verschillen in luchtdruk niet in korte tijd verdwijnen en de drukgebieden langdurig kunnen blijven bestaan.

Leerlingen zijn vanuit de leefwereld bekend met het verschijnsel wind. Wind wordt ervaren als iets dat zich in het horizontale vlak afspeelt. Dit wordt versterkt door de televisie- en buienradarbeelden van bewegende regengebieden. Bij

oppervlakkige beschouwing vallen de veranderingen in regengebieden niet zo op. Ook als je naar wolken kijkt, valt hun horizontale beweging het meeste op. Pas bij versnelde beelden van een wolk gaat het opvallen dat de horizontale en de verticale vorm van de wolk vrij snel verandert. Door de genoemde leefwereld-ervaringen hebben leerlingen weinig idee van de essentiële rol van verticale luchtbewegingen bij wolkenvorming, regen en het ontstaan van hoge- en lage-drukgebieden. Immers, als lucht stijgt, verandert er van alles: de druk neemt af waardoor het volume verandert, en de temperatuur daalt waardoor er water kan condenseren en wolken worden gevormd. Het gevolg is een verandering in dichtheid en dus het optreden van op- en neerwaartse krachten. Het is daarom aan te bevelen al in de onderbouw aandacht te geven aan verticale luchtbewegingen, bijvoorbeeld bij het interpreteren van buienradarbeelden.

Begripsopbouw

[volgt te zijner tijd]

Literatuur

- Francek, M. (2013). A compilation and review of over 500 Geoscience misconceptions. *International Journal of Science Education* 35(1), 31-64.
- Groenewold, A. (2012). *Weer en klimaat*. NiNa module NN16. Enschede: SLO.
- JCU (2013). *De bewegende aarde*. Utrecht: Universiteit Utrecht, Junior College Utrecht.
- King, C.J.H. (2010). An analysis of misconceptions in science textbooks: Earth Science in England and Wales. *International Journal of Science Education* 32(5), 565-601.
- Kortland, K. (2017). Geofysica. In: K. Kortland, A. Mooldijk en H. Poorthuis (Red.), *Handboek Natuurkundedidactiek* (pp. 237-238). Amsterdam: Epsilon uitgaven.
- NiNa (2010). *Eindadvies*. Amsterdam: NNV.
- Paus, J. (2012). *Handreiking schoolexamen natuurkunde havo/vwo*. Enschede: SLO.
- Van Buuren, O., K. Köhler & H. Vroon (2012). *Atmosfeer en aarde*. NiNa-module NN17. Enschede: SLO.
- Van der Valk, T. (2017). *Zwaartekracht, gravitatiekracht en gewicht – Een natuurkunde-didactische reflectie*. *NVOX* 42(9), 460-461.
- Van Welie, Th. (1980). *Weerkunde*, NVON keuzegroep. Groningen: Wolters-Noordhoff.