

5.10 Geofysica Achtergrondinformatie

Geofysica / Aarde en klimaat

Ton van der Valk

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).

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, havo 400 slu) aan een keuzedomein moet worden besteed. NiNa heeft voorbeeldlesmateriaal 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 het *Handboek Natuurkundendidactiek* 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 5.9 in het *Handboek natuurkundendidactiek*).

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). Nog meer dan 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 beide 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, bijvoorbeeld 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

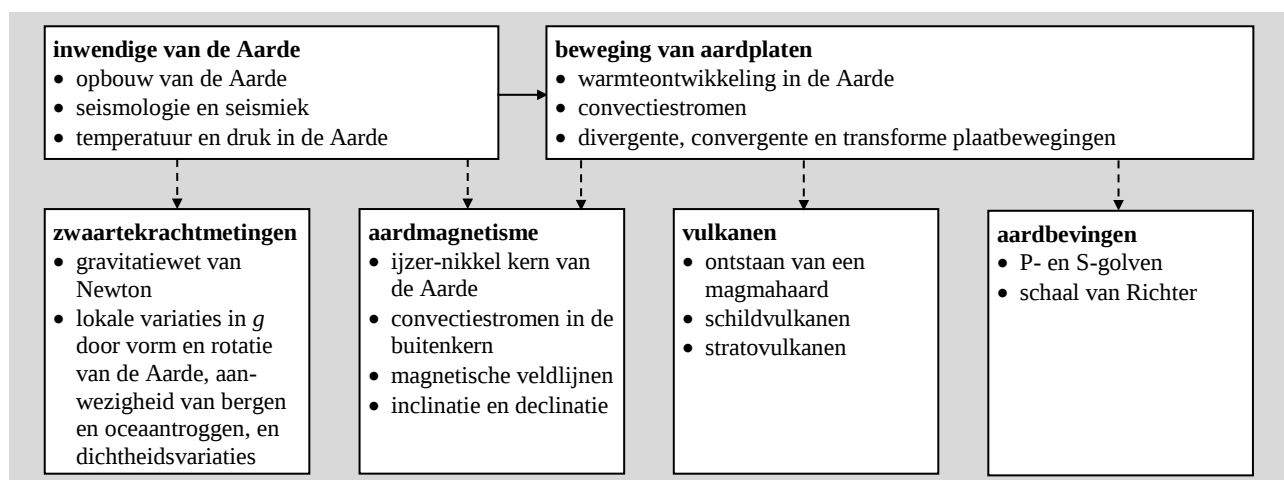
In de onderbouw komt de natuurkunde van de vaste Aarde niet expliciet aan de orde. Basisbegrippen zoals dichtheid, temperatuur, faseovergang, warmte, energie en magnetisme zijn onontbeerlijk als voorkennis bij het deelthema De vaste Aarde.

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.



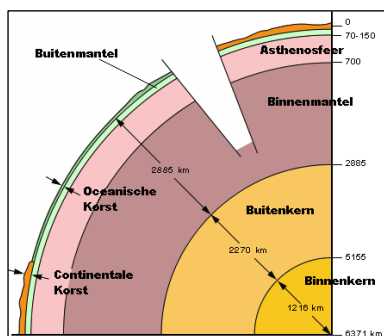
Figuur 7 – Een mogelijke begripsopbouw van het deelthema De vaste Aarde. De gestippelde lijnen geven verdiepmogelijkheden aan bij de inhoudelijke kern 'inwendige van de Aarde' en 'beweging van aardplaten'.

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. Deze indeling is voornamelijk vastgesteld door het analyseren van het gedrag van seismische golven. 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 $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$. 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 van materialen (zoals dichtheid, temperatuur, kristalstructuur) die van belang zijn voor de platen tektoniek. Een belangrijke eigenschap die de leerlingen nog niet kennen is ‘viscositeit’. Wat viscositeit ongeveer inhoudt, is voor vloeistoffen niet zo moeilijk uit te leggen. Dat vaste stoffen ook viskeus kunnen zijn (belangrijk bij ‘de vaste Aarde’), is lastiger. Het voorbeeld van stromend ijs (vaste stof met een kristalstructuur) in een gletsjer kan helpen. 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 150 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 heet materiaal op. Daar groeit de plaat aan (onder andere bij de mid-oceanische 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)

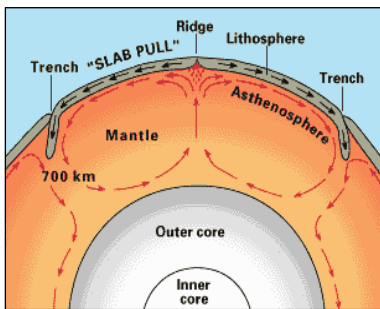
Leerlingdenkbeelden

Uit het gegeven dat in vulkanen gesmolten 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 magma-stromen in de aardmantel (in plaats van viskeuze stroming van vast materiaal).

De relatieve dikte van de aardkorst wordt wel overschat. Samenhangend daarmee komt het denkbeeld voor dat de tektonische platen slechts reiken tot de overgang aardkorst/mantel, terwijl het niet-viskeuze deel van de mantel (de buitenmantel) ook bij de plaat hoort.

Figuur 9 – Denkbeelden over de structuur van de Aarde.

Beweging van aardplaten – Overal 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: over het gehele aardoppervlak is dat $44 \cdot 10^{12}$ W. Het warmtevermogen per vierkante meter komt op land uit op gemiddeld 70 mW/m^2 . Onder de oceanen, met name bij de mid-oceanische ruggen waar het hete mantelmateriaal opwelt, is dat meer, tot wel 180 mW/m^2 . Er is dus een constante warmtestroom van binnen naar buiten. De aardkern heeft de hoogste temperatuur. Van daar stroomt warmte



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

Plaattektoniek

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

Warmteproductie in de Aarde

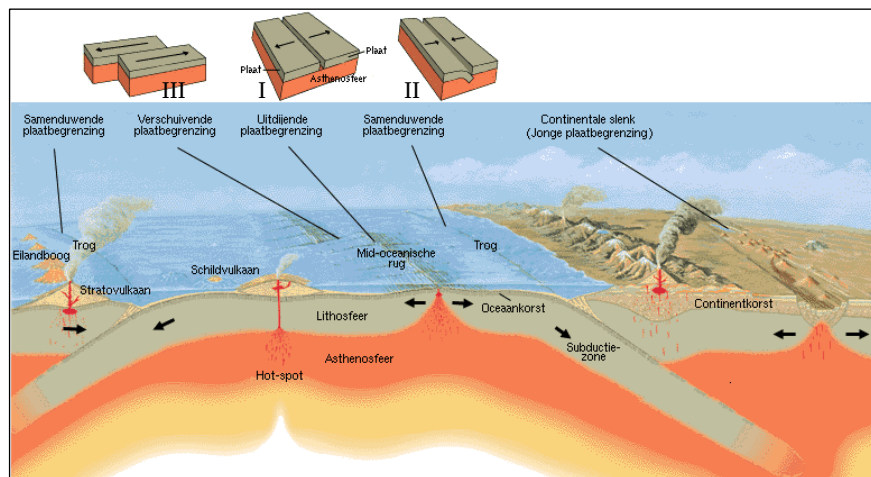
In een verrijkende opdracht [Warmteproductie in de Aarde](#) voor 5/6 vwo rekenen de leerlingen na waarom ‘historische’ verklaringen voor de warmteproductie in de Aarde, zoals afkoeling van de Aarde of het verbranden van steenkool in de Aarde, niet juist zijn en waarom radioactief verval wel tot een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

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

naar de aardmantel. Er bestaat een groot temperatuurverschil tussen de onder- en bovenkant van de mantel. Daardoor, en door de relatief 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 diepzeetroggen): zie figuur 10. Zonder deze convectie zou de geproduceerde warmte alleen door geleiding naar het aardoppervlak afgevoerd kunnen worden. Omdat de (geleidings)warmteweerstand van gesteente groot is, 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.



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 ‘misconcepties’ 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.

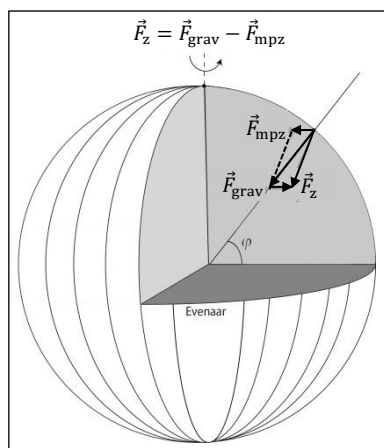
We onderscheiden *globale* en *lokale* variaties in de valversnelling. Globale variaties hangen af van de breedtegraad. Er zijn twee globale variaties. De *centripetale versnelling* hangt af van de breedtegraad omdat de straal van de cirkelbeweging die een voorwerp doorloopt, daarvan afhangt: hoe dichter bij 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 dichter bij 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 precisie metingen, 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 mid-oceanische ruggen. Uit de aldaar vastgelegde gesteenten leidt men af dat het aardmagnetisch veld in de loop van miljoenen jaren regelmatig is omgepoold.



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

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 (stratovolcanen). 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.

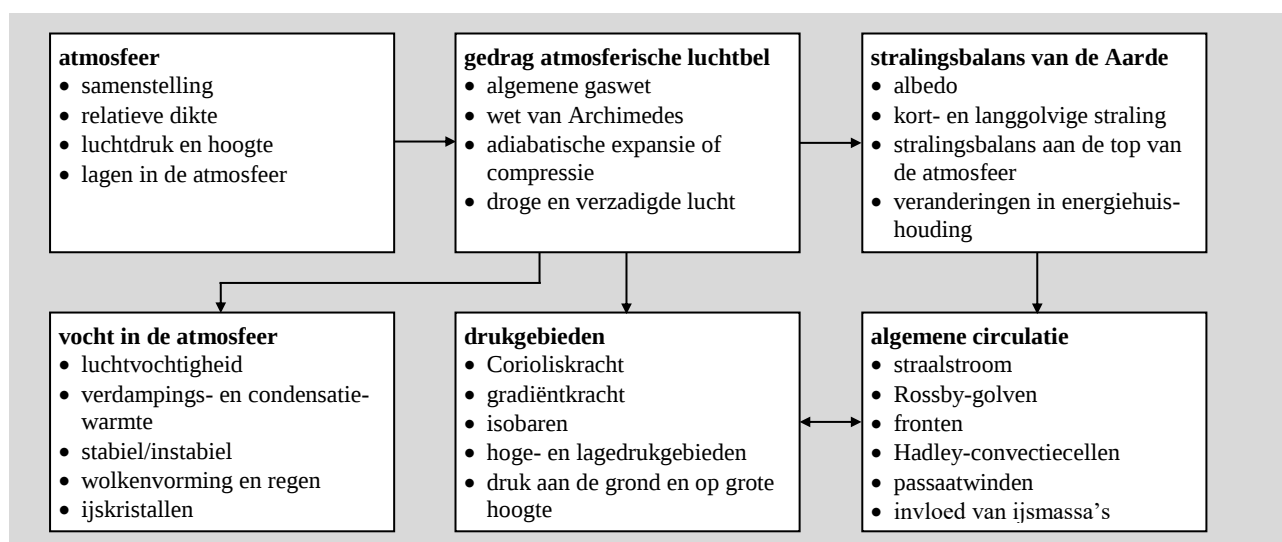
Je merkt niet zoveel van de luchtdruk omdat je er aan gewend bent. Ook dat maakt het tot een lastig begrip. Luchtdrukveranderingen zijn makkelijker waar te nemen. Het is handig daar in de klas enkele voorbeelden van bij de hand te hebben. Een eerste voorbeeld betreft luchtdruk en hoogte. Veel leerlingen 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 lagedrukgebieden. 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

De inhoudelijke kern van het deelthema Weer en klimaat omvat globaal drie onderwerpen: de atmosfeer, het gedrag van een atmosferische luchtbel en de stralingsbalans van de Aarde. Onderwerpen die vervolgens uitgediept kunnen worden zijn vocht in de atmosfeer, drukgebieden en de algemene circulatie. Het schema van figuur 19 geeft een mogelijke begripsopbouw.



Figuur 19 – Een mogelijke begripsopbouw van het deelthema Weer en klimaat.

Atmosfeer – Voor een goed begrip van weer en klimaat moeten leerlingen een globaal beeld hebben van de opbouw (troposfeer, stratosfeer, mesosfeer en thermosfeer) en samenstelling van de atmosfeer (stikstof, zuurstof en waterdamp). Een gedetailleerder beeld van de samenstelling van lucht is ten eerste van belang voor de energiehuishouding in de atmosfeer vanwege de aanwezigheid van koolstofdioxide, methaan en andere ‘broeikasgassen’ die de uitstraling van infraroodstraling naar de ruimte beïnvloeden (en daarmee het klimaat op Aarde). Daarnaast spelen wolken en aerosolen een rol in de energiehuishouding. Ten tweede is de aanwezigheid van ozon in de hogere lagen van de atmosfeer van belang omdat dat de instraling van ultravioletstraling op het aardoppervlak

beperkt, waardoor onder andere de kans op huidkanker wordt verminderd.

Het molecuulmodel is meestal niet vereist om luchtbewegingen, condensatie en verdamping in de atmosfeer te beschrijven. Lucht kan worden opgevat als continue materie en, als het om droge lucht gaat, als een ideaal gas. Maar als het gaat om chemische reacties in de atmosfeer, de interactie tussen lucht en (energierijke) straling en verdamping/condensatie aan het oppervlak van heel kleine druppels is het molecuulmodel wél nodig.

De oude eenheid *atmosfeer* wordt nog wel gebruikt als grove maat voor de grootte druk. Bijvoorbeeld: de luchtdruk op zeeniveau is 1 atmosfeer, de druk van een waterkolom van 10 m hoogte. De atmosfeer is geen SI-eenheid. Dat is de pascal ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$). In weerberichten werd vroeger de millibar (mbar) gebruikt, afgeleid van de bar (10^5 Pa). Ook de (milli)bar is geen SI-eenheid. Tegenwoordig wordt de hectopascal gebruikt, die overeenkomt met de millibar ($1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$). Een druk van 1 atmosfeer komt overeen met 1013 hPa. Om een indruk te geven van de kolom lucht die zich boven 1 m^2 aardoppervlak bevindt, is met behulp van $F_z = m \cdot g$ te schatten dat zich in die kolom 10^4 kg lucht moet bevinden. Als de dichtheid van lucht overal $1,3 \text{ kg/m}^3$ (de dichtheid aan het aardoppervlak) zou zijn, levert dat een kolomhoogte van 7,7 km.

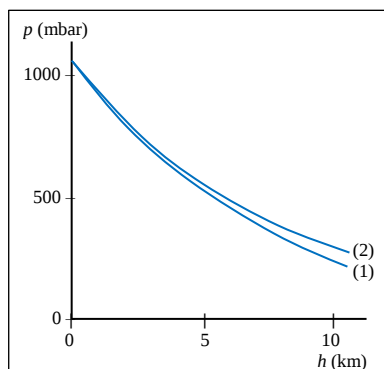
Met een eenvoudig beeld van gestapelde laagjes lucht is het voor leerlingen begrijpelijk te maken dat de luchtdruk afneemt met de hoogte. Voor een kwantitatief beeld is kennis van de algemene gaswet noodzakelijk. Daarmee kan de hydrostatische grondvergelijking afgeleid worden. Die beschrijft de verandering van de luchtdruk p met de hoogte h (met T de absolute temperatuur van de lucht):

$$\frac{\Delta p}{\Delta h} \sim - \frac{p}{T}$$

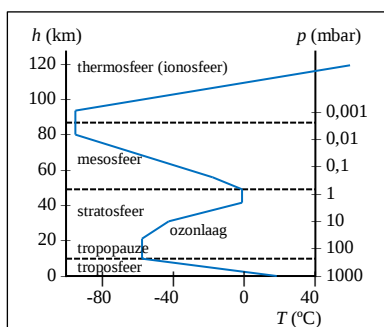
Het min-teken geeft aan dat de druk met de hoogte afneemt. Let op: in sommige lesmethodes wordt het min-teken weggelaten en verstopt in de term ‘druk daling’. Als de temperatuur constant verondersteld wordt, kan de hydrostatische grondvergelijking als een differentiaalvergelijking geschreven worden. Die heeft een negatieve e-macht als oplossing en geeft een eerste benadering van de luchtdruk als functie van de hoogte zoals kromme 2 in figuur 20. Als de verandering van de temperatuur met de hoogte wordt meegenomen, is de differentiaalvergelijking slechts numeriek op te lossen – want de grootte T is dan geen constante meer, maar een variabele die van de hoogte h afhangt. Op 10 km hoogte is de temperatuur bijvoorbeeld -50°C , veel lager dan op zeeniveau. Daardoor is de druk daar ook lager. De temperatuur op een bepaalde hoogte verschilt bovendien van plaats tot plaats op Aarde. In figuur 20 geeft kromme 1 de luchtdruk als functie van de hoogte voor een ‘standaardatmosfeer’.

De dikte van de atmosfeer (zo’n 100 km) is klein ten opzichte van de straal van de Aarde (6400 km). Het weer speelt zich voornamelijk af in de onderste laag van 10 tot 15 km, de troposfeer. Kennis van lagen erboven – de stratosfeer (met daarin de ozonlaag), mesosfeer en thermosfeer – is van belang voor de energiehuishouding. De verschillende lagen onderscheiden zich van elkaar door de verandering van de temperatuur met de hoogte. In de troposfeer daalt de temperatuur met de hoogte (afgezien van de aanwezigheid van inversielagen), in de stratosfeer stijgt die, om weer te dalen in de mesosfeer en te stijgen in de thermosfeer. In de grenslagen (tropopauze, stratopauze en mesopauze) blijft de temperatuur ongeveer constant bij toenemende hoogte.

Gedrag atmosferische luchtbel – Voor veel processen die zich in de lucht afspelen, kan het gedrag van een *luchtbel* beschouwd worden. Daarbij maakt de grootte van de luchtbel niet uit. Van belang is dat de lucht in de bel nauwelijks mengt met lucht uit de omgeving en zich dus als een geheel beweegt (opstijgt of daalt). De luchtbel heeft dan geen warmte-uitwisseling met de omgeving (adiabatisch). Een voorbeeld daarvan is een opstijgende luchtbel boven een door de zon beschenen zandvlakte in een bosgebied. De lucht boven het zand wordt meer opgewarmd dan de lucht boven het bos. Zo vormt zich een warme luchtbel die uitzet door de temperatuurverhoging. Door het verschil in dichtheid met de omgeving gaat de luchtbel stijgen. Er ontstaat *thermie*, een opstijgende lucht-



Figuur 20 – De luchtdruk p als functie van de hoogte h . (Bron: Van Welie, 1980)



Figuur 21 – Het verloop van de luchtdruk p en de temperatuur T met de hoogte h in de atmosfeer. (Bron: Van der Hage & Wessels, 1980)

stroom waarvan vogels en zweefvliegtuigen gebruik kunnen maken om te blijven zweven. Rond de opstijgende luchtstroom ontstaat een dalende luchtstroom, die het wegstromen van lucht aan de grond door de stijgstroom compenseert.

Om het gedrag van een stijgende luchtbel te kunnen begrijpen, moeten leerlingen weten dat adiabatiscie expansie van lucht leidt tot temperatuurdaling. Bij expansie wordt er arbeid verricht door de kracht die de luchtbel door zijn druk op de omgeving uitoefent. Daarvoor is energie nodig, die uit de expanderende lucht zelf moet komen. Die energie komt uit een daling van de temperatuur van de lucht.

De uitzetting van *droge* lucht wordt beschreven door de algemene gaswet, waarbij de lucht als ideaal gas kan worden opgevat:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

De druk p van de opstijgende luchtbel is steeds dezelfde als die van de omgevende lucht. De opwaartse kracht op de luchtbel wordt beschreven door de wet van Archimedes:

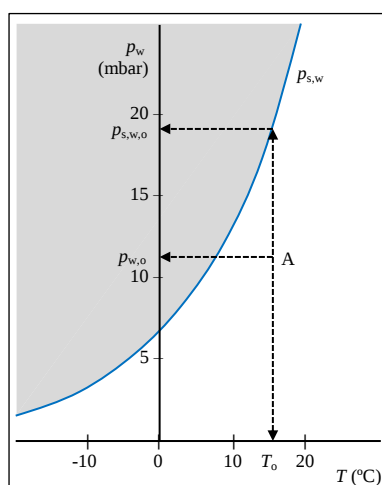
$$F_{\text{opw}} = g \cdot V \cdot (\rho_{\text{bel}} - \rho_{\text{omg}})$$

Bij het stijgen daalt de druk van de luchtbel gelijk op met die van de omringende lucht, waardoor de bel verder uitzet. Dat gebeurt adiabatiscie, en dus daalt de temperatuur van de bel. Afgeleid kan worden dat $dT/dh = -g/c_v$ (met T de absolute temperatuur, h de hoogte, g de valversnelling en c_v de soortelijke warmte van lucht bij constant volume). Invullen van de waarden van g en c_v geeft 0,01 K/m: een temperatuurdaling van 1 °C in de luchtbel als die 100 m stijgt. Die temperatuurdaling is dus onafhankelijk van variabelen zoals de hoogte waarop de bel zich aanvankelijk bevindt. De enige voorwaarde is dat de lucht zich als een ideaal gas gedraagt – dus als de lucht verzadigd is, klopt dat niet meer. Ook in de omringende lucht daalt de temperatuur (meestal) met de hoogte, afhankelijk van de temperatuuropbouw (het *temperatuurprofiel*) van de lucht ter plaatse. Zolang de temperatuur van de luchtbel hoger is dan die van de omringende lucht, blijft de bel doorstijgen. We noemen de lucht dan instabiel. In *instabiele lucht* is de temperatuur buiten een stijgende luchtbel tot op grote hoogte lager dan in de bel. De luchtbel kan dan blijven doorstijgen, zoals in een onweersbui het geval is. Neemt de temperatuur van de omringende lucht minder af dan in de opstijgende luchtbel, dan is de opbouw van de luchtkolom stabiel en kunnen luchtballen niet steeds verder stijgen. Een luchtbel zal dan, nadat deze een zetje omhoog heeft gekregen, weer terugkeren naar zijn beginpositie. Als de lucht al dicht bij het aardoppervlak stabiel is, zijn er dus nauwelijks verticale luchtbewegingen. Verontreinigde lucht blijft dan bij het aardoppervlak hangen en kan veel overlast geven door het optreden van smogvorming.

Verzadigde lucht

Je zou als tegenstelling van droge lucht *natte* lucht verwachten. Maar *nat* suggereert de aanwezigheid van waterdruppeltjes. Beschouwingen over lucht gaan over het gedrag van waterdamp. De term verzadigde lucht (strikt genomen is niet de lucht maar de waterdamp in de lucht verzadigd) is dus beter.

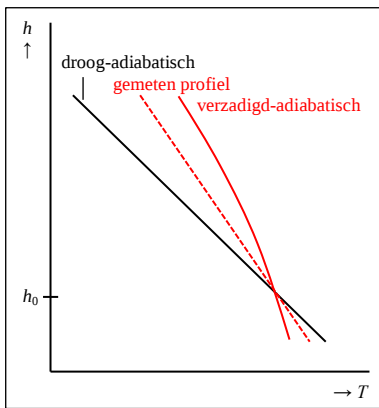
Figuur 22 – Waterdamp in de lucht.



Figuur 23 – De verzadigde dampdruk $p_{s,w}$ als functie van de temperatuur T . (Bron: Van der Hage & Wessels, 1980)

Vocht in de atmosfeer – Het is belangrijk een duidelijk onderscheid te maken tussen droge of onverzadigde lucht en verzadigde lucht. In het bovenstaande zijn we uitgegaan van *droge lucht*. Lucht kan waterdamp bevatten, maar zolang de lucht onverzadigd is spreken we van droge lucht, zoals het geval is in punt A van figuur 23. Als de temperatuur voldoende wordt verlaagd (horizontale lijn vanuit A naar links in figuur 23), wordt de relatieve vochtigheid 100% (bij de temperatuur waar de horizontale lijn de kromme snijdt: het *dauwpunt*) en kan condensatie optreden. Dan gaat de droge lucht over in *verzadigde lucht* en krijgt de waterdamp grote invloed op het gedrag van een opstijgende luchtbel. Om dat te kunnen begrijpen moeten leerlingen het begrip relatieve vochtigheid kennen en weten wat condensatiewarmte is. De relatieve vochtigheid van lucht die door punt A in figuur 23 wordt aangegeven is $p_{w,o}/p_{s,w,o} \cdot 100\%$.

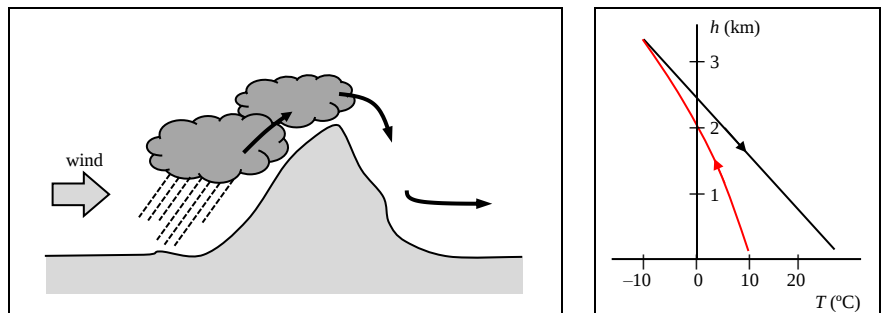
In stijgende verzadigde lucht daalt de temperatuur, waardoor de lucht oververzadigd wordt. De waterdamp condenseert tot kleine waterdruppeltjes. Door de vrijkomende condensatiewarmte daalt de temperatuur van opstijgende verzadigde lucht minder dan die van droge lucht. Omdat de maximale dampspanning sterk afhankelijk is van de temperatuur, neemt de hoeveelheid water die per graad temperatuurdaling condenseert, en daarmee de vrijkomende condensatiewarmte, af met de temperatuur. De temperatuurdaling per 100 m stijging is in verzadigde lucht dus afhankelijk van de temperatuur. In een h,T -diagram is de ‘droog-adiabaat’ een dalende rechte lijn, en is de ‘verzadigd-adiabaat’ een



Figuur 24 – Als het temperatuurprofiel van de omringende lucht (het ‘gemeten profiel’) ligt tussen droog-adiabatisch en verzadigd-adiabatisch, is de lucht stabiel als die droog is, maar instabiel als die verzadigd is. (Bron: Ottevanger, 1987)

kromme (zie figuur 24). Door zijn kleinere temperatuurdaling per 100 m zal verzadigde lucht hoger stijgen dan droge lucht (bij dezelfde temperatuuroopbouw). Het kan dus zijn dat droge lucht bij een bepaald temperatuurprofiel stabiel is, maar verzadigde lucht instabiel.

De grote invloed van het verschil tussen de droog-adiabaat en de verzadigd-adiabaat kan geïllustreerd worden aan de hand van het optreden van de föhn in het Alpengebied. Als zich in een dalende luchtbel waterdruppeltjes bevinden, verdampen die gedeeltelijk omdat de temperatuur door adiabatische compressie stijgt. De temperatuurstijging per 100 m daling is gelijk aan de verzadigd-adiabatische temperatuurdaling, bijvoorbeeld 0,65 °C per 100 m stijging. Dat gaat door tot alle druppeltjes verdampt zijn. Bij verdere daling wordt de lucht onverzadigd en zet zich dus een temperatuurstijging in volgens de droog-adiabaat: 1 °C per 100 m daling. In de bergen kan het voorkomen dat vochtige lucht aan de ene kant van een bergketen omhoog wordt gedreven, waarbij de lucht wegens oververzadiging uitregent. De temperatuur daalt dan volgens de verzadigd-adiabaat. Maar aan de andere kant van de bergketen daalt de lucht weer en stijgt de temperatuur droog-adiabatisch: 1 °C per 100 m. Daardoor is de temperatuur van de lucht bij daling hoger dan bij de voorafgaande stijging op dezelfde hoogte. De dalende luchtstroom wordt *föhn* genoemd.



Figuur 25 – Het ontstaan van de föhn: omhoog de verzadigd-adiabaat (rood) en omlaag de droog-adiabaat (zwart). (Bron: Ottevanger, 1987)



Figuur 26 – Regen die tijdens het vallen verdampt. Dit verschijnsel heet *virga*. (Bron: <https://en.wikipedia.org/wiki/Virga>)

Jonge leerlingen kunnen zich afvragen waarom een wolk niet uit de lucht valt. Of, iets verder in hun ontwikkeling: waarom de waterdruppeltjes in een wolk niet vallen. Inderdaad valt elk druppeltje onder invloed van de zwaartekracht, maar de valsnelheid van kleine druppels is verwaarloosbaar klein. De wrijvingskracht F_w die een vallend druppeltje ondervindt wordt namelijk gegeven door de formule van Stokes: $F_w = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$ (met η de viscositeit van lucht, r de straal van de druppel en v de valsnelheid). Bij een zekere valsnelheid is deze kracht gelijk aan de zwaartekracht. Dan valt de druppel met constante snelheid. Uit de gelijkheid van de twee krachten volgt: $v \sim r^2$. Bij waterdruppeltjes met een straal kleiner dan 10^{-2} mm is de valsnelheid zo klein (< 5 cm/s) dat hun verplaatsing nauwelijks verschilt van de snelheid door toevallige lokale luchtverplaatsingen. Je kunt dus zeggen dat die deeltjes blijven zweven. Grotere druppels vallen sneller en kunnen de wolk verlaten. Aan de onderkant van de wolk komen ze in onverzadigde lucht onder de wolk. De grotere druppels komen als regen neer. Maar als de druppels niet te groot zijn en de lucht onder de wolk flink droog is, kunnen ze daarin verdampen. Dat verschijnsel is soms goed te zien en wordt *virga* genoemd.

Een leerling kan zich ook afvragen waar al dat water, dat in een hevige bui naar beneden komt, nu precies vandaan komt. Zit er dan zoveel water in dampvorm in de lucht? Je kunt de leerlingen een schatting laten maken van de hoeveelheid water in de luchtkolom boven 1 m² aardoppervlak. Neem voor de eenvoud aan dat alle lucht in de kolom verzadigd is en overal een temperatuur van 7 °C heeft. De verzadigingsdruk bij die temperatuur is $1,00 \cdot 10^3$ Pa: 1 % van de totale druk. Dus ruwweg is de massa van het water in de kolom ook 1% van de totale massa van de kolom: 1% van 10^4 kg is 100 kg, wat neerkomt op 100 liter water. Als maar de helft daarvan in de loop van een uur naar beneden zou vallen, is dat een enorme bui: 50 mm regenval (elke liter water op 1 m² betekent

1 mm regenval).

Wat maakt nu dat de druppeltjes in een ‘gewone’ wolk niet uitgroeien tot regendruppels en die in een regenwolk wél? In beide wolken zitten zowel grotere als kleinere druppeltjes. Door onderkoeling kunnen druppeltjes tot wel $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ afkoelen voordat zich ijs vormt. Het standaard-regenverhaal zegt dat een grotere druppel tijdens het vallen kleinere druppels invangt en zo aangroeit tot een regendruppel. Zo’n proces zou zich in elke wolk voordoen, niet alleen in een regenwolk. Dat verhaal klopt dus niet. De straal van zwevende waterdruppels is namelijk gemiddeld 0,01 mm. De straal van een normale regendruppel is ongeveer 10^2 keer zo groot: 1 mm. Het volume van de regendruppel is 10^6 keer zo groot. Dat betekent dat er 1 miljoen zwevende druppels nodig zijn voor een regendruppel! Als het invang-proces al plaats vindt, gaat de druppelvorming zo heel traag. Een druppel die toevallig is gegroeid tot een straal van 0,1 mm valt wel, maar heel langzaam. Die vangt dus ook weinig kleine druppels in. De regendruppels in onze regionen ontstaan dan ook op een heel andere manier, namelijk door het Bergeron-proces. Daarin spelen ijsplaatjes die uitgroeien tot sneeuwvlokken een belangrijke rol. De regenvorming begint bij het opstijgen van verzadigde lucht waarin zich druppeltjes bevinden. De temperatuur van de lucht daalt en de druppeltjes erin raken (verder) onderkoeld. Als zo’n druppeltje een mineraal aerosoldeeltje invangt, gaat het werken als een kristallisatiekern voor ijsvorming. Het druppeltje wordt een ijsplaatje. De dampspanning rond ijs is lager dan rond een onderkoeld druppeltje van dezelfde temperatuur (BiNaS tabel 13A). Een ijsplaatje te midden van onderkoelde waterdruppeltjes groeit ten koste van de druppeltjes. Er vindt een waterdamptransport plaats van de druppeltjesomgeving naar het ijskristal. De dampspanning rond de druppeltjes gaat omlaag, waardoor de druppeltjes verder verdampen en damp beschikbaar komt voor verdere ijsaangroei. De sneeuwvlok wordt steeds groter en gaat vallen. Hij vangt ook onderkoelde druppeltjes in die aanvriezen. Hij komt ten slotte in lucht boven het vriespunt, waardoor de sneeuwvlok smelt en overgaat in een regendruppel. In een regenwolk is de temperatuur zo laag en het aantal druppeltjes per kubieke meter zo groot dat het Bergeron-proces tot de vorming van voldoende grote sneeuwvlokken (en lager in de atmosfeer tot regendruppels) leidt. De groei van wolkendruppels verloopt via het Bergeron-proces dus veel efficiënter dan via het ‘invang’-proces.

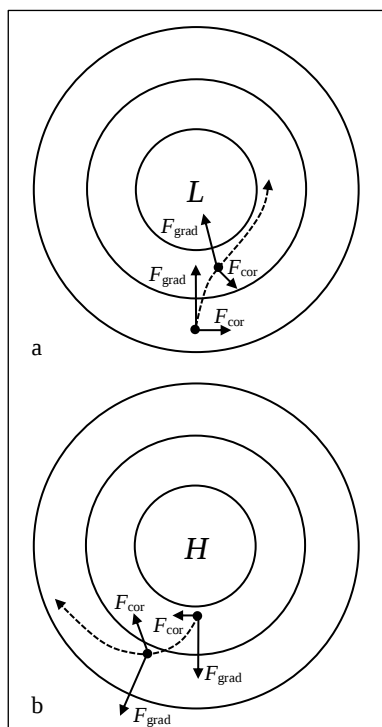
Natuurkunde van de atmosfeer

Meer over het gedrag van water, druppels en ijs in de atmosfeer is te vinden in de boekjes over het oude vwo-keuzeonderwerp *Natuurkunde van de atmosfeer* (Ottevanger, 1987; Van der Hage & Wessels, 1980).

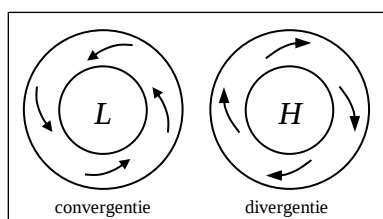
Drukgebieden – Boven gebieden waar veel lucht opstijgt, daalt de luchtdruk bij het aardoppervlak. Zo ontstaan er verschillen in luchtdruk (‘gradiënt’) aan de grond. Dat levert een *gradiëntkracht* op, gericht van de plaats met hoge naar die met lage luchtdruk. Die kracht zorgt ervoor dat de lucht gaat stromen. Een leerling die geen rekening houdt met de draaiing van de Aarde, zal de conclusie trekken dat de lucht in die richting *blijft* stromen. Zo’n leerling realiseert zich niet dat het verschil in luchtdruk zo snel zou verdwijnen. In werkelijkheid kunnen drukverschillen langdurig blijven bestaan omdat de lucht niet rechtstreeks naar de plaats met lage luchtdruk stroomt, maar (boven zee) ongeveer evenwijdig aan de isobaren, zoals op weerkaarten te zien is.

De vraag wat er nu fout (of beter: onvolledig) is aan de bovenstaande redenering kan leerlingen aanzetten om zich in de theorie te verdiepen: de invloed van de draaiing van de Aarde. Om een beweging in een draaiend stelsel te beschrijven (dan doe je alsof er geen draaiing is) heb je de *Corioliskracht* nodig, een *schijnkracht* waarmee je rekening moet houden vanwege de draaiing. Met een oude draaitafel kun je demonstreren dat de Corioliskracht inderdaad een schijnkracht is. Maak er een vel papier op vast, zet de draaitafel aan en laat een leerling er met viltstift een rechte lijn op zetten. Overtuigender is nog als je boven de draaitafel een (niet meedraaiende) rechte lat monteert waarlangs je de lijn trekt. Het draaiende papier ‘ziet’ echter een kromme. Als meedraaiende observator kun je de afwijking van de rechte lijn beschrijven door aan te nemen dat er een kracht loodrecht op de snelheid is: de Corioliskracht.

Door de Corioliskracht wijkt de baan van bewegende lucht op Aarde af van de rechte lijn: naar rechts op het noordelijk halfrond en naar links op het zuidelijk halfrond. De Corioliskracht is maximaal op de polen en nul op de evenaar.



Figuur 27 – De beweging van een hoeveelheid lucht, die aanvankelijk in rust is, bij een lagedrukgebied (a) en een hogedrukgebied (b) op het noordelijk halfrond. In beide gevallen beweegt de lucht uiteindelijk langs de isobaren (als er geen wrijvingskracht is). (Bron: Van Welie, 1980)



Figuur 28 – De windrichting in geval van wrijving: in een lagedrukgebied convergent, in een hogedrukgebied divergent. (Bron: Van Welie, 1980)

Uiteindelijk draait de lucht om een drukgebied heen, tegen de wijzers van de klok in om een lagedrukgebied en met de klok mee om een hogedrukgebied. Leerlingen vinden het vreemd dat lucht die zich volgens Newton rechtlijnig moet bewegen (bijvoorbeeld naar het noorden) ‘vanuit de Aarde gezien eerst naar het noorden stroomt en even later naar het zuiden!’ Zij denken er dan niet aan dat niet alleen de Corioliskracht voor een afbuiging zorgt, maar ook de gradiëntkracht. En die wijzigt ook van richting als het luchtpakketje zich verplaatst in een gebied waarin isobaren krom lopen, zoals in figuur 27.

De dagelijkse ervaring dat de wind evenwijdig aan het aardoppervlak waait is een andere factor die maakt dat het gedrag van lucht op Aarde zo moeilijk te begrijpen is. Leerlingen hebben de neiging om verticale luchtbewegingen over het hoofd te zien. Je merkt nauwelijks (behalve als zweefvlieger) dat er in een hogedrukgebied lucht omlaag stroomt en in een depressie omhoog. Parallel aan het aardoppervlak kunnen de windsnelheden oplopen tot een grootte-orde van 100 km/h (in een storm) of nog veel meer (in een tornado); in verticale richting kunnen daalsnelheden uiteenlopen van cm/s in hogedrukgebieden tot bijvoorbeeld 120 km/h in geval van windstoten bij zware buien. De vraag waar de lucht die nu langs komt vandaan komt en waar die naar toe gaat is zinvol om in de klas te stellen. Het antwoord op ‘waar vandaan’ kan (bijvoorbeeld) zijn ‘uit het oosten’ (bij oostenwind) maar ook ‘van x km hoogte’ in geval van een hogedrukgebied. Vervolgens kun je vragen naar uitzetting of inkrimping van een volume lucht en wat daarvoor verantwoordelijk is. En daarna kun je de invloed van waterdruppeltjes en waterdamp bij die bewegingen in de discussie betrekken.

Als de wrijving klein is (zoals in de hogere luchtlagen en boven zee), waait de wind vrijwel parallel aan de isobaren. Boven landoppervlak is de wrijving niet verwaarloosbaar en wijkt de windrichting af van de richting van de isobaren. Door de wrijvingskracht is de wind die rond een depressie waait een beetje naar binnen gericht. Dat klopt met de opwaartse stroming in de depressie. Voor de aanvoer van lucht moet er dan namelijk lucht langs het aardoppervlak de depressie in stromen, en die lucht gaat vervolgens omhoog. De wind rond een hogedrukgebied is een beetje naar buiten gericht, overeenkomend met de neerwaartse stroming in het hogedrukgebied. Daarbij moet er lucht langs het aardoppervlak het hogedrukgebied uit stromen.

Als de lucht in een depressie omhoog stroomt, moet het zich in de bovenlucht naar de omgeving verspreiden. Dat betekent, verrassend genoeg, dat de luchtdruk boven de depressie hoger moet zijn dan die van de omgeving. Evenzo moet de luchtdruk hoog boven een hogedrukgebied juist lager zijn dan die van de omgeving, om lucht daar te laten toestromen.

Stralingsbalans van de Aarde – Als het globale klimaat van de Aarde niet zou veranderen (gelijkblijvende gemiddelde temperatuur), zou dat betekenen dat – gemiddeld over de hele Aarde en over een jaar – evenveel energie de Aarde verlaat als de Aarde jaarlijks opvangt. Er is dan sprake van een ‘energiebalans’. Dit is het kernidee van de natuurkunde achter de bestudering van klimaatverandering. Bij de uitleg dat deze energiebalans door menselijke activiteit verstoord kan worden, kunnen de volgende vragen helpen:

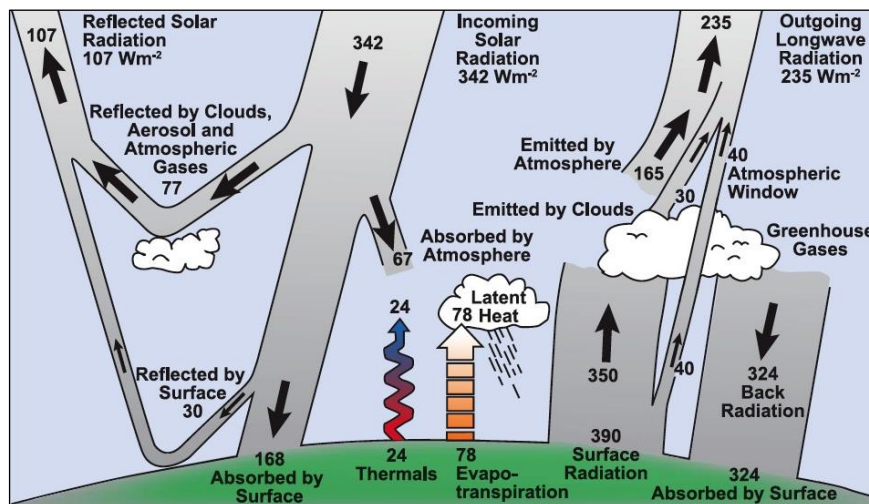
- Waar en in welke vorm(en) komt er energie het systeem Aarde binnen?
- Waar en in welke vorm(en) verlaat energie het systeem Aarde?
- Wat gebeurt waar tussen het binnenkomen en het verlaten van het systeem Aarde? En hoe beïnvloedt dat de inkomende en uitgaande energiestromen?

Voor de ‘waar’-vragen zullen we naar drie plaatsen in de atmosfeer kijken: de bovenzijde van de atmosfeer (Top of Atmosphere: ToA), het aardoppervlak en de atmosfeer zelf daar tussenin.

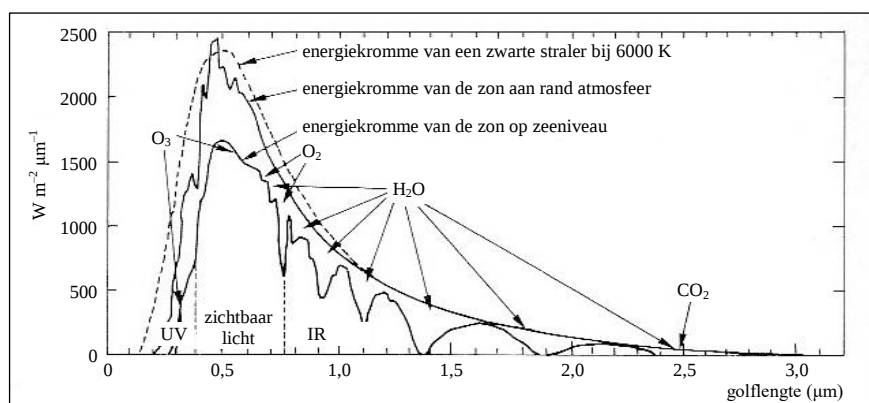
De bij de ToA *inkomende energie* bestaat vrijwel geheel uit (elektromagnetische) zonnestraling. Energie die afkomstig is van andere bronnen (kosmische straling, sterlicht) is voor het klimaat verwaarloosbaar. Zonnestraling is verdeeld over verschillende golflengten volgens de Planck-kromme die hoort bij de oppervlaktetemperatuur van de zon (5780 K) en bestaat voor het grootste deel uit zichtbaar licht. Die straling heeft een kleine golflengte. Men spreekt wel van

kortgolvlige straling. Gemiddeld is het invallend vermogen 1370 W/m^2 , gemeten op het oppervlak dat loodrecht staat op de verbindinglijn Zon-Aarde (let op: het invallend vermogen van 342 W/m^2 in figuur 29 is gemiddeld over het bolvormige oppervlak van de Aarde en dus een-vierde van 1370 W/m^2). Door absorptie in de atmosfeer ziet het spectrum op zeeniveau er nogal anders uit dan aan de ToA ('rand van de atmosfeer' in figuur 30).

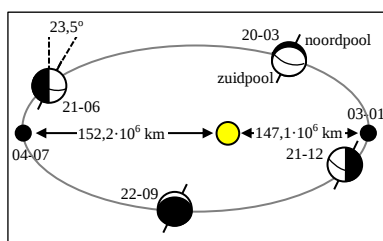
Figuur 29 – Energiestromen in het systeem Aarde-atmosfeer, gemiddeld over het jaar en gemiddeld over het hele aardoppervlak (alle getallen in W/m^2). Links: inkomende en uitgaande kortgolvlige zonnestraling. Rechts: langgolvlige straling van en naar het aardoppervlak. Midden: turbulente stromen van voelbare (*thermals*) en latente (*evapotranspiration* of verdamping) warmte. (Bron: IPCC, 2007)
NB: Het netto stralingsbudget (op jaar-basis) op de evenaar is sterk positief en boven gematigde breedten (sterk) negatief. Tóch worden de polen niet steeds kouder en wordt het bij de evenaar niet steeds heter. Er vindt aan het aardoppervlak een herverdeling plaats van de inkomende zonne-energie.



Figuur 30 – Spectrale verdeling van het directe zonlicht aan de ToA en aan het aardoppervlak. Aangegeven is welke broeikasgassen verantwoordelijk zijn voor de absorptie van delen van het spectrum op zeeniveau. (Bron: Van der Hage & Wessels, 1980)



Tijdens de jaarlijkse (elliptische) baan van de Aarde om de Zon varieert de afstand Zon-Aarde. Die is het kleinst op 3 januari en het grootst op 4 juli. Daardoor is het invallend vermogen in januari 6,8% groter dan in juli, en zijn de winters op het noordelijk halfrond wat milder en de zomers wat minder warm dan op het zuidelijk halfrond. Daarbij speelt ook mee dat er op het noordelijk halfrond meer land is dan op het zuidelijk halfrond.



Figuur 31 – De huidige baan van de Aarde om de Zon.

De bij de ToA *uitgaande energie* is voor ruwweg twee-derde deel langgolvlige straling (warmtestraling). Die straling is verdeeld over de golflengten behorend bij de Planck-kromme van de gemiddelde temperatuur aan de bovenzijde van de wolken (255 K). Het andere deel van de uitgaande energie is kortgolvlige straling die (bijvoorbeeld door wolken of aan het aardoppervlak) gereflecteerd is. Als het globale klimaat niet verandert, is het (gemiddelde) uitgaande vermogen gelijk aan het inkomende vermogen en is er – gemiddeld over de hele Aarde – aan de ToA een stralingsbalans.

Leerlingen zouden kunnen argumenteren dat de Aarde opwarmt als er een stralingsbalans aan de ToA is. Immers, dan warmt de Aarde op door de warmte die vrijkomt bij 'onze' verbranding van fossiele brandstoffen. Een correcte redenering, maar niet relevant. De omvang van 'onze' opgewekte warmte is namelijk zo klein ten opzichte van de instraling door de zon, dat de effecten ervan op het globale klimaat verwaarloosbaar zijn (maar lokaal niet!). Bij leerlingen kan zich het denkbeeld gevormd hebben dat het deze warmte is die zorgt voor de opwarming van de Aarde. Maar dat is niet bron: de opwarming komt

Ultraviolestraling

De atmosfeer is weinig transparant voor uv-straling, dat een klein deel uitmaakt van de invallende kortgol-vige straling. Want uv-straling wordt tegengehouden door ozon. In de hoge luchtlagen wordt voortdurend ozon gevormd en afgebroken, waar-bij de uv-straling wordt geabsor-beerd. Aan het einde van 20^e eeuw ontstond een ‘gat in de ozonlaag’ door de toename van industrieel gemaakte CFK’s (chloor-fluor-koolwaterstoffen) in de hogere lucht-lagen. Door de afbraak van ozon werd de uv-straling minder tegen-gehouden. Het gevaar voor de mens was dat men meer uv-straling op de huid ontvangt, waardoor de kans op huidkanker toeneemt. Door het wereldwijde verbod op CFK’s in apparaten zoals koelkasten komen gaten in de ozonlaag nu minder voor. Sommige leerlingen leggen een ver-band tussen het gat in de ozonlaag en de opwarming van de Aarde. Ver-moedelijk verwarren ze het gat in de ozonlaag met het versterkte broeikas-effect.

Stralingsbalans

Meer over de stralingsbalans van de Aarde is te vinden in de NLT-module *IJs en Klimaat* (JCU, 2010, hoofdstuk 2).

voornamelijk door het versterkte broeikaseffect als gevolg van de toename van de CO₂-concentratie in de atmosfeer waarmee de bedoelde verbranding gepaard gaat. Leerlingen zouden ook kunnen argumenteren dat de Aarde juist afkoelt als er een stralingsbalans aan de ToA is. Immers, planten leggen zonne-energie vast door te groeien. Ook die hoeveelheid energie is echter heel klein ten opzichte van de instraling.

De atmosfeer van de Aarde is transparant voor de meeste soorten kortgol-vige straling (zie figuur 30). Ongeveer een-vijfde deel van het invallend stralings-vermogen wordt door wolken gereflecteerd en verdwijnt de ruimte in. De straling die het aardoppervlak bereikt, wordt daar ofwel teruggekaatst ofwel geabsorbeerd. Absorptie leidt tot verhoging van de temperatuur, het smelten van ijs of het verdampen van water. De mate van terugkaatsing hangt af van de *albedo*: de verhouding tussen de teruggekaatste en de invallende straling. De waarde daarvan ligt tussen 0 en 1. Sneeuw en ijs hebben een grote albedo, zeewater heeft een kleine albedo. Een afname van de gemiddelde albedo van de Aarde kan leiden tot opwarming. Dat kan zich voordoen als grote sneeuw- en ijsvlakten wegsmelten, zoals nu rond de Noordpool het geval is. Zeewater absorbeert aanmerkelijk meer kortgol-vige straling dan sneeuw. De temperatuur loopt daardoor nog verder op, en er kan nog meer ijs wegsmelten. Dat is een zichzelf versterkend effect, waardoor de klimaatverandering zou kunnen versnellen.

Een klein deel van inkomende de kortgol-vige straling (ongeveer een-vijfde) wordt in de atmosfeer geabsorbeerd en (uiteindelijk) weer als langgol-vige straling uitgezonden. De door de het aardoppervlak uitgezonden langgol-vige straling wordt grotendeels in de atmosfeer geabsorbeerd: de atmosfeer is niet transparant voor langgol-vige straling. Wolken zenden een groot deel van de opgevangen warmtestraling terug. Het gevolg daarvan is dat het ‘s nachts onder wolken veel minder afkoelt dan bij een heldere hemel.

De langgol-vige straling die door het aardoppervlak wordt uitgezonden bereikt maar voor een klein deel direct de ToA. Het grootste deel wordt (met name door wolken) geabsorbeerd en opnieuw uitgezonden, naar alle kanten verstrooid. Dus ook voor een deel omlaag, waardoor de temperatuur aan het aardoppervlak hoger is dan zonder die verstrooiing. Sommige bestanddelen van de atmosfeer (zoals waterdamp, CO₂ en CH₄) bevorderen deze verstrooiing van langgol-vige straling: het broeikaseffect. Als hun concentratie in de atmosfeer toeneemt (wat voor CO₂ door verbranding van fossiele brandstoffen het geval is), nemen absorptie en terugkaatsing toe. Daardoor neemt de hoeveelheid straling die naar het aardoppervlak wordt teruggestraald toe, en er stelt zich een nieuw stralingsevenwicht in bij een hogere gemiddelde temperatuur van de Aarde. Dit heet het *versterkte* broeikaseffect.

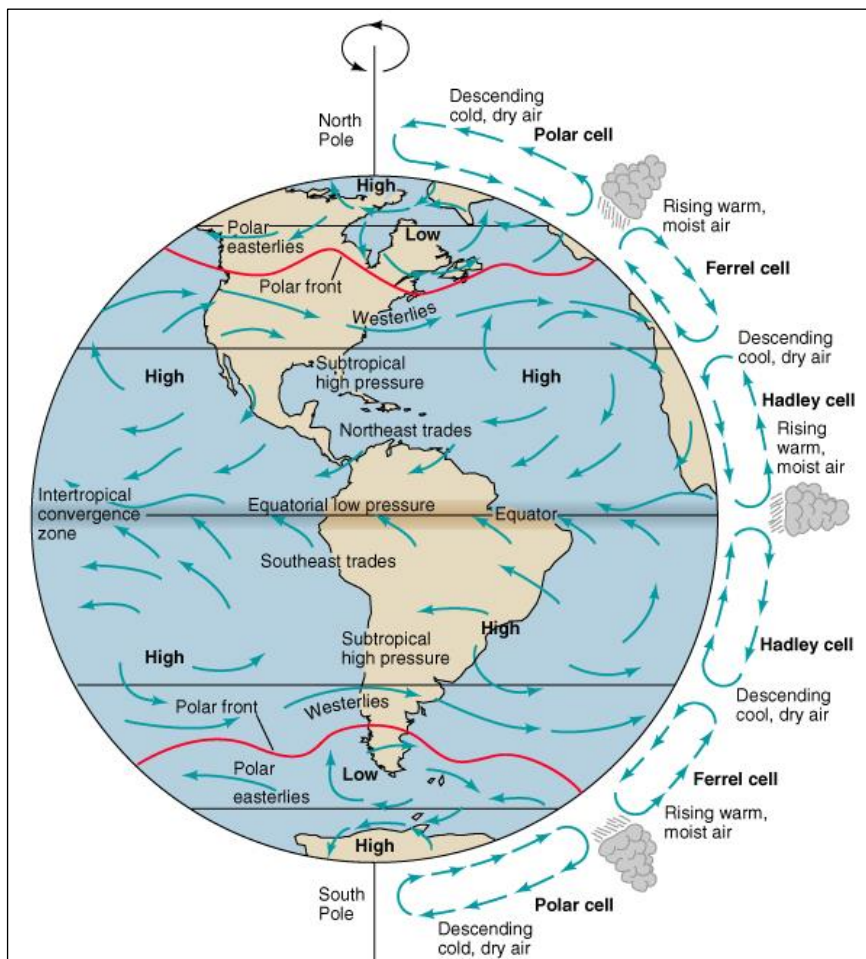
Twee factoren die van belang zijn voor de opwarming van de Aarde zijn dus de afname van de gemiddelde albedo van de Aarde door het smelten van sneeuw- en ijsvelden en het versterkte broeikaseffect. Een derde factor is de toename van waterdamp in de lucht bij een stijgende temperatuur. Dezelfde hoeveelheid waterdamp leidt bij een hogere gemiddelde temperatuur tot minder wolken, dus tot een kleinere albedo. Verder is waterdamp ook een broeikasgas dat ervoor zorgt dat warmtestraling naar de Aarde wordt teruggekaatst. Meer waterdamp in de lucht versterkt dus het broeikaseffect. Maar meer verdamping kan ook leiden tot meer sneeuwval in koude gebieden, waardoor daar de albedo toeneemt en minder langgol-vige straling wordt geabsorbeerd. De netto invloed van de toename van waterdamp is daarom lastig in te schatten en kan bovendien verschillen van plaats tot plaats op Aarde.

Algemene circulatie – De algemene circulatie op Aarde wordt in grote lijnen bepaald door de verschillen in instraling (temperatuur) tussen de tropen en de polen, in combinatie met het Coriolis-effect dat door de draaiing van de Aarde optreedt en de verdeling van zeeën en continenten (met hun bergen) over de Aarde. Netto is er een energietransport van de tropen naar de polen. Een en ander leidt tot drie globale luchtstromingen (*convectiecellen*) op het noordelijk zowel als het zuidelijk halfrond en een slingerende westelijke luchtstroming op zo’n

Convectiecellen en Rossby-golven

Een uitgebreide uitleg op vwo-niveau over de invloed van de convectiecellen en Rossby-golven op ons weer is te vinden in de oude katernen *Weerkunde* (Ottevanger, 1977, hoofdstuk 7-9; Van Welie, 1980, hoofdstuk 6).

5 km hoogte op onze gematigde breedte (Rossby-golven). Die stromingen bepalen in grote lijnen de baan van gebieden met hoge en met lage luchtdruk die het weer bij ons beïnvloeden.



Figuur 32 – De globale stroming in de atmosfeer. De rode lijnen geven de Rossby-golven aan. De vorm ervan hangt onder meer af van het seizoen: twee golven in de winter tot wel meer dan zes in de zomer.

Dankwoord

Dank aan Martijn Groothuis voor zijn commentaar bij het stuk over begripsopbouw Weer en klimaat.

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 NNV16. Enschede: SLO.
- JCU (2010). *IJs en klimaat*. Utrecht: Universiteit Utrecht, Junior College Utrecht.
- 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.
- Ottevanger, W.P.A.G. (1977). *Weerkunde* (onder redactie van J. Schweers en P. van Vianen). Den Bosch: Malmberg.
- Ottevanger, W.P.A.G. (1987). *Natuurkunde van de atmosfeer* (onder redactie van J. Schweers en P. van Vianen). Den Bosch: Malmberg.
- Paus, J. (2012). *Handreiking schoolexamen natuurkunde havo/vwo*. Enschede: SLO.
- Van Buuren, O., K. Köhler & H. Vroon (2012). *Atmosfeer en aarde*. NiNa-module NNV17. Enschede: SLO.
- Van der Hage, J.C.H. & H.R.A. Wessels (1980). *Natuurkunde van de atmosfeer*. Groningen: NVON/Wolters-Noordhoff.
- 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.