Kan een fysisch experiment binnenwaaien in een aardrijkskundeles?

An Steegen[1], Femke Hasendonckx[2], Mieke De Cock[3], Filip Marrecau[4]

[1] Specifieke Lerarenopleiding Natuurwetenschappen – optie Geografie/Geologie – Departement Aard- en Omgevingswetenschappen – KU Leuven – an.steegen@ees.kuleuven.be;
[2] Wetenschappelijk Medewerker SLO Natuurwetenschappen – KU Leuven;
[3] Specifieke Lerarenopleiding Natuurwetenschappen – optie Fysica – Departement Natuurkunde en Sterrenkunde – KU Leuven – mieke.decock@fys.kuleuven.be;
[4] student SLO Natuurwetenschappen – optie aardrijkskunde – KU Leuven

'Atmosfeer' is een belangrijk stuk leerstof in de derde graad. Hier wordt dieper op ingegaan in dit artikel. Voor u het leest, zou het leuk zijn als u bij de vijf onderstaande vragen of uitspraken telkens het juiste alternatief aanduidt.

1 Waterdamp is:
   a water in de gasfase.
   b water in de vloeibare fase.
   c water in de vaste fase.
   d een fase tussen gas en vloeistof.
   e een fase tussen gas en vast.

2 Waaruit bestaat een wolk?
   a waterdamp
   b waterdruppels
   c ijskristallen
   d warme lucht
   e koude lucht

3 Welke uitspra(a)k(en) over het ontstaan van wolken is/zijn correct?
   a Water dat verdampt, zien we als wolk.
   b Wolken ontstaan altijd boven een wateroppervlak (zee, meer, rivier, ...). Soms worden ze daarna door de wind naar het land geblazen.
   c Als vochtige lucht afkoelt, kan een wolk ontstaan.
   e Wolken ontstaan door condensatie van waterdamp tot druppeltjes.

4 Waarom hangen wolken vaak in de troposfeer en niet enkel aan de grond?
   a Warme waterdamp stijgt. Deze waterdamp zien we in de vorm van een wolk in de troposfeer.
   b Als water verdampt, wordt het lichter. Daarom zien we een wolk in de troposfeer.
   c Warme lucht stijgt. Die lucht koelt hoger in de troposfeer af en condenseert daar tot een wolk.

5 Welke uitspra(a)k(en) over wind is/zijn correct?
   a Wind is de verplaatsing van lucht.
   b Wind ontstaat door de draaiing van de aarde om de zon.
   c Wolken veroorzaken wind.
   d Een temperatuurverschil tussen twee plaatsen veroorzaakt wind.
   e Een drukverschil tussen twee plaatsen veroorzaakt wind.

Hebt u gemerkt dat bij sommige vragen meerdere antwoorden mogelijk zijn?

1 Inleiding

Er wordt wel eens gezegd dat een geograaf in zijn laboratorium leeft, werkt, beweegt. Maar onze leerlingen zien dit natuurlijk niet altijd. Willen we hen leren observeren en onderzoekend leren leren, dan moeten we hen aanleren om complexe fenomenen uit de natuur te vereenvoudigen en te ontleden in verschillende componenten, en om na onderzoek van de afzonderlijke componenten, deze opnieuw te combineren tot het natuurlijke fenomeen dat we observeren. Daarbij maken we dikwijls gebruik van concepten uit andere vakken, zoals uit het vak fysica.

Binnen lessen fysica worden er vaak experimenten uitgevoerd. Deze maken de leerstof tastbaar en werken verhelderend. Binnen de lessen aardrijkskunde worden er globaal gesproken weinig proeven uitgevoerd. Tijdsgebrek speelt daarin binnen dit eenuursvak zeker een rol. Soms is ook de schaal waarop de fenomenen zich voordoen een belemmerende factor. Nochtans zijn er een aantal fenomenen die wel degelijk op een experimentele wijze verduidelijkt kunnen worden.

In deze paper worden daarom twee experimenten voorgesteld die betrekking hebben op het thema 'Atmosfeer'

waarin de fenomenen '**wolkenvorming**' en '**het ontstaan van wind**' geïllustreerd worden. Deze experimenten werden ontwikkeld in het kader van het *Impulskrediet Vakdidactisch Onderzoek* van de KU Leuven met als titel '*Er waait wat – fysica waait binnen in de aardrijkskundeles*' uit 2012-13.

2 Verantwoording voor de ontwikkelde experimenten

Leerlingen hebben vaak een aantal misconcepties. Dit zijn onjuiste of onvolledige ideeën die gebaseerd zijn op persoonlijke ervaring en gebruikt worden om een fenomeen of gebeurtenis te verklaren (Martin et al., 2002). Vanaf de kindertijd gaan mensen immers op zoek naar verklaringen voor fenomenen uit hun omgeving. Deze zelf gevonden verklaringen worden als waarheid beschouwd maar komen vaak niet overeen met wetenschappelijke verklaringen (Schmidt et al., 1998). Op dat ogenblik spreekt men van een misconceptie of van een leerlingendenkbeeld. Misconcepties kunnen niet zomaar gelijkgesteld worden aan een kennistekort omdat ze meer systematisch aanwezig zijn in de geest van leerlingen. Ze hangen echt samen en zijn daarom zeer moeilijk om te buigen tot wetenschappelijk correcte theorieën (Miller & Brewer, 2010).

Eén van de doelstellingen van goed onderwijs is uiteraard om deze misconcepties om te buigen in wetenschappelijk onderbouwde kennis. Daarbij kan het van belang zijn dat leraren hun onderwijs laten aansluiten bij die misvattingen, en methoden ontwerpen waarmee de misconcepties bestreden kunnen worden (Schmidt et al., 1998). Uit de literatuur weten we dat er bij leerlingen van alle leeftijden misconcepties bestaan over de vorming van wolken en het ontstaan van wind. Dat zijn twee fenomenen die vaak moeilijk concreet te maken zijn voor leerlingen. Om hen te helpen bij het verklaren en begrijpen van deze fenomenen, werden daarom twee experimenten ontwikkeld. Deze proeven kunnen met behulp van eenvoudig materiaal in de klas uitgevoerd worden, of de leraar kan ervoor kiezen om de filmpjes die door de projectmedewerkers ervan gemaakt werden, te laten zien in de klas. Onderaan het artikel staat de link naar de website waar deze filmpjes terug te vinden zijn.

3 Misconcepties met betrekking tot wolkenvorming en wind

In de literatuur worden een groot aantal misconcepties in verband met wolkenvorming en wind beschreven. We lijsten er hier een aantal op. Daarbij wordt telkens verantwoord waarom de vragen in de vragenlijst vooraan werden opgenomen. Rappaport (2009) vermeldt volgende misconcepties:

- Er is verwarring over het verschil tussen water in de gasfase en in de vloeibare fase. Leerlingen denken immers dat waterdamp soms zichtbaar is. Het gevolg hiervan is ook dat ze niet goed weten wanneer er een faseovergang tussen beide fases optreedt. Ze zien daarom wolken niet als druppels, maar eerder als een tussenfase tussen gas en vloeistof die niet bestaat. Bijna alle leerlingen denken dat waterdamp deel uitmaakt van wat ze zien als een wolk, sterker nog, ze denken dat de wolken vooral waterdamp zijn. Dit komt omdat het niet regent uit alle wolken. In de vragenlijst vooraan werden daarom vraag 1 en 2 opgenomen.
- Leerlingen spreken wel over 'verzadiging' om aan te duiden dat waterdamp zichtbaar wordt, maar realiseren zich niet altijd dat er dan een faseovergang is tussen gas en vloeibaar.
- Leerlingen begrijpen wel dat stijgende lucht afkoelt en zal condenseren, maar ze zien niet in dat het water opnieuw kan evaporeren wanneer deze lucht later daalt en warmer wordt. Vraag 3 speelt hierop in.
- Leerlingen denken dat mist uitsluitend ontstaat wanneer evaporatie vanaf het oppervlak optreedt. Ze weten niet dat mist meestal ontstaat wanneer water uit de luchtkolom boven een oppervlak condenseert. Ze denken dit omdat ze zelf getuige zijn van 'mist' in de vorm van stoom boven warme oppervlakken (denk aan je bad of waterkoker).
- Leerlingen denken dat er een waterreservoir in de buurt moet zijn om condensatie te laten optreden. Leerlingen hebben dus een beperkt zicht op het transport van waterdamp in de atmosfeer. Ook vraag 3 peilt naar dit transport.

Ook Henriques (2002) somt enkele misconcepties op:

- Leerlingen denken dat water enkel van meren en oceanen evaporeert. Zoals hoger vermeld peilt vraag 3 hiernaar.
- Leerlingen (en soms ook leraren) zeggen dat warme lucht minder weegt dan koude lucht. Dat is niet correct: een vaste hoeveelheid lucht heeft steeds dezelfde massa, onafhankelijk van de temperatuur. Andere eigenschappen van de lucht zullen wel veranderen wanneer de lucht wordt opgewarmd. Bij constante druk zal lucht bijvoorbeeld uitzetten bij opwarming. Wordt het volume constant gehouden, dan zal de druk stijgen als de temperatuur toeneemt. Als de lucht uitzet bij opwarming, zal dus niet de massa maar de massadichtheid veranderen.
- Leerlingen geven als reden waarom wolken gevormd worden dat koude lucht niet zoveel water kan vasthouden als warme lucht. In feite is het vormen van wolken echter afhankelijk van de hoeveelheid water die evaporeert of condenseert. In vraag 3 en 4 worden gerelateerde vragen opgenomen.
- Regendruppels lijken op tranen. In feite is de vorm afhankelijk van de grootte van de druppel, maar kunstenaars stellen druppels steeds hetzelfde voor.
- De 'H' op een weerkaart staat voor hoge temperatuur, 'L' voor koud weer.
- Leerlingen definiëren isobaren als lijnen die windsnelheid of temperatuur aangeven.

- Leerlingen denken dat oppervlaktewinden vloeien van hoge naar lage luchtdruk. Dit is inderdaad juist, maar enkel aan het aardoppervlak. Verticale luchtstromen voldoen hier bijvoorbeeld niet aan. Rotatie-effecten spelen daarin ook een rol.

Tot slot hebben leerlingen het ook moeilijk met verticale bewegingen van lucht. Wanneer lucht daalt, ontstaat er aan het aardoppervlak een hogedrukgebied; wanneer lucht stijgt ontstaat er aan het oppervlak een lagedrukgebied. Dit verschil is voor leerlingen moeilijk te begrijpen (Nelson et al., 1992).

Om te achterhalen of leerlingen bepaalde misconcepties hebben, kan er gewerkt worden met conceptcartoons (Keogh & Naylor, 1999). In figuren 1 en 2 worden voorbeelden gegeven die ontwikkeld werden bij de lessen rond wolkenvorming en wind.

Figuur 1 Conceptcartoon over wolkenvorming

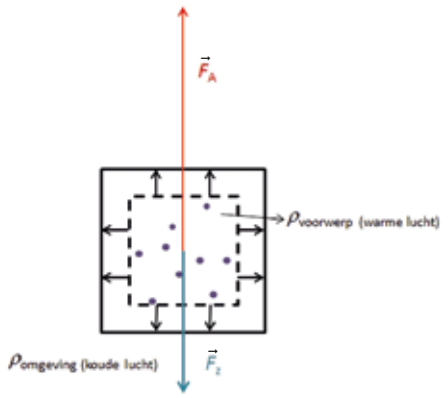
Figuur 2 Conceptcartoon over wind

4 Wat kennen de leerlingen al uit lessen fysica of uit andere wetenschappen?

Leerlingen weten dat de vochtige lucht uit volgende chemische stoffen is samengesteld: 76% N_2, 21% O_2, 2% H_2O, en enkele andere elementen.

Uit de fysicalessen van de tweede graad zijn leerlingen vertrouwd met de concepten massa, massadichtheid, temperatuur, warmte, soortelijke warmtecapaciteit, volume, druk. De ideale gaswet die een verband beschrijft tussen de temperatuur, het volume en de druk in een gas werden behandeld. Ook de wet van Archimedes werd besproken. Deze zegt dat 'een object dat wordt ondergedompeld in een vloeistof/gas een opwaartse stuwkracht zal ondervinden gelijk aan het gewicht van de verplaatste vloeistof/gas' (Figuur 3).

Figuur 3 Krachten die op een pakketje lucht inspelen.
Noot: Een 'pakketje lucht' is een volume lucht. Op de volgende figuren werken we met een vierkant als 2D-voorstelling van een kubus.
Het uitzetten of het krimpen van de lucht stellen we voor door vierkanten in stippellijn (beginsituatie) en in volle lijn (eindsituatie) te gebruiken. Waar nodig verduidelijken extra pijltjes dit proces. De bolletjes in de vierkanten suggereren gasdeeltjes.



$$F_A = \rho_{omgeving} \cdot V_{voorwerp} \cdot g$$
$$F_z = m_{voorwerp} \cdot g = \rho_{voorwerp} \cdot V_{voorwerp} \cdot g$$

$\vec{F}_A$ = Archimedeskracht
$\vec{F}_Z$ = zwaartekracht (gravitatie)
$\rho_{omgeving}$ = massadichtheid van de vloeistof of gas waarin het bestudeerde pakketje lucht zich bevindt
$\rho_{voorwerp}$ = massadichtheid van het pakketje lucht (het 'voorwerp') dat we bekijken
$V_{voorwerp}$ = volume van de verplaatste vloeistof of gas (het 'voorwerp')
$m_{voorwerp}$ = massa van de verplaatste vloeistof of gas (het 'voorwerp')
g = zwaarteveldsterkte (bij ons ca. 9,81 m/s²)

5 Experimenten

Experiment 1: Hoe ontstaat een wolk?

Doel van het experiment

Met dit experiment (NASA, 2013) willen we leerlingen beter laten begrijpen waaruit een wolk bestaat en hoe deze wolk gevormd wordt. Leerlingen moeten inzien dat een wolk samengesteld is uit kleine druppels, dus water in de vloeibare fase. De faseovergang gas-vloeibaar moet duidelijk benoemd worden, de term 'condensatie' vermeld worden. Absolute en relatieve vochtigheid moeten zeer duidelijk onderscheiden worden.

Beschrijving van het experiment

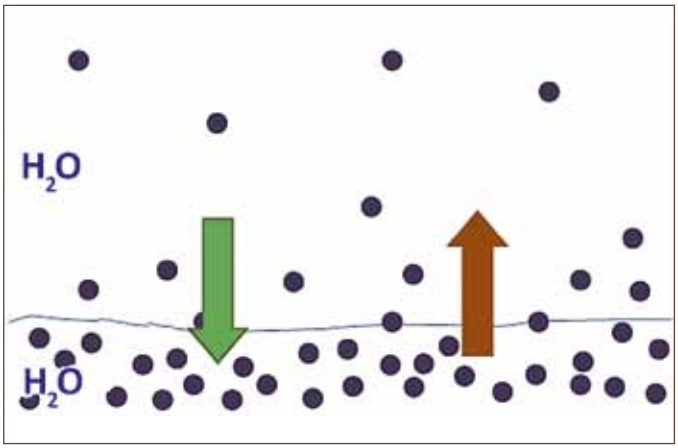
Het experiment is vrij eenvoudig. In een glazen bak, type aquarium, wordt warm water (39 °C) gegoten. Meteen hierna wordt de glazen bak bovenaan afgesloten, best met een glazen kom (type ovenschotel). Daarbij moet er goed op gelet worden dat er geen opening is waarlangs de wolk kan ontsnappen. Leerlingen kunnen nu het proces verdamping observeren: de lucht boven het wateroppervlak bevat waterdamp die gasvormig is. De lucht heeft een zekere mate van luchtvochtigheid. Hierbij is er meteen een link mogelijk naar de begrippen absolute en relatieve luchtvochtigheid, respectievelijk uitgedrukt in g/m³ en %. In deze fase van het experiment is er zo goed als geen wolkenvorming.

Vervolgens wordt er in de ovenschotel ijs gedaan. Om de processen goed te observeren verduister je best het lokaal en zet je een spot op de glazen bak. Door dit ijs daalt de temperatuur van de lucht in de glazen bak. Hierdoor gaat de waterdamp stilletjesaan condenseren tot waterdruppeltjes. Een wolk wordt dus gevormd. Deze is echter niet altijd duidelijk waar te nemen. Om dit beter zichtbaar te maken, strijk je een lucifer aan buiten de afgesloten bak, blaas je deze uit en houd je de rokende lucifer enkele seconden in de glazen bak. De roetdeeltjes die je zo in het systeem brengt fungeren als condensatiekernen waarop de waterdamp condenseert. Nu is de wolk wel goed zichtbaar. Aan het eind van het experiment kan je de wolk laten ontsnappen in de klas door de schotel met ijs te verwijderen. Door de temperatuurstijging verdampt de wolk weer in de klas.

Wetenschappelijke uitleg

Aan het wateroppervlak verdampt water tot waterdamp (Figuur 4). De lucht boven het wateroppervlak bevat dus een deel waterdamp. Wanneer de lucht afkoelt, kan de relatieve luchtvochtigheid naar 100% stijgen en dan zal de waterdamp erin condenseren (kleine druppeltjes vormen) en vormt er zich dus een wolk.

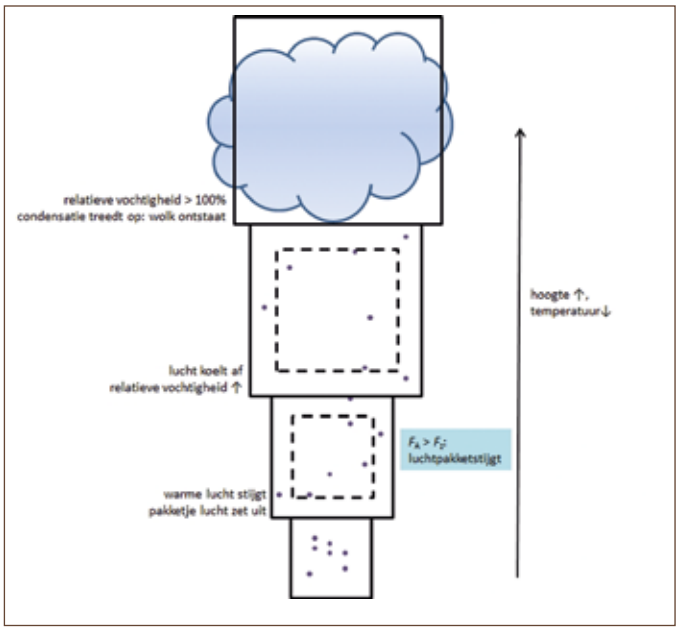
Figuur 4: Verdamping (rood) en condensatie (groen) aan het wateroppervlak



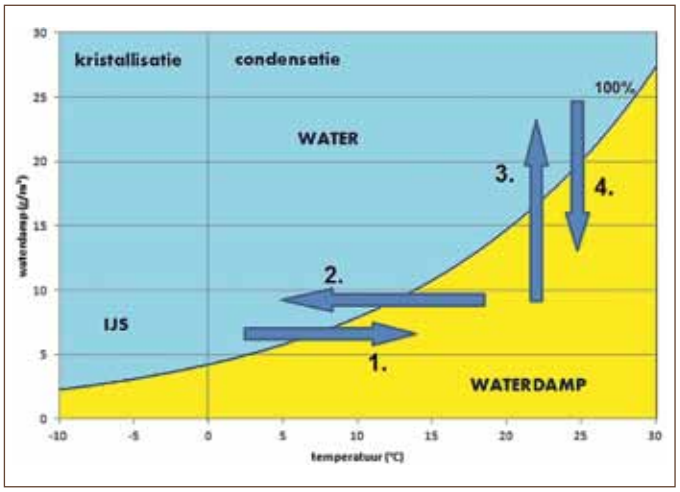
Waarom worden de wolken meestal hoger (in de troposfeer) gevormd? Dat kan worden verklaard met behulp van

de wet van Archimedes. Een pakketje lucht zal dichtbij het aardoppervlak opwarmen en deze relatief warme lucht (warmer dan de omgevende lucht) zal uitzetten waardoor de dichtheid daalt. De opwaartse Archimedeskracht wordt groter dan de zwaartekracht en het pakketje lucht stijgt op. Hogerop in de troposfeer zijn de druk en de temperatuur lager. Het pakketje blijft uitzetten en koelt daardoor ook af. De relatieve luchtvochtigheid stijgt, en wanneer deze tot boven 100% uitstijgt, treedt er condensatie en dus wolkvorming op (figuur 5). Deze condensatie verloopt makkelijker wanneer er stofdeeltjes aanwezig zijn in de atmosfeer waarop het water kan condenseren. Het is dus niet de rook van de lucifer die je observeert, maar wel de wolk. Bij deze wolkenvorming treedt er dus hoger in de troposfeer een faseverandering op (figuur 4): van gasvormig (waterdamp) naar vloeistof (water).

Figuur 5: Wolkenvorming bij afnemende temperatuur in de hoge troposfeer



Figuur 6: Relatie tussen temperatuur en absolute luchtvochtigheid waarmee wolkenvorming verklaard kan worden



Dit experiment kan eventueel aangevuld worden met volgende elementen:

- Als de temperatuur genoeg afneemt, kunnen er ook ijskristallen ontstaan in de wolk. Dit wordt echter niet gesimuleerd in het experiment maar in een onderwijsleergesprek kan dit aangehaald worden via redenering.
- Uit een wolk valt dus niet altijd neerslag. De leerlingen zien immers enkel een wolk, maar de relatie met neerslag (regen, sneeuw) kan verduidelijkt worden.
- Wanneer de schotel van de glazen bak wordt gehaald, stijgt de wolk op in de klasruimte. Hij verdwijnt echter meteen opnieuw. Wanneer leerlingen dit kunnen verklaren, begrijpen ze de leerstof!

Relatie met de misconcepties

De misconceptie dat een wolk uit waterdamp bestaat of uit water in een fase tussen gas en vloeistof moet door dit experiment verdwijnen. Je moet als leerkracht echter zelf wel benadrukken dat het experiment wordt uitgevoerd boven een wateroppervlak, maar dat in de natuur dit waterlichaam niet noodzakelijk is. Waak er met andere woorden over dat deze misconceptie niet in de hand gewerkt wordt!

Experiment 2: Hoe ontstaat wind?

Doel van het experiment

Het tweede experiment wil de leerlingen de vorming van wind laten begrijpen. Wind is een verplaatsing van een massa lucht ten gevolge van een drukgradiënt. Leerlingen kennen 'wind' natuurlijk wel, maar dan enkel de oppervlaktewind. Dit experiment beoogt om een systeem zoals de Hadley-cel te visualiseren, dus zowel met oppervlaktewinden als winden in hogere delen van de troposfeer.

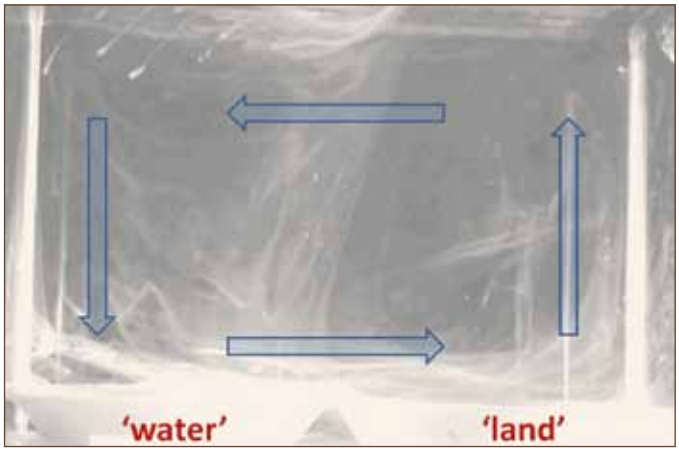
Beschrijving van het experiment

In een glazen bak, type aquarium, worden 2 schoteltjes geplaatst: een dat koud is en gevuld is met licht gesmolten ijsblokjes, en een dat warmer is en gevuld is met een mengeling van zand en warm water (de mengeling heeft een temperatuur van 49°C). Het schoteltje met ijs en water stelt de 'zee' voor, het schoteltje met zand stelt het 'land' voor. De glazen bak wordt afgesloten met aluminiumfolie waarin een klein gaatje zit, ongeveer boven het schoteltje met ijs. Door dit kleine gaatje wordt vervolgens een brandende lont gestoken die rook ontwikkelt. Zorg er wel voor dat het gaatje wordt afgesloten eens de lont erdoor steekt. Wanneer er een lamp gericht wordt op de glazen bak, kan je zien dat de rook circuleert waarbij er een dalende beweging is boven het koude schoteltje en een stijgende beweging boven het warme. Ertussen lopen de luchtstromen horizontaal, maar in tegengestelde richting tussen de bovenkant en de onderkant (figuur 7).

Wetenschappelijke uitleg

Door insolatie zal de lucht boven land sneller opwarmen dan deze boven het water omdat de warmtecapaciteit van land veel kleiner is dan die van water. Door de stijgende

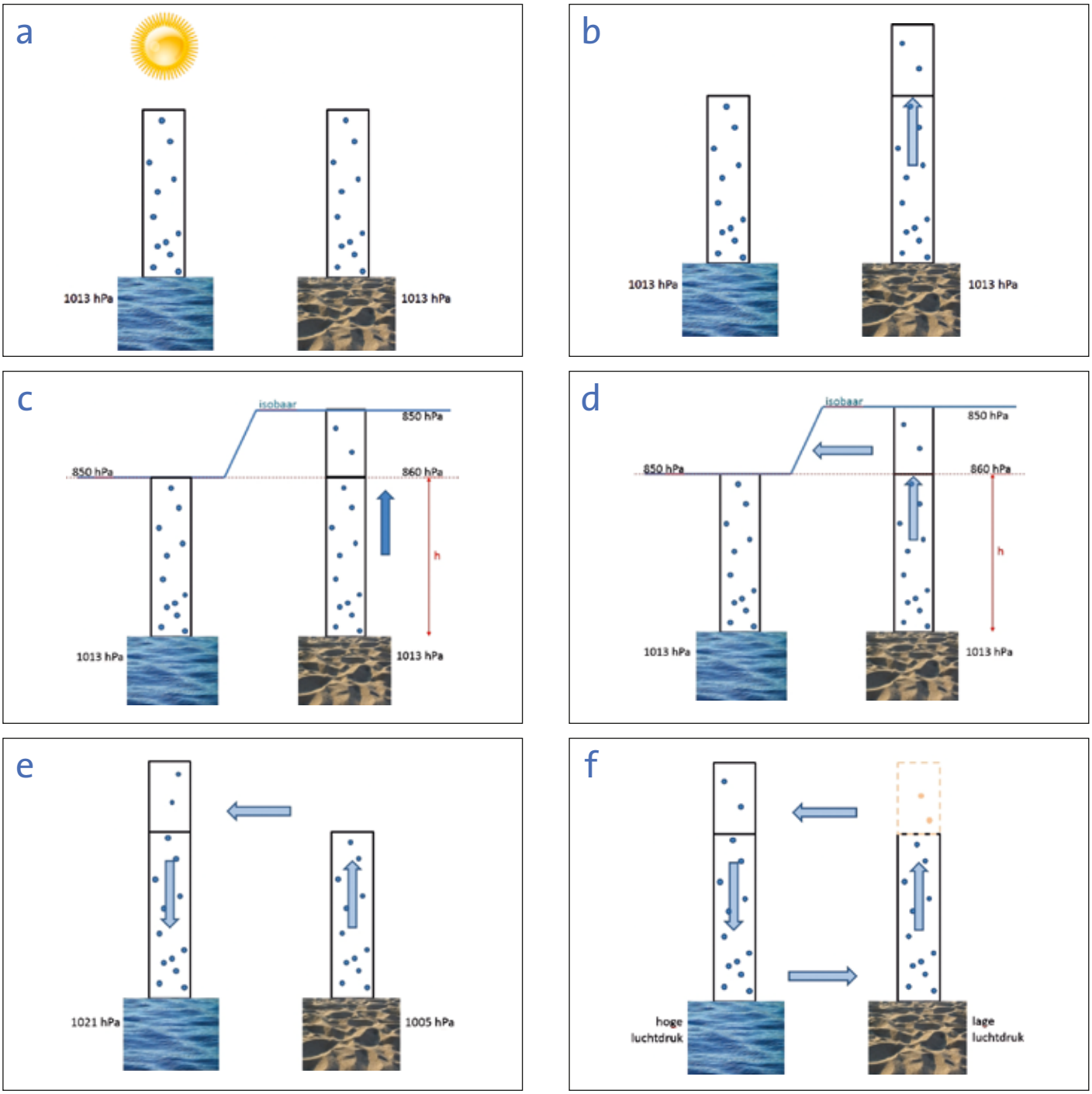
Figuur 7: Luchtstromen (blauwe pijlen) in de glazen bak ten gevolge van verschillen in druk



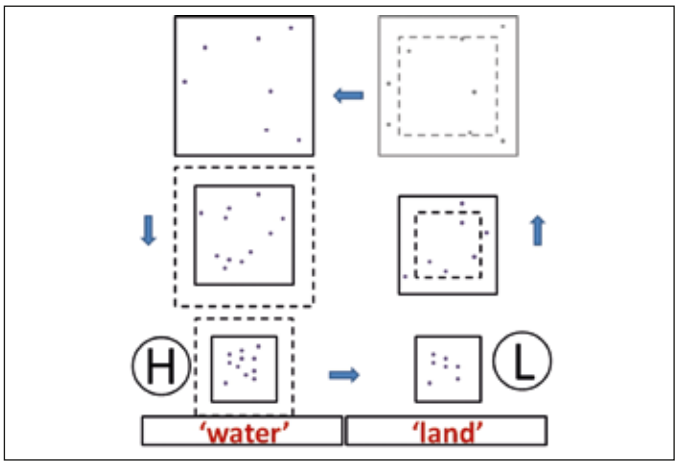
temperatuur van de lucht boven land stijgt ook de kinetische energie van de deeltjes. Het volume neemt toe (figuur 8b). De massadichtheid daalt omdat er minder deeltjes lucht per volume-eenheid aanwezig zijn. De massadichtheid van het pakketje lucht wordt dan kleiner dan de massadichtheid van de omgevende lucht. Het pakketje lucht stijgt op (wet van Archimedes): de opwaartse stuwkracht is groter dan de zwaartekracht.

Door de stijging van het pakketje lucht wordt er op hoogte (h) boven land in eerste instantie een hogedrukgebied gecreëerd ten opzichte van een lagedrukgebied op hoogte (h) boven water (figuur 8c). Op hoogte h beweegt de lucht zich daardoor van het land naar het water (figuur 8d). Boven water koelt de lucht terug af. Aan het aardoppervlak wordt

Figuur 8 Verschillen in massadichtheid en druk met verticale en horizontale luchtstromen tot gevolg



Figuur 9 Schematische voorstelling van wind in een cirkelvormig patroon



er een hogedrukgebied gecreëerd boven water en een lagedrukgebied boven land (figuur 8e). De lucht beweegt zich daardoor aan het aardoppervlak van het water naar het land (figuur 8f). Op die manier is de cyclus gesloten (figuur 9). (voor figuren 8 en 9 zie bladzijde 8)

Relatie met de misconcepties

In dit experiment wordt benadrukt dat wind ontstaat door drukgradiënten die voor een horizontaal transport zorgen waarbij de drukgradiënt aan het oppervlak tegengesteld is aan deze hogerop in de atmosfeer. Op de plaats aan het aardoppervlak waar de temperatuur hoger is ontstaat er een lagedrukgebied. Op de plaats waar het kouder is een hogedrukgebied. Vaak is er wat dit betreft een redeneerfout aanwezig bij de leerlingen.

Twee kleine nuanceringen naar de leerlingen van de gekozen opstelling lijkt wel nodig. In dit experiment wordt er immers gewerkt met zand vermengd met warm water en water (ijsblokjes). Dit suggereert dat deze wind enkel in een land-zee-systeem kan ontstaan. Belangrijk is om te benadrukken dat het vooral een temperatuursverschil is dat nodig is om het systeem in gang te zetten waardoor een drukverschil ontstaat.

Een verwijzing naar het zware hogedrukgebied boven Siberië kan verduidelijking brengen. Daarnaast wordt het verschil in warmtecapaciteit tussen land en zee niet rechtstreeks aangetoond met het experiment omdat we geen energiebron rechtstreeks op het zand/ijs zetten maar meteen zorgen dat het temperatuurverschil aanwezig is door warm water over het zand te gieten tot de juiste temperatuur bereikt wordt.

Conclusie

Experimenten worden in het vak aardrijkskunde niet zo vaak gebruikt. Nochtans bieden ze de mogelijkheid om allerlei processen te visualiseren, en een aantal misconcepties uit de weg te helpen. Daarnaast bieden ze ook de gelegenheid om leerstof uit andere vakken op te frissen of concreet toe te passen. Het kost uiteraard wel wat energie van de leraar om dit in een klas te doen, maar de leerlingen zelf zullen dit sterk appreciëren!

Ter info

- De auteurs wensen mevrouw Swana Van Acker te bedanken voor het tekenen van de conceptcartoons (figuur 1 en 2)!

- Oplossing bij de vragen: 1. A – 2. B en C – 3. C en D – 4. C – 5. A en E
- Surf naar deze http://wet.kuleuven/be om het lesmateriaal en de gefilmde experimenten terug te vinden. Kies voor 'leraren'. Bij het 'lesmateriaal' kan je zowel bij fysica als bij aardrijkskunde alle informatie terugvinden! Dezelfde inhoud werd uitgewerkt voor een klassieke les, een experimentenles en een iPadles. Je mag al dit materiaal gebruiken in de klas mits je vermeldt: '*Materiaal ontwikkeld door de Specifieke Lerarenopleiding Natuurwetenschappen – KU Leuven*'. Veel plezier ermee!

Bibliografie

- Henriques, L., 2002, Children's Ideas about Weather: a Review of the Literature, In: School Science and Mathematics, 102 (5), p. 202-215.
- Keogh, B., Naylor, S., 1999, Concept cartoons, teaching and learning in science: an evaluation. In: International Journal of Science Education, 21(4), p. 431-436.
- Martin et al., 2002
- Miller, B.W., Brewer, W.F., 2010, Misconceptions of Astronomical Distances, In: International Journal of Science Education, Vol. 32, No. 12, p. 1549-1560.
- NASA, 2013, http://scool.larc.nasa.gov/cgi-bin/view_lessonplan.cgi?id=89 (laatst geraadpleegd op 8/07/2013)
- Nelson, B.D., Aron, R.H., Francek, M.A., 1992, Clarification of selected misconceptions in physical geography, In: Journal of Geography, No. 91, 76-80.
- Rappaport, E., 2009, What undergraduates think about clouds and fog, In: Journal of Geoscience Education, Vol. 57, no. 2, p. 145-151.
- Schmidt, H., Spaaij, G., De Grave, W., 1988, Opsporen van misconcepties bij middelbare scholieren, In: Tijdschrift voor onderwijsresearch 3, p. 129-140.