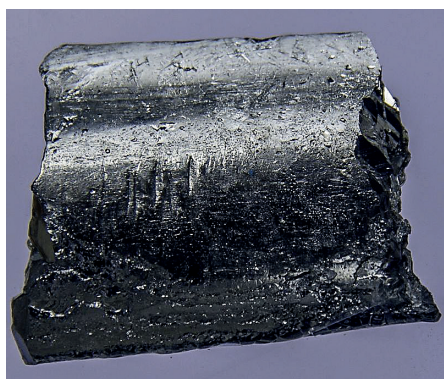


Cruciale delfstoffen raken op

Theo Henckens
theo.henckens@gmail.com



Afb. 1A. De belangrijkste bron van antimoonproductie is het mineraal antimooniet (ofwel stibniet), een antimoonsulfide (Sb_2S_3). Foto: MIM museum, FMI/James Elliott; AINU/Augustin de Valence; AINU/Alessandro Clemenza.



Afb. 1B. Puur metallisch antimoon (stibium, Sb). Foto: Via Wikimedia Commons, CC-BY-3.0.

Als we onze achterkleinkinderen nog voldoende zink, molybdeen en antimoon willen gunnen, dan moet er een internationaal delfstoffenakkoord komen. Dit is het resultaat van mijn promotieonderzoek aan de Universiteit Utrecht. Het proefschrift is in oktober 2016 verschenen onder de titel 'Managing raw materials scarcity, Safeguarding the availability of geologically scarce mineral resources for future generations'.

Vijftien belangrijke delfstoffen zijn schaars te noemen; daarvan zijn antimoon (afb. 1B), molybdeen (afb. 2B), goud, zink en renium het meest schaars.

Molybdeen is een mineraal dat onmisbaar is bij de productie van hoogwaardige staalsoorten. Over circa tachtig jaar is al het winbare molybdeen op aarde echter op. Recycling van molybdeen vindt op dit moment nog nauwelijks plaats. Eind van deze eeuw zal hierdoor een tekort ontstaan, tenzij het hergebruik van molybdeen drastisch wordt opgevoerd. De

voorraad antimoon, een mineraal dat wordt gebruikt om kunststoffen hittebestendiger te maken, is naar verwachting al binnen dertig jaar uitgeput.

Club van Rome te pessimistisch

In 1972 presenteerde de Club van Rome het alarmerende rapport 'Grenzen aan de Groei', dat handelde over de uitputting van delfstoffen. Nu we na bijna een halve eeuw later op dit rapport terugkijken, blijkt de boodschap mee te vallen. De hoeveelheid delfstoffen is groter dan deze club van wetenschappers destijds dacht. Bovendien zijn de winningsmethoden in de loop der jaren geavanceerder geworden.

De Club van Rome ging uit van de bewezen reserves: de hoeveelheden die destijds waren aangetoond. In mijn proefschrift ga ik daarentegen uit van wat er geologisch gezien maximaal aan winbare hoeveelheden delfstoffen in de aardkorst zit. Deze cijfers zijn ontleend aan een onderzoek van het International



Afb. 2A. De belangrijkste bron van molybdeenproductie is het mineraal molybdeeniet, een molybdeen-sulfide (MoS_2). Foto: MIM museum, FMI/James Elliott; AINU/Augustin de Valence; AINU/Alessandro Clemenza.

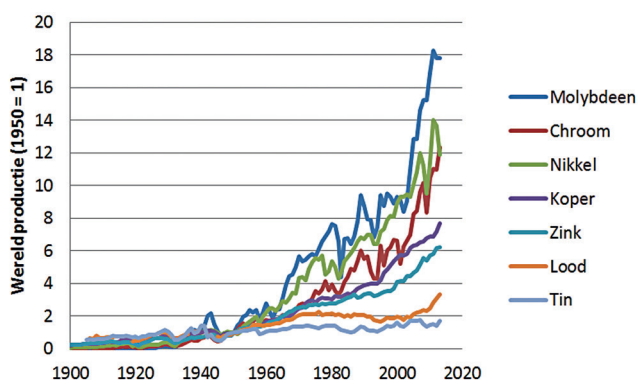


Afb. 2B. Puur polykristallijn molybdeen en een kubus van 1 cm³ mono-kristallijn molybdeen. Foto: Via Wikipedia/pse-mendeleejew.de, Free Art License 1.3.

Resources Panel (IRP), een internationale groep van wetenschappers in opdracht van UNEP (United Nations Environmental Programme). De schattingen van UNEP zijn veel optimistischer: de hoeveelheid delfstoffen is tientallen malen hoger dan die waarvan de Club van Rome destijds is uitgegaan.

De meest schaarse delfstoffen

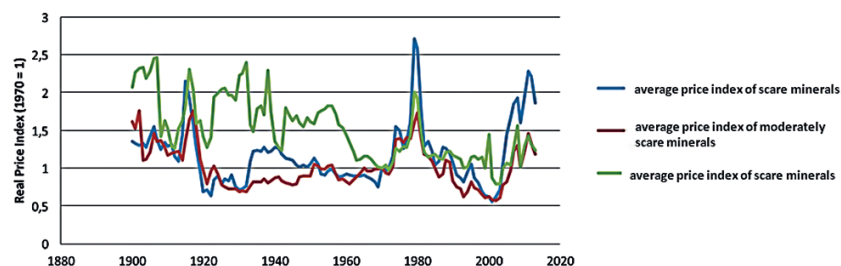
De schaarste van een delfstof wordt uitgedrukt in het aantal jaren dat we nog vooruit kunnen met de economisch winbare hoeveelheid. Dit hangt af van het jaarlijks gebruik van zo'n delfstof (afb. 3). Ik berekende de verhouding tussen de (econo-



Afb. 3. Mondiale productie van zeven delfstoffen. Bron: Theo Henckens.

misch) winbare voorraad en het (geanticiperde) jaarlijks gebruik voor 65 minerale delfstoffen. Voor de vijf eerdergenoemde meest schaarse delfstoffen betekent dit dat de volgorde van schaarste volgens mijn berekening neerkomt op respectievelijk: antimoon, goud, zink, molybdeen en renium.

Deze zullen tussen nu en dertig tot honderd jaar uitgeput zijn. Een gevoeligheidsanalyse, die deel uitmaakte van mijn onderzoek, laat zien dat, zelfs als we uitgaan van een delfstoffen-voorraad die tienmaal groter is, het gebruik van de vijf meest schaarse stoffen in geïndustrialiseerde landen nog steeds



Afb. 4. Prijschommelingen van schaarse (blauw), minder schaarse (rood) en niet-schaarse (groen) delfstoffen. Schaarse mineralen: antimoon, zink, goud, molybdeen en renium. Gemiddeld schaars: tin, chroom, koper, lood, bismut, arseen, ijzer, nikkel, cadmium, wolfram, bismut. Niet-schaars: aluminium, magnesium, mangaan, cobalt, barium, platina(-groep), kwik, selenium, vanadium, strontium, beryllium, gallium, germanium, lithium, niobium, tantalum. Bron: Theo Henckens.

aanzienlijk omlaag zou moeten. Reductie is noodzakelijk om voldoende van die delfstoffen te behouden voor toekomstige generaties. Dat geldt zeker als we deze eerlijker willen verdelen dan nu het geval is.

Bovendien zijn er op het gebied van milieu en energie grenzen aan het steeds maar dieper en verder naar mineralen zoeken in de aardkorst, die daar in steeds lagere concentraties aanwezig zijn.

Tijdshorizon

Je zou veronderstellen dat het algemene prijsmechanisme zou werken. Dit houdt in dat naarmate een delfstof schaarser wordt, de marktprijs stijgt. Van schaarse delfstoffen zou je op grond hiervan verwachten dat de prijs veel sneller stijgt dan die van overvloedig aanwezige delfstoffen. In mijn onderzoek kom ik tot de conclusie dat er tot dusver geen relatie is tussen de geologische schaarste van een mineraal en de prijsontwikkeling (afb. 4). Dit heeft te maken met de tijdshorizon die handelaars toepassen. Zo wordt op de London Metal Exchange slechts rekening gehouden met een delfstoffenvoorraad tot maximaal tien jaar, gerekend vanaf nu. Mijnbouwbedrijven kijken maximaal zo'n dertig jaar vooruit. Om schaarse delfstoffen voor latere generaties te kunnen behouden, zal echter langer vooruit moeten worden gekeken.

Ik verwacht dat er uiteindelijk voor de meest schaarse delfstoffen wel een structurele prijsstijging zal komen, maar waarschijnlijk pas als de delfstof nagenoeg is uitgeput.

Technologische mogelijkheden onbenut

Zijn mijn conclusies niet te somber? Als de nood aan de man komt, zal er vanzelf meer gerecycled worden of zal de efficiëntie in de productiefase wel toenemen, is vaak de redenering. Zo kan hergebruik van molybdeen, dat momenteel nog nauwelijks plaatsvindt, sterk worden opgevoerd door selectieve ontmanteling van apparaten, betere sortering van metaalschroot en op molybdeenrecycling gericht productontwerp. Alternatieve materialen kunnen worden ontwikkeld met dezelfde eigenschappen als de schaarse delfstoffen. Een voorbeeld daarvan is antimoon als vlamvertrager, dat dankzij innovatie kan worden vervangen door andere vlamvertragers.

Bij sommige schaarse delfstoffen is recycling al vergevorderd. Zink is daarvan een goed voorbeeld. Het wordt nu al voor dertig tot vijftig procent gerecycled, maar dat percentage groeit amper, terwijl dit technisch gezien wel goed mogelijk is. Recycling neemt echter niet toe als het prijsmechanisme niet werkt en zolang schaarse delfstoffen niet duurder worden. Hoe bereik je dat de technologische mogelijkheden voor recycling en vervanging ook feitelijk worden benut als er onvoldoende financiële druk vanuit de markt is? Ik ben van mening dat internationale overeenstemming noodzakelijk is om de winning van schaarse delfstoffen stapsgewijs te beperken. De schaarste wordt zo kunstmatig opgevoerd - feitelijk wordt uitputting gesimuleerd - zodat de markt vervolgens zijn werk kan doen.

Delfstoffenakkoord

In analogie met het vorig jaar in Parijs gesloten internationale klimaatakkoord constateer ik op grond van mijn promotieonderzoek dat er een delfstoffenakkoord moet komen, waarin afspraken worden vastgelegd over een duurzame winning van

schaarse delfstoffen. Ook moet daarin het legitieme recht van toekomstige generaties op een eerlijk deel van deze delfstoffen worden zeker gesteld. Dat betekent dat per delfstof een verlaging van de winning moet worden afgesproken: van 96 procent voor antimoon en 82 procent voor zink tot 45 procent voor bismut, ten opzichte van de winning in 2010.

Feitelijk is dit de concrete invulling van de duurzaamheidsprincipes die al eerder op wereldniveau zijn afgesproken voor de winning van niet-vernieuwbare delfstoffen, zoals de Stockholm-verklaring (Verenigde Naties, 1972), het Wereld Handvest voor de Natuur (Verenigde Naties, 1982) en het Handvest voor de Aarde (UNESCO, 2000). In het kader van de implementatie van Agenda 21 inzake Duurzame Ontwikkelingsdoelen (Verenigde Naties 2016) is dit principe opnieuw bevestigd.

Delfstof-exporterende landen zullen echter niet uit zichzelf wil-

len meewerken aan een vermindering van de winning op hun grondgebied, om zo de inkomsten uit de mijnbouw te behouden. Ik pleit er daarom voor om deze landen te compenseren voor inkomensverlies. Hiervoor moet een systeem worden ingevoerd waarbij een jaarlijks winningsquotum wordt vastgesteld, om te beginnen voor de meest schaarse mineralen.

Geen utopische gedachte

Mijn proefschrift geeft concrete invulling aan principiële beginselen voor een duurzame winning van delfstoffen, die al lang eerder zijn afgesproken in verschillende internationale verklaringen en handvesten en die keer op keer zijn bevestigd door opeenvolgende conferenties van de Verenigde Naties. Het klimaatakkoord gold aanvankelijk ook als een utopie, maar is nu toch werkelijkheid geworden. Datzelfde kan gebeuren met een delfstoffenakkoord.

Antimoon

Méer dan de helft van het gewonnen antimoon wordt toegepast in vlamvertragers, voornamelijk in kunststoffen in elektrische en elektronische apparatuur. Ruim een kwart vindt zijn weg in loodaccu's.

Goud

Goud wordt behalve in sieraden en als dekking voor papiergeld vooral toegepast in hoogwaardige schakelaars, connectoren en elektronische componenten.

Zink

De belangrijkste toepassing van zink is als coating op een ander metaal om roestvorming te voorkomen en in messing, zinken dakgoten, rubber banden en als nutriënt in varkensvoer.

Molybdeen

Molybdeen wordt voor bijna 80% gebruikt in hoogwaardige staalsoorten in constructies die worden blootgesteld aan extre-

me omstandigheden, zoals hitte, een zout milieu en agressieve chemicaliën. Molybdeen is nauwelijks te vervangen in zijn huidige toepassingen en de recycleerbaarheid is duur en complex, maar niet onmogelijk.

Renium

Renium wordt vooral gebruikt in staallegeringen die bestand moeten zijn tegen extreme hitte en kou en in katalysatoren in benzinemotoren.

Zeldzame aardmetalen

Schaarse delfstoffen moeten niet worden verward met de zeldzame aardmetalen, die vooral in China worden gewonnen: zeventien scheikundige elementen zoals praseodymium, dysprosium en lanthanum. Zeldzame aardmetalen - waarvan de naamgeving dateert van het begin van de 19e eeuw - zijn geologisch gezien niet schaars, als je de winbare voorraad afzet tegen het huidige jaarlijks gebruik. Dat zou in de toekomst natuurlijk kunnen veranderen.

Boekbespreking

Spiegelzee. De zeespiegelgeschiedenis van de mens, door Salomon Kroonenberg. Atlas Contact 2016, 272 pp. ISBN 9789045032962, €21,99.



Spiegelzee van Salomon Kroonenberg behandelt, zoals de subtitel al aangeeft, de veranderingen van de zeespiegel in de tijd dat de huidige mens op aarde is. Zijn verhaal begint daarom 120.000 jaar geleden, om en nabij de tijd van de eerste bewijzen van de aanwezigheid van *Homo sapiens* in Afrika en eindigt in de tegenwoordige tijd. In die tussenliggende periode verandert de zeespiegel voortdurend. In het begin van het verhaal, na de Saale-ijstijd, staat hij 6 m boven het huidige

peil om duizenden jaren later tijdens de laatste ijstijd 120 m lager te staan en dan weer snel te stijgen. Hoe kan dat? Wat zijn de oorzaken en hoe heeft de mens er toen op gereageerd? En hoe bepaal je eigenlijk of de zeespiegel stijgt of daalt? Of beweegt het land op en neer?

Die vragen komen aan de orde in dit vlot geschreven boek. Aan de hand van de sporen die de zee in het Eemien 120.000 jaar geleden overal ter wereld heeft achtergelaten, komt de lezer erachter dat het nog niet zo eenvoudig is om dat te bepalen. In Engeland ligt dat bewijs 6 m boven huidig zeeniveau, maar in Amersfoort 8 m eronder. Al vertellend in vijftien overzichtelijke hoofdstukken met voorbeelden uit verschillende delen van de wereld, uit eigen onderzoek en dat van anderen passeren er allerlei onderwerpen de revue. Tegelijkertijd is het een soort geschiedenisles van zich ontwikkelende inzichten.

In vroeger eeuwen wisten we niks van ijstijden, van zuurstof-isotopen of van dateringen en satellieten die oceaanoogtes tot op een paar mm nauwkeurig meten. We weten sinds 1842 dat er ijstijden zijn geweest en dat die verantwoordelijk waren voor die lage zeespiegelstand. Milankovic ontdekte dat astronomische cycli als oorzaak van die (inter-)glaciaties moeten worden gezien. We weten dat het voorlaatste interglaciaal een warme periode was, ook in Nederland, met schelpen waarvan de pendanten nu in de Middellandse Zee leven. Het wordt Eemien genoemd, een naam bedacht door Pieter Harting in 1874, die in de Eemvallei bij Amersfoort in een boring op diepte van die warm-

waterschelpen aantrof. Maar 150 jaar geleden was dat allemaal nog niet bekend. Na het afsmelten van de Scandinavische ijskap stelt de aarde het evenwicht weer in dat door het gewicht van die ijskap was verstoord. Na die Weichsel-ijstijd is Scandinavië langzaam gaan stijgen en is de zone ervoor, waar ook Noord- en Midden-Nederland liggen, juist gaan dalen. Daarom ligt de top van het Eemien in Amersfoort onder de grond en in Engeland, dat relatief stabiel is, op 6 m boven zeeniveau. Ten gevolge van het terugveren van de aardkorst stijgt België juist iets en daalt Amsterdam met 5 cm t.o.v. Maastricht.

Zeespiegelstijgingen en -daling bestudeert men tegenwoordig aan de hand van zuurstofisotopen in eencellige organismen uit de diepzee. Daaruit is af te lezen of die beestjes in een warme dan wel een koude periode hebben geleefd: weinig dan wel veel ijs en overeenkomstig zeeniveau. Het is overigens niet zo dat het eerst warm was en toen koud en nu weer warm. Kroonenberg legt uit - en laat dat ook in grafieken zien - dat er voortdurend schommelingen optraden. Op kleine en op grote schaal met tijdspannen van tientallen jaren tot eeuwen. Zo is er de warme Romeinse klimaatpiek bij het begin van onze jaartelling en de Middeleeuwse warme periode omstreeks het jaar 1000, met daartussen een koude periode. En niet te vergeten de Kleine IJstijd van 1300-1850. Hij put uit zijn eigen onderzoek aan de veranderingen van het waterniveau van de Kaspische Zee. Hij legt uit dat de zeespiegelstijging wordt veroorzaakt door twee factoren. Door een hogere gemiddelde temperatuur van de atmosfeer warmt ook het oceaanwater op, dat daardoor uitzet en voor zeespiegelstijging zorgt. Men schat dat dit verschijnsel verantwoordelijk is voor de helft van de 19 cm stijging per eeuw. De andere factor die voor zeespiegelstijging zorgt, is het water dat vrijkomt door het afsmelten van de ijskappen en gletsjers. Kroonenberg haalt veel verschillende (inter-)nationale onderzoeken en onderzoekers aan. Nederlandse onderzoekers uit vroeger eeuwen, zoals Lulofs, Harting, Staring en Molengraaff, gingen ervan uit dat Nederland daalt en komen ook met berekeningen. Pas in de eerste helft van de vorige eeuw komen Van Veen en Kuenen tot de conclusie dat er behalve daling van het land ook stijging van de zeespiegel plaatsvindt. Die eerste bevindingen worden later gestaafd met de ontdekking van verdronken koraalterrassen. Na de laatste ijstijd stijgt de zeespiegel snel en verliest het land terrein. Wanneer vanaf zo'n 7000 jaar geleden de stijging afneemt - de ijskappen zijn dan afgesmolten - en er voldoende aanvoer van sediment is, gaan kusten uitbouwen. Zo zijn in West-Nederland de strandwallen gevormd waar nu o.a. het Binnenhof en Paleis Noordeinde op staan. Maar ook in andere delen van de wereld, zoals Suriname en rivierdelta's wereldwijd, bouwen kusten in die tijd uit. Dat gaat door tot 2500 jaar geleden. Er is niet genoeg zand meer om de kust verder uit te bouwen. De zee wint weer terrein. Wanneer Amsterdam in de 17e eeuw regelmatig wordt getroffen door overstromingen, besluit burgemeester Hudde om ijkpunten bij sluizen in te metselen en worden zo de waterhoogten gemeten en bijgehouden. Zo is de langste zeespiegelcurve ter wereld ontstaan. Die in 1932 stopt doordat Amsterdam door het afsluiten van de Zuiderzee niet langer aan zee ligt.

En de mens die past zich aan. Kroonenberg is daarvan over-

tuigd. Dat deden de Neanderthalers al, nog vóór de moderne mens Europa koloniseerde. Aan het soort werktuigen dat op het Kanaaleiland Jersey is gevonden, moet worden geconcludeerd dat hij op zoek ging naar andere grondstoffen om gereedschap van te maken, toen hij door zeespiegelstijging niet meer bij het vuursteen kon komen. Hij verliet zelfs zijn grot toen die onder water kwam te liggen, maar trok er weer in zodra de zeespiegel weer ging dalen. *Homo sapiens* verhuisde naar rivierduinen als het te nat werd en ging in Noord-Nederland, waar de bodemdaaling het grootst is, terpen bouwen om droge voeten te houden. In tijden dat de zee hoog stond, verlieten de mensen in Zuid-Afrika hun grotten en kregen een ander eetpatroon. Door het droogvallen van de zeestraat tussen Azië en Noord-Amerika trok de mens verder.

Al lezende worden er talloze uitstapjes gemaakt die allemaal te maken hebben met die zeespiegelschommelingen. Teveel om op te noemen eigenlijk. Eén zo'n uitstapje voert de lezer naar Zuidoost-Azië. In het Weichsel is daar Soendaland ontstaan: Java, Sumatra en Borneo zitten vast aan Azië doordat de tussenliggende zee, die slechts 70 m diep was, is drooggevalen. Op de bodem van die zee heeft zich een rivier gevormd: de Molengraaff-rivier, genoemd naar de beroemde Nederlandse geoloog uit het begin van de vorige eeuw. Die rivier heeft zich zo'n 40 meter diep in de bodem ingesleten: ongeveer tot op het laagste niveau dat de zee in de Weichsel-ijstijd heeft gekend. In dat riviersysteem is tin afgezet dat nog steeds wordt gemijnd door Billiton.

Een ander uitstapje gaat over Brittenburg, een Romeinse vesting uit 270 na Chr. die voor de huidige kust bij Katwijk moet hebben gelegen; in 1520 stak deze nog boven water uit, maar is nu verdwenen.

De Grote Aletsch-gletsjer in Zwitserland heeft net als de zeespiegel perioden van uitbreiding gekend die worden afgewisseld met tijden van afsmelten en korter worden. Zo'n 7000 jaar geleden was hij korter dan hij nu is.

In hoofdstuk 14, getiteld: "Er is nog niets aan de hand", gooit Kroonenberg de knuppel in het hoenderhok van de mainstream ideeën over klimaatverandering. Door de enorme uitstoot van broeikasgassen sinds 1900 zou de zeespiegel toch versneld moeten gaan stijgen; harder dan de normale stijging die sinds het einde van de Kleine IJstijd optrad. Onderzoekers van het Nederlandse Deltares concluderen echter dat het nog te vroeg is om van een versnelde zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust te spreken. Daar zijn Duitse en Amerikaanse onderzoekers het mee eens voor hun deel van de kust. Slechts een enkele onderzoeker constateert wel een versnelde stijging. Kroonenbergs conclusie: de invloed van de uitstoot van broeikasgassen op de zeespiegel is tot nu toe onzichtbaar.

Spiegelzee herbergt heel veel illustraties, foto's, grafieken en kaarten die echter niet allemaal goed leesbaar zijn. Wil je meer van dit onderwerp weten: een register en een uitgebreide literatuurverwijzing per hoofdstuk maken dat mogelijk.

Kees de Jong
redactie.dejong@gea-geologie.nl