

Thorium als energiebron

Vergeten kernreactor uit vorige eeuw komt opnieuw in beeld

door Imme de Bruijn, Delden, Ov.
immedebruijn@gmail.com

In een tijdschrift gewijd aan de geologie wordt gewoonlijk gesproken over zaken als erts en andere delfstoffen, waar en hoe deze gevonden worden, en in welke samenstelling of kristalvorm. Zelden zal er in deze context over de technische toepassing van één element worden uitgeweid. Hier gebeurt dat wel, over het element thorium, waaraan in het nummer van september 2015 al een artikel was gewijd.*

Thorium versus uranium

Thorium is de moeite waard. Nadat decennialang weinig met thorium was gebeurd, bleek het in de jaren '60 van de vorige eeuw bruikbaar te zijn als energiebron, in een kernreactor. Het enige andere element dat op aarde voorkomt en ook 'brandstof' in een reactor kan zijn, is – zoals bekend – uranium. De reactorfysicus Alvin Weinberg (afb. 1), eerder al betrokken bij de ontwikkeling van de meest voorkomende uraanreactor, de Pressurized Water Reactor (PWR), ontwikkelde een thoriumreactor (afb. 2). Een prototype hiervan draaide vijf jaar in Oak Ridge, VS. Omdat de Amerikaanse overheidsfondsen volledig werden ingezet voor het uraantraject, werd het thoriumreactorproject al na vijf jaar stopgezet. De reden dat de overheid voor uraan koos: in uraanreactoren kan plutonium worden gekweekt, in thoriumreactoren niet. Plutonium was nodig voor kernwapens. Ongeveer veertig jaar is het daarna stil geweest rond de thoriumreactor. Maar toen kwam hier en daar het besef boven dat de thoriumreactor wel eens de weg kon zijn naar veel veiliger kernenergie dan met de uraanreactoren mogelijk was. Dat ondanks het feit dat reactorbouwers al tientallen jaren bezig waren hun ontwerpen te verbeteren en veiliger te maken. Bovendien bleek, dat de aardse voorraden thorium veel meer energie kunnen leveren dan de voorraden uraan, dat afkomstig is uit uraan (of uranium-)erts. Eén en ander zullen we hieronder duidelijk maken.



Twee typen reactoren

Uranium

Een kernreactor werkt volgens het principe dat kernen worden gespleten door rondvliegende neutronen. Bij splijting komen grote hoeveelheden

Afb. 1. Alvin Weinberg (1915-2006) in 1960, geestelijk vader van de thorium-MSR. Foto: Wikimedia Commons via CCO (publiek domein).



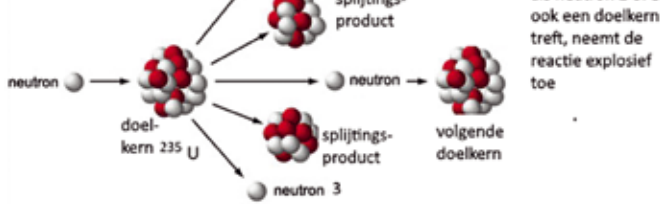
Afb. 2. Alvin Weinberg constateert dat zijn prototype van de MSR 6000 uur gedraaid heeft (1970). Foto: Wikimedia Commons via CCO (publiek domein).

energie vrij, waardoor in eerste instantie de kernmaterialen heet worden. Aangezien bij elke splijting twee of drie nieuwe neutronen worden gevormd, kan het proces zichzelf onderhouden of zelfs explosief toenemen zodat een kettingreactie kan optreden (afb. 3). Naast de nieuwgevormde neutronen worden kernen van twee minder zware elementen gevormd, bijvoorbeeld barium en krypton, die radioactief zijn: de zogenaamde splijtingsproducten. Een kernreactor is zo ontworpen, dat de hierin optredende reactie wordt gecontroleerd en het aantal neutronen globaal hetzelfde blijft: dat noemt men de kritische toestand. In zo'n toestand leveren de splijtende kernen een bepaald vermogen aan warmte. Door hiermee stoom te vormen en dan een turbine en een generator aan te drijven, wordt energie in de vorm van elektriciteit opgewekt. Afb. 4.

In een uraanreactor is de splijtstof uraan-235, één van de twee in erts voorkomende isotopen (0,7%); het andere isotoop is uraan-238 (99,3%). Meestal is het reactorvat een waterbasin, waarin de staven met het werkzame uraan hangen; tevens

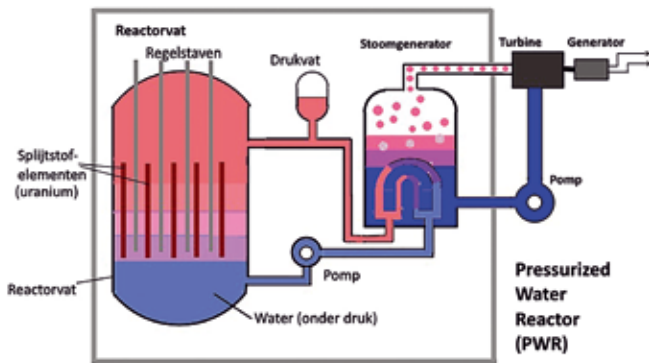
Op 16 oktober a.s. zal de auteur een lezing geven over de thorium-MSR in Geologisch Museum Hofland te Laren. Meer informatie op www.geologischmuseumhofland.nl/activiteiten/Derde-zondag-van-de-maand-lezingen_2016

Kettingreactie met Uraan



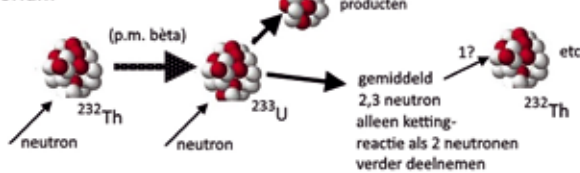
Afb. 3. Kettingreactie met uraan.

hangen er regelstaven in, die neutronen kunnen wegvangen en zodoende de reactie controleren. Het water fungeert als medium waarmee de warmte wordt afgevoerd en tevens als 'moderator': de stof die de neutronen afremt, waardoor ze de kettingreactie beter onderhouden. Een reactor kan met natuurlijk uraan, met slechts 0,7% van het werkzame uraan-235, niet kritisch blijven, er lekken te veel neutronen weg. Na verrijking van de splijtstof, tot bijvoorbeeld 5% U-235, werkt het wel. Een 'bijwerking' in deze reactor is dat de neutronen ook het rijkelijk aanwezige uraan-238 treffen en dit, na enkele tussenstappen, omzetten in plutonium.



Afb. 4. Schema uraanreactor: de Pressurized Water Reactor (PWR).

Kweekreactie met thorium



Afb. 5. De kweekreactie met thorium.

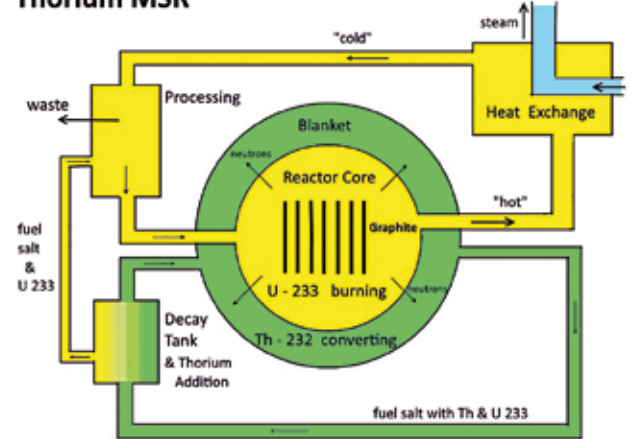
Het is gunstig om het water in het reactorvat onder druk te houden, zodat het niet gaat koken. Daarvoor moet de druk in de praktijk zo'n 150 bar zijn. Dit is de hierboven genoemde *Pressurized Water Reactor* (PWR). In een tweede vat wordt de stoom gevormd die de turbine aandrijft. In een ander type reactor, de *Boiling Water Reactor* (BWR), is de druk 70 bar, mag het water wel koken en is een tweede vat voor stoomopwekking niet nodig. Niettemin kan de PWR compacter worden gebouwd; dat is de reden waarom dit type in onderzeeërs wordt gebruikt.

Thorium

Kernenergie winnen uit thorium gaat volgens een iets ander principe en in een geheel ander soort reactor. Het principe is dat eerst thorium-232 een reactie aangaat met een neutron en – met enkele tussenprocessen – het isotoop uraan-233 op-

levert. Afb. 5. Dit heeft een halfwaardetijd van 160.000 jaar en kan dus worden bewaard. Gezien de ouderdom van de aarde zal het echter niet in de natuur voorkomen. Na interactie met een neutron kan uraan-233 splijten, waarbij het gemiddeld 2,3 neutronen 'nalevert' en vergelijkbare splijttingsproducten als uraan-235. De reactor waarin één en ander wordt gerealiseerd, is geschetst in afb. 6.

Thorium MSR



Afb. 6. Schema van de thoriumreactor: de Molten Salt Reactor (MSR)

Het is een zogenaamde gesmoltenzoutreactor, of *Molten Salt Reactor* (MSR). Hierbij zijn de werkzame elementen (de kweekstof thorium-232 en de splijtstof uraan-233) opgelost in een heet, vloeibaar zout. Hiervoor wordt een mengsel van lithiumfluoride en berylliumfluoride toegepast, dat in een traject van ongeveer 300°C tot 800°C vloeibaar is. Dit zout doet mede dienst als medium waarmee de ontstane warmte wordt afgevoerd. Het reactorvat bestaat uit een kern, waarin meer U-233 dan Th-232 zit en waar de splijting voornamelijk plaatsvindt, en een 'deken' eromheen, waar de Th-232 onder invloed van neutronen wordt omgezet in U-233. In de kern bevindt zich grafiet, als moderator. Dit is nodig omdat het zout niet werkt als moderator. Het zout wordt rondgepompt in een eerste circuit, waarbij op een zeker punt het uraan wordt gescheiden van het thorium en het uraan naar de kern wordt gevoerd. In dit circuit wordt ook nieuw thorium toegevoegd. In een ander circuit wordt het hete zout door een warmtewisselaar gevoerd, waarin stoom wordt opgewekt. In dit circuit vindt ook *processing* van het zout plaats, waarbij schadelijke splijttingsproducten worden verwijderd.

In de MSR wordt voor veiligheidsdoeleinden een *frozen plug* toegepast. Dat is een leiding waardoor het gesmolten zout, met al het radioactieve materiaal kan afstromen naar tanks, waarin het direct stolt en ongevaarlijk is. De leiding wordt afgesloten door een plug van materiaal, dat bij kamertemperatuur (en daarboven) vloeibaar is. Het zout blijft alleen in de reactor zolang de plug actief gekoeld wordt en vast blijft. Valt de stroom uit, dan stroomt de reactor vanzelf leeg.

Het is minder eenvoudig dan bij uraan om de reactor kritisch te houden. Van de gemiddeld 2,3 neutronen per splijting is er immers één nodig voor de omzetting van thorium in uraan en één voor de splijting van uraan. Er mogen er dus niet te veel wegraken, bijvoorbeeld door absorptie in de wand van de reactor of door invangen in de kernen van het zout. Benadrukt moet worden dat deze thorium-MSR anno 2016 alleen nog op de tekentafels bestaat. Reactortechnologen bedenken 'op papier' hoe een installatie, waarin het hiervoor geschetste proces optimaal kan werken, moet worden opgezet en wat de details van de constructie moeten zijn. De MSR kan niet alleen gebruikt worden voor branden van tho-

rium. Leslie Dewan en Mark Massie, twee jonge onderzoekers van het Massachusetts Institute of Technology (MIT), hebben twee andere toepassingen bedacht (afb. 7). De eerste is een uraniumreactor waarin de uraniumzouten gesmolten zijn, wat een temperatuur van minimaal 500°C vergt. Hun tweede idee is het opstoken van radioactief afval in een gesmoltenzoutreactor. Er ligt in de VS het nodige van dit soort afval. Niet alleen is dit een manier om de troep op te ruimen, het kan ook jarenlang een aanzienlijke bijdrage leveren aan de energievoorziening.



Afb. 7. Leslie Dewan en Mark Massie, MSR-onderzoekers bij MIT.
Bron: MIT. Publicatie met toestemming van MIT.

Vergelijking van thorium en uraan als brandstof

We noemen uraan-235 en thorium-232 'brandstof' omdat dit de elementen zijn die de reactie in de beide genoemde reactoren voeden. Zoals vermeld is uraan-235 een splijtstof en thorium-232 een kweekstof. Het gebruik van thorium heeft meerdere voordelen. Ik noem er hier vier:

- Thorium komt, op grond van huidige kennis van voorraden, een factor vier meer voor op aarde dan uranium. Er zijn mijnen waar jarenlang delfstoffen zijn gewonnen en (toen nog) onbruikbaar thoriumhoudend afval terzijde is gelegd. Bovendien bevatten deze delfstoffen een hoog percentage thorium-232. Zoals vermeld bevatten uraniumvoorraden slechts 0,7% uraan-235. Dit scheelt nog eens een factor in de orde van 100. Een voorbeeld: Als de kernreactor van Borssele zou worden vervangen door een thoriumreactor van gelijk vermogen, zou deze slechts 500 kg (0,5 ton) thorium per jaar gebruiken. Voor dezelfde energieopbrengst is 17 ton verrijkt uraan nodig, dat uit ongeveer 120 ton natuurlijk uraan verkregen kan worden.
- Een tweede voordeel van thorium is dat er in een reactor geen plutonium als bijproduct wordt gevormd. Ook worden andere transuranen, die in een uraanreactor ontstaan en als nucleair afval zeer ongewenst zijn, in de thoriumreactor niet gevormd. Dat komt enerzijds doordat er geen uraan-238 aanwezig is. Anderzijds wordt het proces, waarbij zware kernen door interactie met neutronen steeds zwaardere kernen opleveren, in de thoriumreactor onderbroken. Er kan weliswaar uit uraan-233 met enkele stappen uraan-235 ontstaan, maar dat zal in een omgeving met veel neutronen splijten en geen nóg zwaardere kernen opleveren.
- De splijtingsproducten van thorium leveren minder lang radioactieve straling. Waar de halfwaardetijd van splijtingsproducten bij uraan ca. 50.000 jaar kan bedragen, is dit bij thorium ongeveer honderd jaar. Na circa 300 jaar is het afval nagenoeg 'uitgestraald' en dus niet meer radioactief. Dat is een voor de mens overzienbare periode. Samenvattend is de problematiek van het radioactief afval, en de opslag ervan, bij thorium veel minder groot dan bij uraan.
- Ten slotte hoeft thorium niet te worden verrijkt. Bij gebruik van uraan moet het ruwe materiaal, uit delfstoffen, eerst worden verrijkt voordat het in de reactor gaat.

Vergelijking van de thorium-MSR en de uraanreactor

De constructie van de uraanreactor, die kan worden beschouwd als 'een vat met water met daarin splijtstofelementen', brengt de nodige problemen met zich mee die de thorium-MSR niet kent. Hieronder noem ik de belangrijkste vijf voordelen van de constructie van de thoriumreactor:

- De uraanreactor staat onder hoge druk (70 bar bij de BWR, 150 bar bij de PWR), terwijl de thoriumreactor bij normale, atmosferische druk werkt.
- In de uraanreactor treden zeer hoge temperaturen op als de omstandigheid zich voordoet dat plaatselijk de afvoer van warmte - de koeling dus - stagneert. Bij circa 2000°C kan dit leiden tot dissociatie van watermoleculen in waterstof en zuurstof. Beide gassen, samen knalgas vormend, verzamelen zich in de koepel van de reactor en kunnen bij een kleine vonk exploderen. Dat proces is in de thorium-MSR niet mogelijk, omdat er geen water in zit.
- De plaatselijke oververhitting kan zich in het slechtste scenario door de hele reactor uitbreiden, waardoor de gehele constructie kan smelten en in de grond wegzakken; dit is de welbekende en gevreesde *meltdown*. Dit gevaar kan bij de thorium-MSR niet optreden omdat daar met de eerder genoemde *frozen plug* in een soort gecontroleerde meltdown is voorzien.
- De uraanreactor moet met enige regelmaat worden stilgelegd om de splijtstofelementen te vervangen, waarmee ook de daarin verzamelde radioactieve verontreiniging wordt afgevoerd. De 'vuile' splijtstofstaven worden in een aparte fabriek opgewerkt. Bij de thorium-MSR zijn de voeding met nieuwe brandstof en de afvoer van splijtstofafval continue processen, waarbij de reactor in bedrijf blijft. Wel is het noodzakelijk dat, ongeveer eens per vijf jaar, het als moderator gebruikte grafietpakket wordt vervangen, omdat dit ook verontreinigd raakt. Hier is dus geen installatie voor opwerking nodig en de bedrijfscyclus (de fractie van de tijd dat de reactor in bedrijf is) is gunstiger.
- Beide reactoren hebben verschillende regelmechanismen. Bij de uraanreactor is een groot aantal beveiligingssystemen nodig om de reactor precies kritisch te houden. De thorium-MSR heeft minder van deze systemen nodig en is in hogere mate zelfregelend. Dat komt doordat het gesmolten zout bij temperatuurverhoging merkbaar uitzet, waarmee de concentratie van de splijtstof afneemt. Dergelijke mechanismen zijn er bij de uraanreactor ook, maar daar werken ze minder betrouwbaar.

Eén probleem treedt bij beide reactortypen op: dat van de proliferatie. Dat is het risico dat materiaal uit de reactor in handen valt van schurkenstaten, die er dan een kernbom van zouden kunnen maken. Bij uraanreactoren gaat het daarbij om plutonium, bij thoriumreactoren om uraan-233. Hoe zwaar dit weegt is onderwerp van discussie. In elk geval zijn er wel plutoniumbommen gemaakt, maar nog geen bommen met uraan-233.

Ontwikkeling van een thoriumreactor

De vele voordelen van de thorium-MSR ten opzichte van de uraanreactor geven stevige argumenten om de thorium-MSR van Alvin Weinberg te herontwikkelen. De gedachte is dat thorium op den duur een (grote) rol kan spelen in de zo gewenste energietransitie. Kernenergie, ook met uraan overigens, wordt opgewekt zonder productie van het broeikasgas CO₂ en neemt daarmee onder de fossiele brandstoffen een unieke plaats in. Er is momenteel echter in brede kring zoveel weerstand tegen kernenergie, dat de politieke beslissing om het probleem van de energievoorziening-zonder-CO₂ met kernenergie op te lossen nog niet in zicht lijkt.

Onder voorstanders van kernenergie heeft bovendien de mening postgevat dat moderne uraanreactoren, van de zogenaamde vierde generatie, al wel veilig genoeg zijn. Tevens meent men dat met recente vondsten van uraanhoudende erts de schaarste aan uraan voorlopig van de baan is. Geschat wordt dat de wereld met uraan nog zo'n honderd jaar van energie kan worden

voorzien. Met thorium is dat vele malen meer.

Aan de thoriumtechnologie zijn ook nadelen verbonden. In de eerste plaats is het geen *proven technology*, zoals bij uraan. Ook zijn er nog geen goede materialen die resistent zijn tegen de zeer reactieve, hete fluorzouten.

Tot de herontwikkeling van de thoriumreactor is niettemin reeds op verschillende plaatsen besloten. De mogelijkheid van relatief veilige kernenergie, met minder nadelen dan de veiligste uraanreactor, wil immers niemand missen. In China, de VS en Canada zijn al enige tijd projecten gaande, met aanzienlijke overheidsfondsen en deels met medewerking van deskundigen van het eerste uur uit Oak Ridge (die inmiddels wel bejaard zijn). Ook in Europese landen zijn dergelijke *startups* ingezet en in Nederland zijn fondsen verstrekt aan de TU te Delft voor verkennend onderzoek. Deze TU heeft in 2015 in de persoon van J.L. Kloosterman een hoogleraar benoemd om dit onderzoek te stimuleren en te coördineren. De enigszins in onbruik geraakte kernreactor te Petten bleek bruikbaar om deelaspecten van de thoriumtechnologie te onderzoeken.

In Europa werken de betrokken landen intensief samen, waarbij Nederland een rol speelt als centrum voor *know how*. De nadruk in de verkenningen ligt bij het ontwikkelen van materialen die niet corroderen onder invloed van de hete, agressieve fluorzouten in de MSR.

De eerder genoemde onderzoekers Dewan en Massie denken in 2020 een demonstratieversie van de MSR te kunnen presenteren. Geen thoriumreactor, maar een reactor waarin uranium of radioactief afval als brandstof wordt gebruikt. Tot slot wil ik hier het project van de Amerikaan Kirk Sørensen noemen, die een onderneming leidt waar men omstreeks 2024 een werkend prototype met thorium denkt, of hoopt, te hebben. Die datum denkt

hij echter alleen te halen wanneer zijn project meer prioriteit en meer fondsen krijgt.**

Nederlandse deskundigen zijn van mening dat niet eerder dan in 2035 een thoriumreactor in bedrijf kan zijn die substantieel bijdraagt aan de landelijke energieopwekking. Misschien dat met aanzienlijk meer fondsen dit proces enigszins kan worden versneld.

Er ligt nog wel een klus voor overheden en de politiek. De regelgeving voor nucleaire installaties is thans toegesneden op de uraantechnologie. Zou nu een vergunning worden aangevraagd voor een thorium-MSR, dan moet worden voldaan aan voorwaarden die niet van toepassing zijn op een thoriumreactor. Zo zouden bijvoorbeeld veiligheidssystemen worden vereist wegens werken onder hoge druk, terwijl – zoals eerder uitgelegd – de thorium-MSR onder normale, atmosferische druk werkt. Aangepaste regelgeving voor reactoren van het nieuwe type is dus noodzakelijk. Internationaal wordt dit als een zeer belangrijk probleem gezien, zoals bleek op een symposium in april 2015 te Delft.*** Het verslag van dit symposium beveel ik aan als bron voor diegenen die zich verder willen verdiepen in de thorium-MSR.

*) A.J. (Tom) van Loon: Thorium, onuitputtelijke energiebron maar dun gezaaid in mineralenverzamelingen. *Gea* 2015-3, p.74-76.

***) www.peakprosperity.com/podcast/86787/kirk-sorensen-update-thorium-story

****) <http://climategate.nl/2015/04/28/thorium-msr-delft-2015-overtuigend-succes/>

Afbeeldingen van de auteur, tenzij anders aangegeven.

Boekbespreking



Steengoeie wandelingen. 10 geologische wandelingen langs gevels en groeves, door Hans Oude Nijhuis. Uitgeverij Gearandeerd Onregelmatig 2016. 128 pp. ISBN 978 90 78641452. Prijs € 14,95.

Heeft u het Gelders Geologisch Museum in Velp wel eens bezocht? Als dat niet zo is, dan is deze nieuwe publicatie een goede aanleiding. 'Steengoeie wandelingen' bevat tien wandelingen op (soms) verrassende locaties in Nederland. Zoals Velp.

Op de introductiepagina lezen we dat Velp afkomstig is uit het Keltisch: de

'vel' van falwa en de 'p' van apa, resp. Keltisch voor een speciale waterkleur en Keltisch voor water. En dat karakteriseert meteen het boekje: behalve geologische informatie bevat het ook veel (historische) feitenkennis en gegevens over de architectuur langs de routes.

Behalve Velp komen ook steden aan bod waar eerder uitgebreide stadsgeologische boeken over zijn verschenen, zoals Utrecht en Rotterdam. Maar het boekje van Hans Oude Nijhuis (hij studeerde geologie) is praktisch omdat het beknopt is en in je jaszak past – voor je broekzak is het net iets te groot. Ook be-

vat het geologische basisinformatie, zoals de gesteentecyclus in het kort en de geologische tijdschaal. Handig om na te zoeken als je onderweg bent. De geologische tijdschaal kun je niet vaak genoeg bekijken en herhalen.

Oude Nijhuis koos behalve voor natuursteen-schoon in steden ook voor qua natuursteen minder bekende locaties, zoals de grensplaats Lobith (rijk aan grindgroeves) en Rijssen (rijk aan leemputten), en zelfs voor het Waddeneiland Terschelling. Op dit eiland neemt hij veel monumenten, kerken en metselwerk onder de loep, en de dijk van olivijnrijke basalt. Dat mineraal zal de auteur vanzelfsprekend niet ontgaan, want Oude Nijhuis begeleidt geologische wandelingen naar onder meer het vulkanische Lanzarote.

Het boekje neemt de wandelaar bij de hand. Hoewel ik nog geen wandeling heb uitgeprobeerd, lijkt het moeilijk verdwalen met deze nieuwe uitgave van Gearandeerd Onregelmatig, een uitgever die zich specialiseert in originele wandelgidsen. Iedere wandeling voorziet in een gedetailleerde kaart, met tussen de tien en twintig *points of interest*. De fotografie had wat gedurfter gemogen. Maar het boekje is verzorgd, kleurrijk, er is duidelijk veel werk aan besteed en zal veel wandelaars – ook hen voor wie geologie nog een onontgonnen gebied is – inspireren.

Annemieke van Roekel
Redacteur *Gea*