

Radioactieve mineralen (deel 2)

Het ontstaan van uraniummineralen, mijnbouw en belangrijke vindplaatsen

door Hans van 't Zelfde

voorzitter.gea@gea-geologie.nl

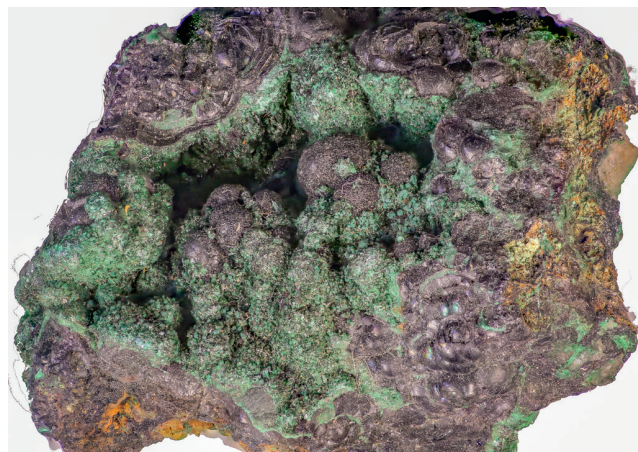
► Afb 1. Uraniniet (peklende), Musonoi Mine, Kolwezi district, D.R. Congo. Afmetingen 3,5 cm x 3,0 cm. Gemeten straling met de GMC-320 Plus varieert van 0,09 tot 0,17 μ Sv/uur. Het variëren in de hoeveelheid gemeten straling komt door de zogenaamde "dode tijd" waarin het mineraal geen straling uitzendt. Dit heeft te maken met de gevoeligheid en nauwkeurigheid van de geigerteller. Verzameling en foto van de auteur.

In dit tweede artikel in de vierdelige reeks over radioactieve mineralen ga ik in op de mijnbouw en een aantal voor de verzamelaar belangrijke vindplaatsen van uraniummineralen, zoals in Duitsland, Tsjechië en de Democratische Republiek Congo. Deel 1 is gepubliceerd in Gea september 2020.

Hoe worden uraniummineralen gevormd? Samen met alle zwaardere elementen met een atoommassa die hoger is dan dat van ijzer (Fe) wordt uranium (U) van nature gevormd bij supernova- en neutronsterfusies door een proces dat 'snelle neutronenvangst' wordt genoemd. Snelle neutronenvangst is het proces waarbij een atoomkern snel genoeg neutronen invangt. De vorming van elementen zwaarder dan ijzer vereist een nóg hetere omgeving, waar veel vrije neutronen zijn. Snelle neutronenvangst komt in het heelal alleen voor in extreme omgevingen, zoals bij botsingen tussen twee neutronensterren, waar atomen worden gebombardeerd met enorme aantallen neutronen en supernova's. Een supernova is een oude ster die aan het einde van zijn leven ontploft en daarbij bijzonder veel licht uitstraalt. Een bekend restant van een supernova is de Krabnevel, ook bekend als M1, in het sterrenbeeld Stier (Taurus). Zwaardere elementen in de aardkorst zijn schaars omdat deze extreme omstandigheden in het heelal niet vaak voorkomen (EOS, 2017; Gressman, 2018). Het percentage uranium (atoomnummer 92) in de aardkorst is dan ook zeer beperkt: minder dan 0,09%. In de aardkorst is overigens meer uranium te vinden dan de zware metalen goud (atoomnummer 79) of kwik (atoomnummer 80) (Lauf, 2008).

Uranium

Het element uranium is in 1789 ontdekt door de Duitse scheikundige Martin Heinrich Klaproth in het toen nog onbekende mineraal



uraniniet (UO_2). Uranium is genoemd naar de planeet Uranus, die in 1781 is ontdekt. Uraniniet wordt ook wel peklende (in het Duits Pechblende) genoemd. "Pech", omdat het een mineraal was dat men in de eerste instantie niet dacht te kunnen gebruiken men hoopte immers een zilvererts te vinden. (Stark, 2019). Een andere verklaring voor het woord "Pech" is het feit dat het een pek-achtige glans vertoont (Rösler, 1980). Het begrip blende werd als spotnaam gebruikt voor mineralen met een laag metaalgehalte of voor mineralen die onbruikbaar waren en daardoor verdere ertsverwerking nadelig beïnvloedden (Tambuyser, 2013). In de 18e eeuw was nog niet bekend dat uranium ioniserende straling uitzendt en dus radioactief is. Een andere naam voor peklende is "muizenooigjes", omdat uraninietbolletjes door weerkaatsing van het licht lijken op glinsterende muizenooigjes (afb. 1). De zoektocht in de VS naar en ontginning van uraniumertsen begon aan het begin van de 20e eeuw. Het bleek dat het element radium gewonnen kon worden uit uraniumerts. Julius Robert Oppenheimer (1904-1967) ontdekte in 1939 in opdracht van de regering van de VS dat het uraniumerts gebruikt kon worden voor het ontwikkelen van een atoombom. Dit project, onder de bezielende leiding van generaal Leslie Groves, werd het Manhattanproject genoemd. Het meeste uranium dat voor de atoombom, genaamd Little Boy, die op 6 augustus 1945 op Hiroshima werd gegooid, werd gebruikt, werd door de Belgische regering vanuit Belgisch-Congo (de Shinko-



lobwe-mijn, afb. 2) geleverd (NWS, 2020). Rond 1960 nam de behoefte aan uranium voor militaire doeleinden in de VS af door de nucleaire ontwapening. De behoefte aan uranium voor gebruik in kernreactoren en medische toepassingen nam toe. Uranium kon daarom als een medisch-strategisch element worden gezien. Het militair gebruik leefde weer op door het gebruik van uranium in granaten. Door de hogere soortelijke massa (dichtheid) van uranium, drongen granaten met uraan beter door het staal van een gepantserd militair voertuig.

Ontginning

Bij het winnen van een erts zijn tegenwoordig drie punten van belang. Ten eerste de primaire winningskosten zoals het ontsluiten van de vindplaats, als tweede de hoeveelheid energie die nodig is voor het winnen en als derde de uitstoot van CO₂.

Er zijn twee manieren waarop de winbaarheid van een mineraal wordt beoordeeld. Als eerste de ontginningsgraad d.w.z. het gemiddeld percentage uranium in het erts. Bij hogere ontginningsgraden, waarbij het erts meestal dieper in de aardbodem ligt, moet er een mijn worden aangelegd, wat kostbaar is (De Kinder, 2011). Al vanaf een ontginningsgraad van 0,01% is het economisch mogelijk

uranium te ontginnen door te werken met “in situ leaching” of oplossingsmijnbouw (zie verderop) (Slingerland et al., 2006).

De tweede manier om te beoordelen of uranium economisch winbaar is, is niet de ontginningsgraad, maar zijn de kosten per gewonnen kg uranium. Lauf (2016) onderscheidt vier gradaties: minder dan \$40/kg, minder dan \$80/kg, minder dan \$130/kg en minder

dan \$260/kg. De duurdere winningsmethoden worden minder populair door de hoge kosten per kilogram in vergelijking met de prijs per kilogram.

Door de ramp in het Japanse Fukushima in 2011 leek uraniumindustrie in elkaar te storten. Zowel Duitsland als Japan schortte hun nucleaire plannen op met als gevolg dat de prijs per kilogram uranium sterk zakte. Een kilogram uranium kostte in 2016 \$36. In 2011 kostte daarentegen een kilo uranium \$144. Sinds november is de prijs echter weer gestegen door het feit dat nucleaire energie als een mogelijke oplossing van het CO₂-probleem wordt gezien (Witvliet, 2020).

Een aantal uraniumgroeves en mijnen wereldwijd, worden dan ook “in de mottenballen” gezet tot dat de prijs weer gestabiliseerd is op een eerder niveau (Lauf, 2017). Een slapende mijn of een mijn die “in de mottenballen” wordt gezet is een mijn die niet wordt gesloten of dichtgegooid zoals het Krunkelbachtal Uranium deposit in Menzenschwand maar indien noodzakelijk direct weer gebruikt

kan worden voor het winnen van uraniumerts. Op dit moment is de tendens dat vanwege de klimaatproblematiek wordt gedebatteerd om kerncentrales te bouwen, waardoor de vraag naar uranium zou kunnen toenemen.

Uranium wordt onder meer gevonden in zandsteen (open pits), in aders die in graniet (in het Duits spreekt men over “Bärhaldegranit” (Markl & Wolfsried, 2011, Hofmann, 1979)) en syeniet pegmatieten voorkomen of in het stollingsgesteente carbonatiet wat uit voor meer dan 50%

◀ Afb. 2. Oude prent-briefkaart van de Shin-
kolobwe-mijn. De zgn.
radiummijn leverde in de
jaren 1920 bijna 80% van
al het radium in de
wereld. wereld. Opmer-
kelijk is dat uit de tekst
op de kaart blijkt dat er
voor het uranium in eer-
ste instantie geen
belangstelling was.
Bron: NWS, met
toestemming.



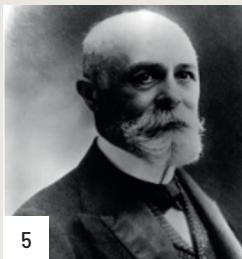
▲ Afb. 4. Het Krunkel-
bachtal Uranium deposit
in Menzenschwand.
Foto: Franz Falkenstein
uit Das Uran vom Men-
zenschwand, Christian
Weise Verlag. Met
toestemming.



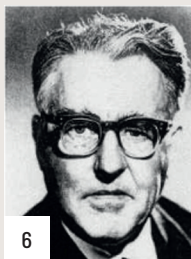
◀ Afb. 3. Uiteengevallen
francevilliet, Packerton
Junction, Carbon Co.,
Pennsylvania, VS. Geme-
ten straling met de GMC-
320 Plus varieert van
0,17 tot 0,34 μSv/uur.
Verzameling en foto van
de auteur.

uit carbonaten bestaat (Wikipedia, 2020). Na de Tweede Wereldoorlog werd in de VS eerst gestart met het, in de goedkopere dagbouw, makkelijk te ontginnen uranium. Deze zgn. dagbouw in open pits in zandsteen kunnen 100 m diep zijn. Het voorkomen van uraniummineralen in zandsteen verklaart o.a. de brosheid van sommige mineraalspecimen, zoals bijv. francevilliet $\text{Ba}(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, gevonden in de Packerton Junction, Carbon Co., Pennsylvania, VS (afb. 3). Daarnaast is uraniniet (UO_2) gemakkelijk oplosbaar in doorsijpelend water, waardoor secundaire uraniummineralen ontstaan. Dit is een verklaring voor het feit dat secundaire uraniummineralen vaak niet goed gekristalliseerd zijn (Markl & Wolfsried, 2011). In deel 3 van deze reeks wordt daar verder op in gegaan. In de VS, maar ook in bijv. Duitsland, zijn mijnbouwbedrijven daarna gestart met het

aanleggen van ondergrondse mijnen (afb. 4). De ontginningsgraad is hoger, omdat uranium voorkomt in een ader in een graniet of in een pegmatiet waarin het mineraal geconcentreerder voorkomt dan in zandsteen. Om ook uranium met een kleinere ontginningsgraad (uraniumgehalte van 0,01%) te winnen, wordt ter plekke een loogproces (“in situ leaching”) gebruikt. Hierdoor kan gesteente dat minder uranium bevat worden benut. Bij deze techniek wordt een loogvloeistof in voorgeboorde gaten gepompt en weer opgepompt met daarin het opgeloste uranium, waarna het wordt verwerkt (De Kinder, 2011; Lauf, 2016). De manier van werken, maar ook de milieunadelen, zoals de vervuiling van drinkwater, zijn te vergelijken met het frackingproces dat bij olie- en gaswinning wordt ingezet.



5



6



7

◀ Afb. 5. Antoine Henri Becquerel (1852-1908). Foto: Publiek domein.

Afb. 6. Louis Harold Gray (1905-1965). Foto: Publiek domein.

Afb. 7. Rolf Maximilian Sievert (1896-1966). Foto: Publiek domein.

Het meten van radioactiviteit

Ioniserende straling die wordt uitgezonden bij radioactief verval van instabiele atoomkernen, wordt ook vastgelegd door (afgeleide) eenheden van het internationaal geaccepteerde SI-eenhedenstelsel. De samenstelling van de kerndeeltjes bepaalt of het atoom stabiel is. Veel atoomsoorten zijn stabiel en zijn dan onderdeel van een materiaal zonder dat het atoom zelf verandert. De atoomkernen van radioactieve stoffen vervallen spontaan in andere kernen. Daarbij komt ioniserende straling vrij. Dit heet radioactief verval (zie ook deel 1). Een instabiel atoom zendt bij het vervallen ioniserende straling uit. Het nieuwe atoom kan stabiel of instabiel zijn. Als het nieuwe atoom ook instabiel is, zal het blijven vervallen tot het een stabiele samenstelling heeft. Materiaal dat radioactieve atomen bevat, wordt een bron (van ioniserende straling) genoemd. (Bos et al., 2000; Knoll, 2010).

Stralingsdeskundigen gebruiken drie eenheden voor het meten van ioniserende straling.

1. Radioactief verval wordt uitgedrukt in Becquerel (symbool: Bq), naar de Franse natuurkundige Henri Becquerel (1852-1908, afb. 5). Eén Bq komt overeen met het verval van één atoomkern (van radioactieve stof) per seconde. Tot 1960 werd als eenheid de Curie (symbool: Ci) gebruikt.
2. De hoeveelheid energie (vrijgekomen bij radioactief verval) die wordt geabsorbeerd in materie, wordt uitgedrukt in Gray (symbool: Gy), naar de Engelse natuurkundige Louis Harold Gray (1905-1965, afb. 6). Een gray is gelijk aan de absorptie van één joule (stralings)energie door een kilo-

gram materie (dus $1\text{Gy}=1\text{J/kg}$). De geabsorbeerde dosis in Gray is een maat voor de fysische effecten van ioniserende straling. Vroeger werd als eenheid de Rad (symbool: rad) gebruikt.

3. De biologische effecten kunnen variëren door het type straling en het type weefsel dat bestraald wordt. De biologische effecten zijn afhankelijk van de opgelopen equivalente dosis, die wordt uitgedrukt in mSv/jaar. De wettelijke limieten voor de toegestane blootstelling aan ioniserende straling worden dus uitgedrukt in Sievert per tijdseenheid. De eenheid Sievert is genoemd naar de Zweedse medisch natuurkundige Rolf Sievert (1896-1966, afb. 7). Tot 1960 werd de eenheid Rem (symbool: R) gebruikt. Omdat de Sievert een te grote eenheid is, wordt gebruik gemaakt van mSv (milli-Sievert) en μSv (micro-Sievert). Bij het meten van de straling van een verzameling is de eenheid $\mu\text{Sv/h}$ een eenheid die kan worden gemeten met een geigerteller.

Voor een mineralenverzamelaar, die één of twee radioactieve mineralen in zijn collectie heeft, zijn de werkelijk gemeten eenheden minder van belang, maar het is voor een verzamelaar die zich toelegt op mineralen uit bijvoorbeeld Zweden of de Congo goed om te weten wat een geigerteller aangeeft. De GMC-320 Plus, die kort besproken is in deel 1 van deze artikelenreeks (Gea september 2020), heeft de mogelijkheid om het aantal desintegraties, dat is het aantal keren dat een element vervalt zie deel 1 van deze reeks, van het radioactief element in het mineraal aan te geven bij hogere vervalsnelheden in cps (counts



▲ Afb. 8. Smart Geiger (teller) FTLab. Foto van de auteur.

of impuls per seconde) of in cpm (counts of impuls per minuut). Een goedkope geigerteller is de geigerteller Smart Geiger van FTLab (te koop voor ong. 30 euro bij bijv. de GeoRockShop), die aangesloten kan worden op iedere mobiele device (mobiele telefoon of tablet)(afb. 8). De telsnelheden van cps en cpm zijn handige praktische teltempo's. Deze telsnelheid is afhankelijk van de kwaliteit van het meetinstrument. Er is geen eenvoudige universele conversiefactor omdat de conversies instrument-specifiek zijn.

De totale efficiency van een geigerteller is afhankelijk van de detector, de energie van de straling, de soort straling, de geometrie van de detector, het detectierendement, het registratierendement, etc. (Bos et al., 2000). Het voordeel van de GMC-320 Plus is dat het teltempo in cpm naar $\mu\text{Sv}/\text{uur}$ wordt vertaald. Een oude zelfgebouwde geigerteller die alleen cpm, cps of zelfs alleen micro-ampères aangeeft, kan met bijv. een GMC-320 Plus beperkt geïk worden. Tevens wordt door de GMC-320 de gemiddelde waarde in $\mu\text{Sv}/\text{uur}$ aangegeven, waar-

mee eenvoudig de stralingsbelasting per jaar ongeveer kan worden berekend (gemiddelde $\mu\text{Sv}/\text{uur} \times 24 \text{ uur} \times 365 \text{ dagen}$). Deze waarde is van belang in verband met de wettelijke dosislimiet voor de verzamelaar. Voor publiek, dus ook voor verzamelaars, is de dosislimiet bovenop de achtergrondstraling 1 mSv/jaar. Zie ook grafiek 1, waarin de kritisch stralingsdoses in mSv/jaar zijn af te lezen. Elektriciteits Produktiemaatschappij Zuid-Nederland (EPZ) noemt het in deze grafiek "stralingsbescherming". Tevens is onder deze grafiek het kaartje van de GMC geigerteller afgebeeld, zodat een beoordeling van het gemeten stralingsniveau mogelijk is.

Bedenk hierbij dat er altijd achtergrondstraling zal zijn; deze bedraagt in Nederland tussen de 2,1 en 2,6 mSv/jr (Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming, 2020). Deze achtergrondstraling is deels van natuurlijke oorsprong aanwezig (gemiddelde waarden: in het lichaam zelf 0,40 mSv/jr, vanuit de kosmos 0,35 mSv/jr, in de woning gemiddeld 0,34 mSv/jr en in de aardkorst) en deels kunstmatig door het gebruik van medische diagnostiek (gemiddeld 1 mSv/jaar)(RIVM, 2020; CPZ, 2020).

De meeste verzamelaars zullen meestal niet verder komen dan: "De geigerteller tikt wel erg snel, dus dit stukje mineraal zal wel erg radioactief zijn, het is een heet mineraal". Op zichzelf hoeft dat niet erg te zijn indien er in een collectie weinig radioactieve mineralen voorkomen (de geigerteller zegt namelijk niets over de soort straling en dus niets over de energie vrijkomt), maar wel belangrijk is het om met een geigerteller na te gaan hoeveel stralingsbelasting de hele mineralenverzameling afgeeft.

Verdeling (in procenten) van de ontginningsmethodes van uranium in de wereld:

1. Ondergrondse mijnen 28%
2. Open pits (dagbouw) 25%
3. Uitlogen ("in situ leaching") 41%
4. Ontginning van uranium als bijproduct 5%

Bekende vindplaatsen van uranium

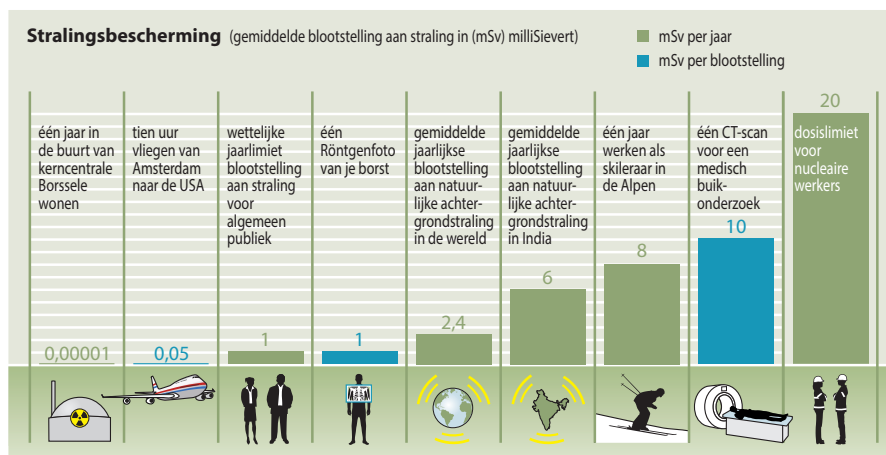
Hieronder bespreek ik een aantal, voor mineralenverzamelaars, bekende vindplaatsen. Voor een volledig overzicht verwijst ik naar

het boek van Lauf (2016) "Mineralogy of Uranium and Thorium".

Duitsland

Omdat in bijna alle mineraalverzamelingen een stukje mineraal te vinden is uit Duitsland van het Krunkelbachtal Uranium deposit in Menzenschwand, ga ik hier als eerste wat dieper in op deze uraniummijn (afb. 9 en 10). In de groeve werd in totaal, uit een ader in het Bärhalde graniet, 2500-5000 ton uranium gedolven (Markl & Wolfsried, 2011; Lauf, 2016).

▼ Infographic. Kritische stralingsdoses. Bron: EPZ, met toestemming. Onder de grafiek is de kaart afgebeeld die bij de GMC-320 Plus wordt geleverd. Hierbij is te zien dat de maximale stralingsbelasting ligt bij >0,65 $\mu\text{Sv}/\text{uur}$.



GQ GMC Geiger Counter Nuclear Radiation Safety Guide			
CPM	$\mu\text{Sv}/\text{h}$	mR/h	Action
5-50	0.03-0.33	0.003-0.033	Normal background. No action needed
51-99	0.33-0.65	0.033-0.065	Medium level, check the reading regularly
>100	>0.65	>0.065	High level. Closely watch the reading, find out why.
>1000	>6.50	>0.650	Very high. Leave the area ASAP, and find out why.
>2000	>13	>1.30	Extremely high. Evacuate immediately, report to government.

Note: For abnormal reading, do a second reading before you take action.
GQ Electronics LLC, Seattle, WA

► Afb. 9 en 10. Inrijke in het Krunkelbachtal Uranium deposit in Menzenschwand. Bron (met toestemming): Franz Falkenstein uit *Das Uran vom Menzenschwand*, Christian Weise Verlag.



Na de Tweede Wereldoorlog werd zowel in de VS als in Europa door de Amerikanen actief gezocht naar uraniumvoorkomens, omdat uranium een strategische waarde had voor defensiedoeleinden en later voor de (kern) energieopwekking en medische doeleinden. Het probleem was dat het door de vredesonderhandelingen na de Tweede Wereldoorlog Duitse mineralogen verboden werd om naar uranium en thorium te zoeken. Ook werd Duitsland verboden om uranium en thorium te bezitten.

De geallieerden echter spoorden voor eigen gewin Duitsland wel aan om naar uraniumvoorkomens te zoeken (Markl & Wolfsried, 2011). In 1949 werd door de geallieerden aan Prof. Dr. Franz Kirchheimer (directeur van de Badischen Geologischen Landesanstalt) een Amerikaanse geigerteller ter beschikking gesteld. In 1949 werden er bij Wittchen in het Bärhalde graniet in het Zwarte woud en Sulzbach in het Saargebied in het stollingsgesteente uraniumvondsten gedaan. Deze waren economisch winbaar (ontginningsgraad 0,3-0,5%). In 1959 kreeg Duitsland van de geallieerden de toestemming om naar uranium te zoeken voor energieopwekking, waardoor het gericht zoeken naar uranium op een hoger plan kwam te staan.

Twee jaar daarvoor, in 1957, ontdekten twee

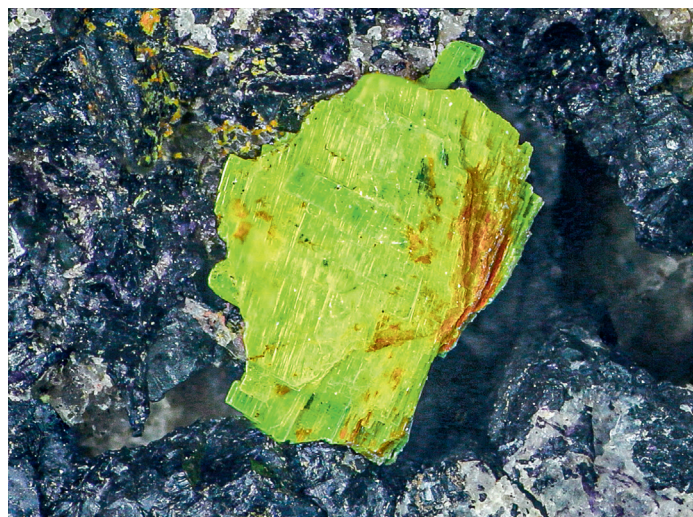
geologiestudenten (Manfred Lutz en Theo Beck) in de buurt van Menzenschwand, bij het zoeken naar fluoriet per toeval uranocirciet (afb. 11). De aders van het uraniumerts bij Menzenschwand bleken in sommige gevallen een dikte te hebben van 500 m. In de groeve werden naast het mineraal uraniniet (de hoofdgrondstof voor energieopwekking) de mineralen pyriet, kwarts, fluoriet en bariet gevonden. Volgens Mindat.org zijn er zeven uraanmineralen met de typelocatie Menzenschwand (TL): arsenovanmeersscheiet $U(UO_2)_3(AsO_4)_2(OH)_6 \cdot 4H_2O$, heisenbergiet $(UO_2)(OH)_2 \cdot H_2O$, joliotiet $(UO_2)(CO_3) \cdot 2H_2O$, metauranocirciet-I $Ba(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 6H_2O$, nielsbohriet $(K,U,Th)(UO_2)_3(AsO_4)(OH)_4 \cdot H_2O$, uranosiliet $(UO_2)Si_7O_{15}$ en uranotungstiet $Fe(UO_2)_2(WO_4)(OH)_4 \cdot 12H_2O$ (Lauf 2017; International Mineralogical Association, IMA, 2020). In dit voor Europa zeer rijke voorkomen werd tussen 1960 en 1984 uranium gewonnen voor het gebruik in kerncentrales. In 2002 besloot de coalitie van bondskanselier Schröder, onder druk van de milieubeweging, tot sluiting van alle kerncentrales in 2022. De regering Merkel bekrachtigde dit besluit.

Tsjechië

De tweede mijn die voor de mineraalverzamelaar interessant is, is de bekende uraniummijn in Jachymov, een stad in het Ertsgebergte.

Vanaf de 12^e eeuw werd daar volgens historische bronnen al intensief naar zilver gezocht en vond men in de zeventiende eeuw een groot aantal onbekende mineralen, waaronder pekblende (Jachymov is voor pekblende (uraniniet) de typelocatie) (Götz, 2005; Stark, 2019). De stad Jachymov wordt in een BBC-documentaire de "radioactieve hoofdstad" van de wereld genoemd en de stad en het mijnbouwgebied

► Afb. 11. Uranocirciet-kristallen (uraanglimmer), Krunkelbachtal Uranium deposit, Menzenschwand, Baden Württemberg, Deutschland. Afmetingen 5,5 cm x 4,0 cm. Gemeten straling met de GMC-320 Plus varieert van 0,82 tot 0,98 μ Sv/h. Verzameling en foto van de auteur.



staan sinds juli 2019 op de UNESCO-werelderfgoedlijst (BBC Reel, 2018) vanwege de middeleeuwse zilverwinning en vanaf de 19^e eeuw ook de uraniumwinning.

Opmerkelijk in deze documentaire is het gemak en de onzorgvuldigheid waarmee de geoloog (?) met de uraniummineralen in deze mijn omgaat. De uraniummijn in Jachymov (de oudste uraniummijn in Europa) heeft twaalf nieuwe mineralen opgeleverd en is daarmee typelocatie van onder andere uraniniet UO_2 (in 1727), torberniet $\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ en jáchymoviet $(\text{UO}_2)_8(\text{SO}_4)(\text{OH})_{14} \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ (Lauf, 2016; Stark, 2019; IMA, 2020). Mineralen uit deze mijnen waren vóór de val van de muur lastig of zelfs vaak helemaal niet te koop, omdat voor Rusland deze mineralen een politieke, militaire en economisch lading hadden (Stark, 2019). Jachymov is behalve vanwege de rol in de historische zilver- en uraniumwinning bekend om het feit dat hier het zgn. uraniumglas (“Uranglas”, “Vaseline-Glass” of “Annagelbglas”) werd geproduceerd (afb. 12 en 13). Let op het, met de GMC-320 Plus, gemeten stralingsniveau.

Ook bestond hier de mogelijkheid om radiumbaden als vorm van een geneesmiddel te



nemen. Tot op de dag van vandaag kunnen in Jachymov radioactieve baden genomen worden (BBC Reel, 2018, zie onder referenties).

Marie Curie (zie ook deel 1 in deze artikelenreeks) verzamelde in het mijnafval van deze mijn haar specimen waarmee zij haar onderzoek uitvoerde waarna ze samen met haar echtgenoot, Pierre Curie, vier nieuwe elementen ontdekte: radium, polonium (genoemd naar Polen), actinium en protactinium. Zij voerde op basis van deze experimenten de term *radioactiviteit* in.

Na de Tweede Wereldoorlog werd in Tsjechoslowakije het zoeken naar uranium uitgevoerd door Russische politieke dwangarbeiders. Dit uranium was bedoeld voor de productie van kernwapens.

Frankrijk

Een derde voor mineraalverzamelaars historisch interessante vindplaats is Autun, omdat autuniet daar voor het eerst gevonden werd. Deze uraniumdagbouw mijnen produceerden vanaf 1946 uraniumerts, met een piek van 3420 ton in het 1987 waarna de uraniumproductie afnam. De locatie is tegenwoordig uitgeput, zoals bijna alle uraniummijnen en groeves in Frankrijk. Een enkele mijn wordt nog slapend gehouden (Lauf, 2017). De Rabejac-mijn en twee belangrijke dagbouwgroeves, die “in de mottenballen” gehouden worden, liggen in de buurt van Lodève, in het Massif Central (departement Hérault).

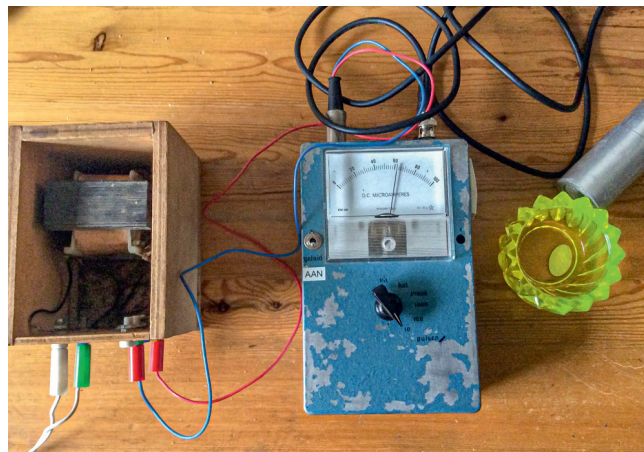
In de Rabejac-mijn worden 94 mineralen gevonden. Voor drie mineralen is Lodève de typelocatie: fontaniet $\text{Ca}(\text{UO}_2)_3(\text{CO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, rabejaciet $\text{Ca}_2[(\text{UO}_2)_4\text{O}_4(\text{SO}_4)_2](\text{H}_2\text{O})_8$ en seeliet $\text{Mg}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_3, \text{AsO}_4)_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Voor de mineralenverzamelaar zijn o.a. de stukken zeuneriet $\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ interessant (Lauf, 2016; IMA, 2020). Afb.14.

Portugal

Portugal is de vierde belangrijke vindplaats van uraniummineralen in Europa. De eerste vondst van uranium vond er plaats in 1912, waarbij radium de belangrijkste delfstof was. In 1951 startte de uraniumproductie. De uraniumwinning in Portugal gebeurt in mijnen waarbij gezocht wordt naar aders. Eerst lag de nadruk op het produceren van radium en daarna pas op uranium. De belangrijkste locaties zijn de districten Viseu en Sabugal, in Noord-Portugal. De mineralen komen voornamelijk als neerslag voor (in deel 3 wordt hierop ingegaan). De Pinhal do Souto-mijn in het district Viseu is bekend om de kleine, maar vaak wel goed uitgekristalliseerde microamounts van parsonsiet $\text{Pb}_2(\text{UO}_2)(\text{PO}_4)_2$, terwijl de Assunção-mijn wat in hetzelfde district ligt, bekend staat om de torbenietkristallen (afb. 15) en goed gekristalliseerde meta-autuniet (afb. 16).

Zwitserland

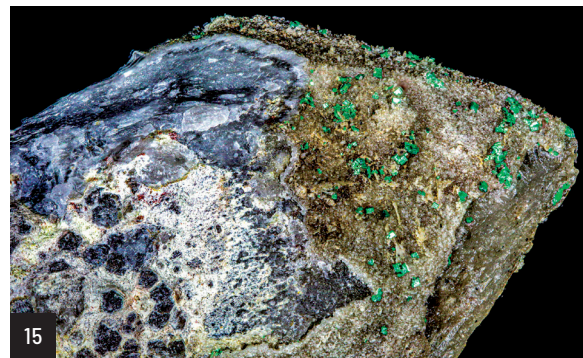
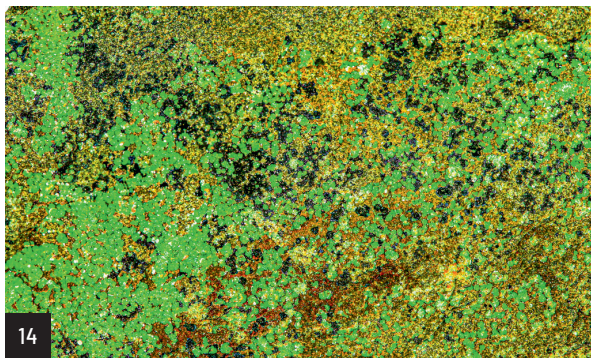
Zwitserland beschikt door de beperkte omvang niet over interessante uraniummineralisaties voor exploitatie. Tussen 1956 en 1984 hebben de geologen uit voorzorg en wetenschappelijke interesse bij het bouwen



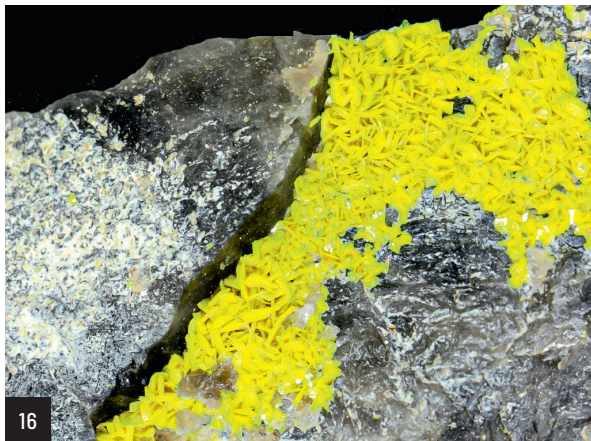
▲ Afb. 13. Zelfgebouwde geigerteller van Jan Sibsten (overleden in 2020) waarmee de straling wordt aangegeven in micro-ampères. Na het overlijden van Jan is door de dochter van Jan deze geigerteller ter beschikking gesteld aan de auteur. Op de foto is aan de uitslag van de micro-ampère(μA)-meter te zien dat het schaalteje van uranglas radioactief is.

◀ Afb. 12. Annagelbglas werd ontwikkeld in de glasfabriek Josef Riedel (1816-1894) in het Koninkrijk Bohemen door kleine hoeveelheden uraniumoxide toe te voegen aan de batchsamenstelling voor de glasproductie om het glas te kleuren. Josef Riedel noemde het glas naar zijn vrouw Anna. “Annagelbglas” wordt ook wel “Uranglas” genoemd. In het Amerikaans-Engels wordt dit glas ook wel “Vaseline Glass” genoemd. Anna geel “schijnt” onder een iriserende lichtbron. Gemeten straling met de GMC-320 Plus varieert van 1,60 tot 1,77 μSv /uur!! Verzameling en foto van de auteur

► Afb 14. Zeunerietkristallen Rabejac Mine, Lodeve, Hérault, France. Afmetingen 4,0 cm x 3,0 cm. Gemeten straling met de GMC-320 Plus varieert 0,17 tot 0,34 μ Sv/uur. Verzameling en foto van de auteur.



Afb. 15. Torbeniet op kwarts. Aldeia Nova, Ferreira de Aves, Mina Assunção, Sátão, Districto de Viseu, 7,5 cm x 5,0 cm. Gemeten straling met de GMC-320 Plus varieert van 0,49 tot 0,58 μ Sv/uur. Verzameling en foto van de auteur.



Afb. 16. Meta-auteniet Aldeia Nova, Ferreira de Aves, Mina Assunção, Sátão, Districto de Viseu 5,6 x 3,6 cm. Gemeten straling met de GMC-320 Plus varieert van 0,58 tot 0,69 μ Sv/uur. Verzameling en foto van de auteur.

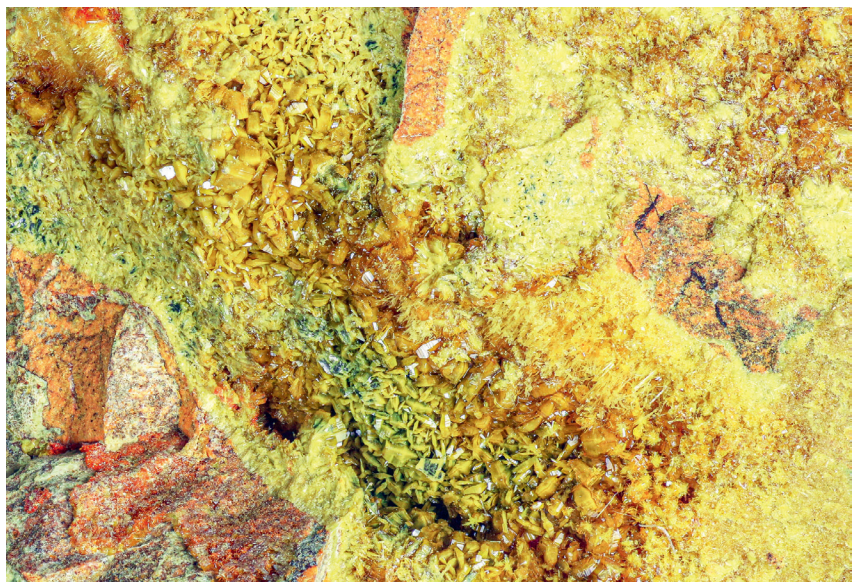
Afb 17. Saléieietkristallen, Arcu-Su Linnarbu Mine, Metropolitan City of Cagliari, Sardinië, Italië. Afmetingen 1,8 cm x 1,7 cm. Gemeten straling met de GMC-320 Plus varieert van 0,43 μ Sv/uur tot 0,52 μ Sv/uur. Typelocatie: Shinkolobwe Mine (Kasolo Mine), Shinkolobwe, Kambove District, Haut-Katanga, DR Congo. Verzameling en foto van de auteur.

van elektriciteitscentrales en tunnels, systematisch naar uranium gezocht. Daarbij zijn wel vier uraniummineralen gevonden die Zwitserland als typelocatie hebben: grimseliet $K_3Na(UO_2)(CO_3)_3 \cdot H_2O$, marécottiet $Mg_3O_6(UO_2)_8(SO_4)_4(OH)_2 \cdot 28H_2O$, cleusoniet $Pb(U^{4+}, U^{6+})Fe^{2+}_2(Ti, Fe^{2+}, Fe^{3+})_{18}(O, OH)_{38}$, françoisiet-(Ce) $Ce(UO_2)_3O(OH)(PO_4)_2 \cdot 6H_2O$ (Stalder, Wagner, Greaser & Stuker, 1998; IMA, 2020). Deze mineralisaties lijken op het graniet van het Aiguilles-Rouges-massief tussen Les Marécottes en La Creuse, een bergketen in de Franse Alpen, in het departement Haute-Savoie. De gevonden mineralisatie in Zwitserland leverde 13 ton uraniumerts.

(Ansermet & Meiser, 2020). Er werd daarna voor gekozen om het voor het symbolische bedrag van €100 te verkopen aan de Tsjechisch firma Diamo in Rozna, die het verwerkt voor vreedzame toepassingen, zoals medische bestralingen en het opwekken van kernenergie. Uit de 13 ton erts werd door de firma Diamo 260 kg uranium gewonnen. Daar het voorkomen van uraniummineralen in Zwitserland beperkt is tot een klein gebied, is verdere exploitatie niet rendabel. De gewonnen hoeveelheid is echter te beperkt om het economisch rendabel te laten zijn. Hieruit blijkt dat het niet alleen lastig is om rendabele uraniumerts te vinden, maar ook om er een

► Afb 18. Swamboiet-Nd kristallen met uranophaan, Swambo Mine, Kambove District, Katanga, Haut-Katanga Prov. D.R. Congo. Afmetingen 2,5 cm x 2,0 cm. Gemeten straling met de GMC-320 Plus varieert van 5,10 tot 5,88 μ Sv/uur. Verzameling en foto van de auteur.

De gevonden uraniummineralen zijn: coffiniëet $U(SiO_4)_n \cdot nH_2O$, pekblende (UO_2) en uranophaan $Ca(UO_2)_2(SiO_3OH)_2 \cdot 5H_2O$. Vervolgens speelde het probleem wat er met de 13 ton gedolven uraniumerts moest worden gedaan, omdat Zwitserland niet beschikt over een uraniumverwerkingsindustrie. Het voorstel om het in een oude mijn of groeve te storten, vond men onverantwoord. Uranium bleek daarnaast minder gewild te zijn op de grondstoffenmarkt





▲ Afb. 19. Open pit uraniummijn in Namibië. Foto: Ikiwaner via Wikimedia Commons CCO 1.0.

juiste bestemming voor te vinden. In het artikel van Ansermet en Meiser (2020) wordt vermeld dat er in 2009 in het Zwitserse Nant-de-Drance in het kanton Wallis (Valais) een nieuwe uraniummineralisatie is gevonden.

Democratische Republiek (D.R.) Congo

De vijfde voor de mineraalverzamelaar interessante vindplaats zijn de mijnen in de Democratische Republiek (D.R.) Congo. Deze hebben veel prachtige uraniumhoudende mineralen opgeleverd. De belangrijkste gebieden zijn Shinkolobwe, Kolwezi (Musonoi!), Swabo, Mindigi, en Kalongwo. De geologische ouderdom van de uraniumrijke gesteenten wordt gedateerd op 602 miljoen jaar (Delien, Piret & Comblain, 1981; Destas, Vaes, & Guillemin, 1959). Het primaire uraniummineraal is uraniniet, wat in tegenstelling tot andere vindplaatsen van uraniniet vaak in kristalvorm voorkomt. De bovengenoemde vindplaatsen in D.R. Congo zijn bekend om de grote hoeveelheid (38) uraniummineralen waarbij D.R. Congo als typelocatie geldt. Op Mindat.org vinden we onder meer de volgende mineralen met deze vindplaats als typelocatie: becquereliet $\text{Ca}(\text{UO}_2)_6\text{O}_4(\text{OH})_6 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, billietiet $\text{Ba}(\text{UO}_2)_6\text{O}_4(\text{OH})_6 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, curriet $\text{Pb}_{3+x}[(\text{UO}_2)_4\text{O}_{4+x}(\text{OH})_{3-x}]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, schoepiet $(\text{UO}_2)_4\text{O}(\text{OH})_6(\text{H}_2\text{O})_6$, vandendriesscheiet $\text{Pb}_{1.6}(\text{UO}_2)_{10}\text{O}_6(\text{OH})_{11} \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ en metavandendriesscheiet $\text{PbU}_7\text{O}_{22} \cdot n\text{H}_2\text{O}$, saléieit $\text{Mg}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_{10}$ (afb.17), swamboiet-(Nd) $\text{Nd}_{0.333}[(\text{UO}_2)(\text{SiO}_3\text{OH})](\text{H}_2\text{O}) \sim 2.5$ (afb. 18), marthoziet

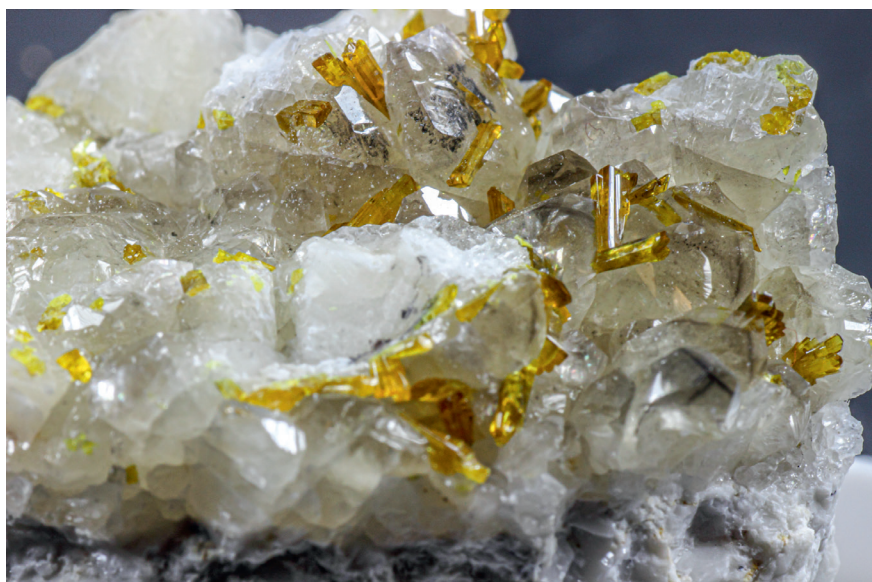
$\text{Cu}^{2+}(\text{UO}_2)_3(\text{Se}^{4+}\text{O}_3)_2\text{O}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, demesmaekeriet $\text{Pb}_2\text{Cu}_5(\text{UO}_2)_2(\text{Se}^{4+}\text{O}_3)_6(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, derriksiet $\text{Cu}_4(\text{UO}_2)(\text{Se}^{4+}\text{O}_3)_2(\text{OH})_6$ en guilleminiet $\text{Ba}(\text{UO}_2)_3(\text{Se}^{4+}\text{O}_3)_2\text{O}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (Lauf, 2016; IMA, 2020).

Op deze vindplaatsen hebben een groot aantal Belgische mineralogen gewerkt, zoals Alfred Schoep, Valère Louis Billiet, Gilbert Gauthier, Adriaan Vandendriessche en Achille Léon Salée (het mineraal Saléieit, afb. 17), waarvan sommigen hun naam gegeven hebben aan secundaire uraniummineralen. Mineralen waarbij voor de naam meta staat, zijn mineralen waar het water uit verdwenen is, zoals vandendriesscheite en metavandendriesscheiet. In deel drie kom ik hierop terug.

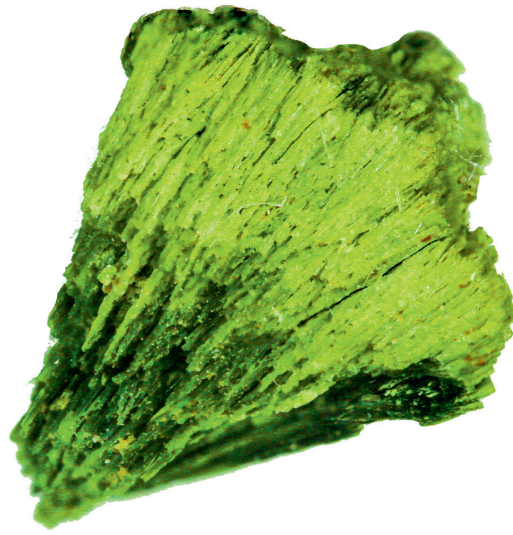
Namibië

Een zesde voor mineraalverzamelaars interessante vindplaats is de Rössing-ura-

▼ Afb. 20. Boltwoodiet-kristallen, Rössing-uraniummijn, Erongo Regio, Namibië. Afmetingen 2,5 cm x 2,0 cm. Gemeten straling met de GMC-320 Plus varieert van 0,34 tot 0,72 μSv /uur. Verzameling en foto van de auteur.



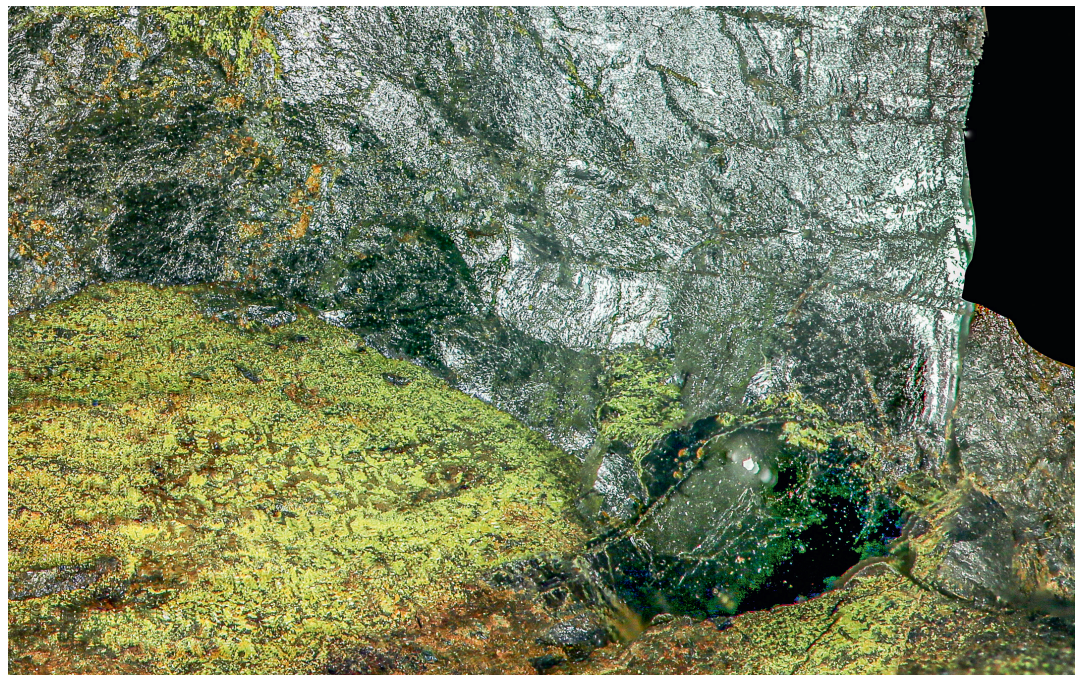
► Afb. 21. Autunietkristallen, Mt. Kit Carson Daybreak Mine, Spokane Co., Washington, VS. Afmetingen 2,0 cm x 1,5 cm. Gemeten straling met de GMC-320 Plus varieert van 0,17 tot 0,50 $\mu\text{Sv/uur}$. Dit specimen was een onderdeel van een groter specimen dat spontaan uiteengevallen is. Verzameling en foto van de auteur



niummijn in Namibië (afb. 19) (Lauf, 2008; Lauf, 2017). Hier worden mooie kristallen van uranophaan- β $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{SiO}_3\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ en boltwoodiet $(\text{K},\text{Na})(\text{UO}_2)(\text{SiO}_3\text{OH}) \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}$ gevonden (Lauf 2017; IMA, 2020) (afb. 20). In deze mijn en groeve worden volgens Mindat.org elf uraniummineralen gevonden, naast een aantal mineralen die zeldzame aarden, zoals yttrium (Y) en cerium (Ce), bevatten. De groeve kent geen mineralen die deze mijn als typelocatie hebben.

Namibië is de vierde uraniumproducent ter wereld (Lauf, 2008). De dagbouwgroeve levert uraniumerts met daarin o.a. de bovengenoemde mineralen, dat verrijkt wordt (zie ook deel 1 van deze artikelreeks). Dit wordt geleverd aan o.a. elektriciteitscentrales in Frankrijk, Groot-Brittannië, VS en Japan. De grootste producent in Namibië, Rössing Uranium Ltd., verwerkte ongeveer 12 miljoen ton erts in 2006 en produceerde daaruit 3,617 ton uraniumoxide (U_3O_8) (bijv. Lauf, 2016). Dit is een rendement van slechts 0,003%.

► Afb 22. Davidiet-(La) Radium Hill mine, Radium Hill area, Olary Province, South Australia, Australia 4,1 x 3,5 cm. Davidiet-(La) is het amorfe, zwarte mineraal op de foto. Gemeten straling met de GMC-320 Plus varieert van 2,78 tot 2,81 $\mu\text{Sv/uur}$. Verzameling en foto van de auteur.



Verenigde Staten

Een zevende voor mineraalverzamelaars interessante vindplaats is Mt. Kit Carson Daybreak Mine, Spokane Co., in de staat Washington. De drie mineraalsoorten (uraniniet UO_2 , autuniet $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 10-12\text{H}_2\text{O}$, meta-autuniet $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) worden in een granietader gevonden, waarin vijf ertslichamen te vinden zijn. Deze vindplaats staat bekend om de 'boekvormige' autunietkristallen (afb. 21). Een andere mijn is de Blue Lizard Mine in Utah, die redelijk recent (tussen 2013 en 2015) nog een aantal nieuwe uraniummineralen opleverde, zoals onder meer openheimeriet $\text{Na}_2(\text{UO}_2)(\text{SO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ en fermiet $\text{Na}_4(\text{UO}_2)(\text{SO}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (Lauf 2017; IMA, 2020). De Blue Lizard Mine is een kopermijn waarbij de uraniummineralen zijn afgezet op de wanden van zandsteen van de ondergrondse gangen. In deze mijn worden 97 verschillende mineralen gevonden, waarbij, volgens Mindat.org, 22 voornamelijk uraniummineralen een typelocatie-aanduiding hebben.

Australië

Uraniummineralen uit Australië zijn soms te vinden in oude collecties. In 1906 werden de eerste mineralen gevonden en gedetermineerd van de vindplaats met de welsprekende naam Radium Hill Area. Davidiet-(La) $\text{La}(\text{Y},\text{U})\text{Fe}_2(\text{Ti},\text{Fe},\text{Cr},\text{V})_{18}(\text{O},\text{OH},\text{F})_{38}$ heeft als typelocatie deze vindplaats (afb. 22). Daarnaast hebben de volgende mineralen Australië als typelocatie:

baumoiet $\text{Ba}_{0,5}[(\text{UO}_2)_3\text{O}_8\text{Mo}_2(\text{OH})_3](\text{H}_2\text{O})_3$, françoisiet-(Ce) $\text{Ce}(\text{UO}_2)_3\text{O}(\text{OH})(\text{PO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, lakebogaiet $\text{NaCaFe}_2\text{H}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, spriggiet $\text{Pb}_3(\text{UO}_2)_6\text{O}_8(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ en ulrichiet $\text{CaCu}(\text{UO}_2)(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

Tot slot

De in de afbeeldingen getoonde uraniummineralen uit mijn collectie zijn over het algemeen klein, wat noodzakelijk is om eventuele gezondheidsrisico's te verkleinen. Ik wil nogmaals de nadruk leggen op het feit dat het bezit van een geigerteller een *must* is voor iedere mineraalverzamelaar. Zeker als je mineralen verzamelt, of mineralen in je verzameling hebt uit de Democratische Republiek Congo of het Ertsgebergte waar o.a. Jachymov ligt. Zorg dat ze veilig in dichtgeplakte plastic "Jousi-doesjes" bewaard worden voorzien van de juiste sticker en ook zo gelabeld worden in de kaartenbak of database van de verzameling. Let ook op de mineralen uit Zweden. Zweden heeft geen uraniummijnen, maar sommige mineralen zoals monaziet (zie deel 1) kunnen toch radioactief zijn. In het derde deel van deze vierdelige artikelreeks ga ik specifiek in op de uraniummineralen zoals deze behandeld worden door Lauf (2016). Dit boek is een *must* voor de geïnteresseerde mineralenverzamelaar. Zie mijn recensie in *Gea* (Van 't Zelfde, 2018).

Van verschillende kanten heb ik extra informatie en materiaal mogen ontvangen na publicatie van deel 1 in het septembernummer. Dit heeft me ertoe doen besluiten om een vierde deel te schrijven. Dit vierde deel handelt over thoriummineralen, mineralen zoals monaziet en andere radioactieve mineralen die geen uranium of thorium bevatten, en radioactieve geologische processen in Finland.

Dankwoord

Op deze plaats wil ik GEA-bestuurslid en stralingsdeskundige Ronald van Duijvenvoorde bedanken voor zijn kritische blik op de kadertekst.

Referenties en leessuggesties

Dit is een beperkte lijst; de volledige referentielijst kunt u t.z.t. vinden op de website van GEA via de volgende directe link: www.gea-geologie.nl/services/specials

- Ansermet, S. & Meisser N. (2020). Die Uran-Mineralisation von Nant-de Drance, Emosson VS. *Schweizer Strahler* 54 (2) p. 8 - 21.
- BBC Reel. (2018, 13 april). *The radioactive 'capital' of the world* [videobestand]. Geraadpleegd op 29 juli 2020, van www.bbc.com/reel/playlist/ultimate-world?vpid=p08oyt3l.
- Bos, A.J.J., Draaisma, F.S. & Okx, W.J.C. (2007) *Inleiding tot de stralingshygiëne*. Sdu Uitgevers, Den Haag.
- De Kinder, L. (2011) Uraniumontginning, *Oikos* 2 (57).
- Delien, M., Piret P., & Comblain G. (1981) *Les minéraux secondaire d'uranium du Zaïre*. Koninklijk museum voor midden-Afrika, Tervuren.
- Destas A., Vaes, J.F. & Guillemin C. (1959) *Minéraux d'Uranium du Haut Kantanga*, Les Amis du Musée royal du Congo Belge, Tervuren.
- EOS (2017) *Eerste identificatie van een zwaar element dat ontstond bij botsing tussen neutronensterren* [Persbericht]. Geraadpleegd op 24/7/2020 van www.eso.org/public/netherlands/news/eso1917.
- Hofmann A.W. (1979) Geochronology of the Crystalline Rocks of the Schwarzwald. In: Jäger E., Hunziker J.C. (eds) *Lectures in Isotope Geology*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Knoll, G.F. (2010) *Radiation detection and measurement, fourth edition*. Wiley, New Delhi.
- Lauf, J.L. (2008) *Introduction to radioactive minerals*. Schiffer, Atglen.
- Lauf, J.L. (2016) *Mineralogy of Uranium and Thorium*. Schiffer, Atglen.
- Markl, G. & Wolfsried, S. (2011). *Das Uran von Menzenschwand*. Weise Verlag, München.
- Stalder, H.A., Wagner, A., Greaser, S. & Stuker, P. (1998) *Mineralienlexikon der Schweiz*. Verlag Wepf & Co. AG, Basel.
- Stark, J. (2019) *Uranmineralien in Sachsen. Was Carl Schiffler noch nicht wissen konnte (Erweiterte zweite Auflage)*. Verlag Stark, Bernsbach.
- Van 't Zelfde, J.C. (2018) Boekbespreking. *Gea* 51(1) p.31.

Rectificatie

In *Gea* 2020/3 zijn in het eerste artikel uit deze serie in afb. 11 (pag. 9) door een kritische lezer wat onvolkomenheden opgemerkt, met dank daarvoor. Het bleek o.a. dat de tekst onder de elementen was verschoven. Tevens zijn in de nieuwe afbeelding de straling en de halfwaardetijd van Pu-239 aangegeven. ("e" geeft een elektron aan). Figuur: Hans van 't Zelfde, naar Mike Broadhead in de online Sustainability through Chemistry IB Course via YouTube.

