

Tracing differentiation processes through siderophile elements, from meteorites to giant ore deposits (DESIRED)

Context

Het DESIRED-project onderzoekt hoe matig tot sterk siderofiele elementen — waaronder Au, PGE (Os, Ir, Ru, Rh, Pt, Pd), Re en vergelijkbare metalen zoals Cr, Co, Ni, Mo en W — verdeeld zijn in zowel terrestrische als extraterrestrische materialen. Deze metalen worden voornamelijk gepartitioneerd in metallische fasen tijdens planetaire differentiatie en werden daardoor vroeg in de aardgeschiedenis in de aardkern afgescheiden. Hun uitgesproken afwezigheid in de aardkorst en mantel ten opzichte van concentraties in de zonnenevel verklaart hun status als edelmetalen en hun neiging om economisch significante afzettingen te vormen enkel wanneer specifieke geodynamische mechanismen of oppervlakte- processen ze concentreren, vaak via erosie van (ultra)mafische gesteenten die chemisch verschillende mantelreservoirs bemonsteren.

Inzicht in het gedrag van siderofiele elementen biedt een venster op de vroegste stadia van de accretie van de aarde. Duidelijke sets van elementen met specifieke metaalaffiniteiten blijken bijzonder geschikt om de isotopische samenstelling van het materiaal dat aan de planeet werd toegevoegd doorheen de tijd te reconstrueren. Een sleutelconcept is hierbij de *late veneer* (late toevoeging), een laatste toevoeging van meteoritisch materiaal na de kern-manteldifferentiatie, die de silicaatreservoirs van de aarde verrijkte aan sterk siderofiele elementen (HSE). Door de relatieve bijdragen en isotopische vingerafdrukken van late veneer-materiaal versus pre-late veneer-materiaal te bepalen, wordt het mogelijk de abundantie en het type meteoritische input te identificeren, modellen van planetaire groei te verfijnen en uiteenlopende isotopische waarnemingen te verzoenen, zoals die welke wijzen op accreterende componenten die ofwel rijk zijn aan vluchtige elementen, ofwel extreem droog. Deze inzichten kunnen bijdragen tot het verklaren van de vorming van enorme PGE-rijke afzettingen en andere fundamentele kenmerken van de aarde, zoals vloeibaar water, budgetten aan vluchtige bestanddelen, een beschermend magnetisch veld, mantelconvectie en de evolutie van leven.

Doelstellingen

- **Oorsprong van edelmetalaafzettingen in het Kaapvaal-kraton**
Analyse van ca. 3,5–2,0 Ga oude mafische magmatische gesteenten en bijhorende schalies om te bepalen hoe Au en PGE vanuit mantelreservoirs naar de aardkorst werden getransporteerd. Het Kaapvaal-kraton herbergt wereldwijd ongeëvenaarde minerale rijkdommen: het Witwatersrand-bekken heeft ongeveer een derde van al het ontgonnen goud ooit geleverd, terwijl het nabijgelegen Bushveld-complex de dominante mondiale bron van PGE vormt. Ondanks deze uitzonderlijke concentratie aan edelmetalen bestaat er tot op heden geen eenduidig genetisch model. Deze doelstelling test of deze afzettingen isotopische signaturen weerspiegelen die kenmerkend zijn voor late veneer-toevoegingen, dan wel oudere, pre-late veneer heterogeniteiten in de mantel, mogelijk gerelateerd aan onvolledige vroege kernvorming of latere toevoegingen van ongedifferentieerd extraterrestrisch materiaal.
- **Randvoorwaarde van meteorieten op pre-late veneer- en late veneer isotopische signaturen**
Karakterisatie van geselecteerde meteorieten - in het bijzonder enstatietmeteorieten en koolstofhoudende chondrieten - om te bepalen wat elk isotopisch proxy-systeem (Cr, Ni, Mo, Ru, Os, W) registreert. Concentratiegegevens, isotopische variaties en experimenteel bepaalde verdelingscoëfficiënten bij hoge druk en temperatuur worden gebruikt om onderscheid te

maken tussen materialen die vroeg tijdens de aardaccretie werden ingebouwd en materialen die tijdens de late veneer werden toegevoegd. Bestaand onderzoek suggereert dat vroeg accreterend materiaal hoofdzakelijk enstatiet-gerelateerd was, terwijl laat accreterend materiaal mogelijk overeenkomt met CI-koolstofchondrieten. Dit impliceert een late veneer afkomstig uit verder gelegen delen van het Zonnestelsel en potentieel met een kleinere massa dan eerder werd aangenomen.

- **Bewaring van extraterrestrische signalen in Belgische fanerozoïsche kalkstenen**

Toepassing van de isotopische tools ontwikkeld in de eerste twee doelstellingen op fanerozoïsche kalksteenreeksen met aanrijkingen van chromium en aanwijzingen voor extraterrestrische input, zoals kosmisch stof. Deze doelstelling test of isotopische signaturen van meteorietbombardementen diagenese en langdurige geologische processen kunnen overleven, waardoor reconstructie van oude fluxen van extraterrestrisch materiaal mogelijk wordt en de interpretatie van sedimentaire archieven verbeterd.

- **Uitbreiding en curatie van de Antarctische meteorietcollectie in het RBINS**

Versterking van de omvang, kwaliteit en wetenschappelijke relevantie van de Antarctische meteorietcollectie van het RBINS via gerichte verzamelmissies (BELARE 2022–2023; 2024–2025 en verder). De uitgebreide collectie - inmiddels bestaande uit meer dan 1450 specimens - levert voldoende groot materiaal voor de hoge-precisie isotopische analyses die vereist zijn voor doelstelling 2. Verbeterde curatieprotocollen ondersteunen bovendien de toegankelijkheid op de lange termijn en de betrouwbaarheid van deze cruciale stalen.

Conclusies

Tijdens de projectperiode werd aanzienlijke vooruitgang geboekt binnen alle onderzoekslijnen, te beginnen met uitgebreid werk op het Kaapvaal-kraton. Elektronenmicrosonde en LA-ICP-MS analyses van silicaten, sulfiden, oxiden en fosfaten toonden een grote mineralogische diversiteit en duidelijke aanwijzingen voor post-kristallisatie-alteratie, wat het potentiële effect van metamorfe processen op de verdeling van siderofiele elementen en isotopische systemen onderstreept. De volledige digestie en chromatografische scheiding van acht Kaapvaal-stalen, gevalideerd aan de hand van eerder gepubliceerde datasets, tonen een variabiliteit in HSE die voornamelijk door petrologie wordt gestuurd en waarschijnlijk gedomineerd is door kleinschalige heterogeniteit. De nieuw ontwikkelde micro-destillatie-TIMS-methode voor de meting van Os isotoopenverhoudingen leverde DROsS-standaardwaarden op die consistent zijn met gepubliceerde data (verschillen $< 0,007$ in $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$). Aangezien dergelijke analyses bijzonder tijdsintensief zijn, loopt verder onderzoek nog. Het artikel over de in-situ karakterisatie van de HSE-verdeling in niet-geëquilibreerde gewone chondrieten, geanalyseerd via LA-ICP-MS, is momenteel in voorbereiding. Parallel hieraan heeft werk aan de VUB de studie van meteoriet-gelinkte signaturen in terrestrische impactstructuren verdiept, inclusief gezamenlijke metingen van Ru- en Cr-isotoopenverhoudingen. Ook het Antarctische meteorietenprogramma maakte sterke vooruitgang: de RBINS-collectie overschrijdt nu 1450 specimens na de expeditie van 2022–2023 en het veldseizoen 2024–2025, waarbij 110 nieuwe fragmenten werden gevonden in het Belgica-gebergte. Curatie, classificatie en micro-CT-beeldvorming zijn lopende en leveren essentiële gegevens voor de digitalisering van de collectie en toekomstige virtuele tentoonstellingen, naast publicaties die voortvloeien uit eerdere analyses van kosmische deeltjes. Onderzoek naar fossiele micrometeorieten uit Belgische kalksteenafzettingen leverde eveneens belangrijke resultaten op: 130 kg carbonaatgesteente werd verwerkt, wat leidde tot de recuperatie van meer dan 2000 micrometeorieten, waaronder zeldzame, goed bewaarde silicatenhoudende types, die nu een

van 's werelds grootste dergelijke collecties vormen. Een uitgebreide mineralogische en isotopische karakterisatie (SEM, XRF, EMPA, LA-ICP-MS, O- en Fe-isotopen) maakte de reconstructie mogelijk van een uitgesproken piek in micrometeorietflux voorafgaand aan het Hangenberg-event, en resulteerde in een publicatie in *Geochimica et Cosmochimica Acta* (Krämer Ruggiu et al., 2025), met een tweede artikel over de extractietechniek in voorbereiding. Tot slot werd de betrokkenheid van de gemeenschap versterkt door de organisatie van de 86e jaarlijkse bijeenkomst van de Meteoritical Society (27 juli – 2 augustus 2024) door het ULB-VUB-team, inclusief een gespecialiseerde workshop over meteorietcuratie bij het RBINS, wat de internationale samenwerking en zichtbaarheid verder vergrootte.

Sleutelwoorden

Siderofiele elementen; planetaire differentiatie; edelmetalen; Kaapvaal kraton; platinagroep-elementen (PGE); isotopische geochemie; osmium isotopen; meteorieten; curatie van Antarctische meteorieten; micrometeorieten; Devoon-Carboon grens; Hangenberg-event; ertsgenese; mantelprocessen; LA-ICP-MS; TIMS; digitale collecties.