

**.escherprijs** | Het is niet gebruikelijk dat twee masterstudenten gezamenlijk hun afstudeerproject uitvoeren. Thomas Kruijer en Eric Fulmer deden dit wel, en met succes. Op 25 februari jl. werd hun scriptie (uit 2009) beloond met de Escherprijs, die jaarlijks wordt uitgelooft door KNGMG en Shell aan jonge onderzoekers die zich onderscheiden met 'innovatief en gedegen onderzoek'. De scriptie van Kruijer en Fulmer kreeg een 'opmerkelijk hoge' beoordeling, aldus de jury, in een jaar met meer inzendingen dan ooit.

# Fossiele magmakamer onder de loep



Thomas Kruijer (r) ontvangt de Escherprijs uit handen van de voorzitter van de jury, Arthur Kellermann Slotemaker.

Het masteronderzoek van Thomas en Eric, dat als een 2 cm dik rapport verscheen onder de titel 'The Nature of Batholith Formation: Detailed field, geochemical and isotopic constraints on the assembly of the Sentinel Granodiorite, Sierra Nevada Batholith, USA', bestond uit een combinatie van veldstudie en uitgebreide laboratoriumanalyse. De twee jaargenoten togen

in de zomer van 2008 voor vijf weken naar Californië, om er veldwerk te verrichten in Yosemite National Park, een imponerend, door gletsjers uitgesleten landschap, waarvan de Half Dome en de bijna 1 km hoge rotsformatie El Capitan de belangrijkste toeristische trekpleisters zijn. Thomas: "Onze camping op 2500 meter werd regelmatig door beren bezocht. Het

was een tweede dagtaak om alle maatregelen te treffen en de beren niet te lokken".

## Vijf kilometer diepte

Het onderzoeksgebied in het noordwesten van Yosemite National Park besloeg bijna 200 vierkante km. "Yosemite is een bijzonder goed ontsloten gebied met weinig begroeiing," vertelt Thomas. "Het is goed





Uitzicht op de Half Dome vanaf de Sentinel Granodioriet.

bereikbaar door de vele uitgezette wandelpaden en Highway 120 die ons gebied doorkruist. Als geologen lopen we buiten de gebaande paden, maar granietachtig gesteente is meestal rond en niet zo steil en daardoor goed begaanbaar.” De Californische Sierra Nevada, waar Yosemite deel van uitmaakt, bestaat grotendeels uit tussen 120 en 85 miljoen jaar geleden gevormd stollingsgesteente (graniet of granietachtig). De oceanische Farallon Plaat schoof toen onder de continentale Noord-Amerikaanse Plaat. Dit resulteerde in een uit tientallen plutonen bestaande

granietbatholiet, die pas in een later stadium door opheffing en erosie aan het oppervlak is gekomen. Thomas: “Het is heel bijzonder dat je hier door een fossiele magmakamer loopt die tientallen miljoenen jaren geleden nog op ongeveer 5 km diepte in de aardkorst lag”. Centraal in het onderzoek stond de evolutie van de Sentinel Granodioriet, een ‘magmatisch systeem’ waarvan Thomas en Eric aan de hand van monsters bepaalde hoeveel magmabronnen er aan ten grondslag lagen. “Theoretisch moet dat aantal liggen tussen de twee extremen: één grote mag-

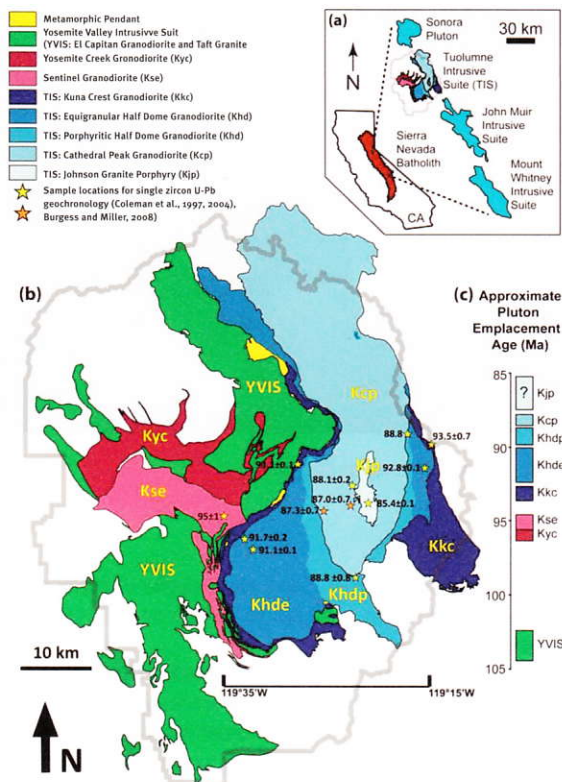
mapuls en vele kleinere,” licht Thomas toe. “Om antwoord op deze vraag te krijgen, hebben we verspreid in het gebied gesteentemonsters genomen en deze in het laboratorium van de VU geanalyseerd aan de hand van  $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ -isotopen. De verhouding van strontiumisotopen is karakteristiek voor een bepaalde magmabron. Meer dan 95% van het Sentinel-pluton bestaat uit ogenschijnlijk zeer uniforme granodioriet, maar dit blijkt misleidend: geringe, maar significante, Sr-isotopenvariaties toonden aan dat er op zijn minst twee isotopische reservoirs op grote diepte in de korst moeten zijn geweest die hebben bijgedragen aan de vorming van de Sentinel Granodioriet. Onze ervaring is overigens dat de beschikbaarheid voor studenten van meerdere massaspectrometers het lab op de VU tot een echt paradijs maakt!”

### Salpeterzuur

Herhaling van de analyse met Hf- (hafnium) en Nd- (neodymium) isotopen bevestigde het eerdere onderzoeksresultaat van (minstens) twee oorspronkelijke magmabronnen. “Of de twee magmabronnen in verschillende perioden actief geweest zijn, hebben we niet kunnen onderzoeken. Dat zou een goede vraag zijn voor vervolgonderzoek,” vindt Thomas. “We hebben geen dateringen gedaan omdat het granodiorietlichaam als geheel – het eindpunt van de stollingsfase – is gedateerd op 95 miljoen jaar. Op kleine schaal zou er wel verschil in ouderdom kunnen zijn, waarbij de verschillende pulsen tienduizenden tot honderdduizenden jaren met elkaar zouden kunnen schelen.

In plaats van tijdrovend geochronologisch onderzoek, hebben wij er voor gekozen om het project toe te spitsen op geochemische analyses die ons uiteindelijk meer inzicht konden bieden in magmatische processen.” De laboratoriumanalyses werden behalve in het lab van de Vrije Universiteit ook uitgevoerd aan de Universiteit Utrecht en de Stanford University (VS). Thomas: “Wat voor mij persoonlijk erg nieuw was, was het onder de knie krijgen van geochemische analyses. Ik ben achteraf heel blij dat ik dat in dit project heb kunnen leren. Door deze ervaring heb ik ook naar mijn huidige baan kunnen solliciteren”.

“Een praktisch probleem was het in oplossing brengen van bepaalde zirkoonhoudende gesteenten,” vertelt Thomas. “We kwamen erachter dat de deeltjes niet goed in oplossing waren gekomen, omdat de resultaten van de analyses niet overeenstemden met een andere techniek die we hadden toegepast. Wat bleek? Alleen het verhitten van het zuur – een geconcentreerde mix van salpeterzuur en waterstoffluoride – tot 200°C werkte niet. Uiteindelijk bleek dat het onder grote druk brengen van het monster het grootste verschil maakte.”



Geologische kaart van Yosemite National Park.



## Titaniet

Naast het isotopenonderzoek hebben Thomas en Eric de gesteentemonsters geanalyseerd op het voorkomen van zeldzame aarden (REE), die veel informatie verschaffen over magmatische processen en over welke mineralen als eerste gekristalliseerd zijn. Deze elementen vervangen de hoofdelementen in mineralen, zoals silicium en aluminium en komen in minimale concentraties (van ppm en ppb) in het gesteente voor. Thomas: "REE bleken voor 95% vertegenwoordigd te zijn in het mineraal titaniet ( $\text{CaTiSiO}_5$ ), dat in hele kleine concentraties van ca 1 volume% in het gesteente voorkomt. Juist omdat de sporelementen hierin oververtegenwoordigd zijn, kun je titaniet als monitor van magmatische condities gebruiken".

Een van de onderzoeksvragen die zich in de loop van het project vormden, was het zoeken naar een verklaring voor intrusieve gangen van leuco-graniet die Thomas en Eric in het veld observeerden. "Deze structuren, waarvan we de driedimensionale vorm niet precies kunnen afleiden, waren heel lokaal in de Sentinel-granodioriet aanwezig. De banddikte varieerde aan het oppervlak van enkele tientallen centimeters tot anderhalve meter. We vroegen ons af of deze 'sheets', die in alle oriëntaties kunnen voorkomen, misschien afkomstig waren uit een andere magmabron. Uit isotopenonderzoek hebben we geconcludeerd dat zowel de granietstromen als de omringende granodioriet uit dezelfde magmabron afkomstig zijn. Onze hypothese – dat de sheets zijn ontstaan door partiële kristallisatie – hebben we kunnen onderbouwen met behulp van laboratoriumanalyse van titaniet, dat in een nog kleinere concentratie in de sheets van leuco-graniet voorkomt. We vermoeden dat de leuco-graniet pas heel laat in de stollingsgeschiedenis van



Thomas Kruijer (links) en Eric Fulmer op veldwerk in Yosemite National Park.

de magmakamer is ontstaan, na stolling van het omringende gesteente en partiële kristallisatie van titaniet."

## Explosief vulkanisme

Het onderzoek leverde ook kennis op over silicarijck vulkanisme, met felsisch (stropelig) magma als drijvende kracht. Een beter inzicht in deze magmatische systemen en meer kennis over de tijdspanne waarin magma gesmolten blijft, maakt duidelijk hoe de aardkorst onder deze, meer explosieve, vulkanen zich gedraagt. Thomas: "Onze resultaten laten zien dat er door fractionele kristallisatie relatief laat in de stollingsgeschiedenis van een pluton, zeer silicarijck magma's geproduceerd kunnen worden. Deze interpretatie is in overeenstemming met recente numerieke modellen die aantonen dat magmatische systemen in een dergelijk stadium, als 'crystal mush', nog voor een langere

periode, tot wel honderdduizenden jaren, actief kunnen blijven. Dit vertelt wellicht ook iets over het karakter van de magmatische systemen die vulkaanuitbarstingen voeden".

De samenwerking is Thomas en Eric goed bevallen. Thomas: "Door samen te werken hebben we meer data kunnen verzamelen en efficiënter kunnen werken. En niet onbelangrijk: je stimuleert elkaar in discussies over de interpretatie van onderzoeksresultaten en je bent dus ook kritischer op wat je doet. Tijdens het veldwerk hebben we bijvoorbeeld veel gediscussieerd over structuren in het veld, waar en waarvan we het beste monsters konden nemen en onze keuze van monsters voor het zeer arbeidsintensieve isotopenonderzoek".

Het project werd begeleid door prof. dr. Gareth Davies (VU) en prof. dr. Jonathan Miller (San José State University). Zowel Thomas als Eric werken momenteel in het buitenland: Thomas aan de Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) in Zürich, waar hij al ruim een jaar promotieonderzoek doet naar de vorming en mantel-kern differentiatie van proto-planeten door isotopenonderzoek aan ijzermeteorieten (de overblijfselen van proto-planeetkernen). Eric is – niet als aardwetenschapper – werkzaam voor het Department of Defense (Office of the Secretary of Defense) in Washington D.C. als Operations Research Analyst.

Annemieke van Roekel

De KNGMG Escherprijs is genoemd naar de bevolgen Nederlandse hoogleraar algemene geologie Berend George Escher, de halfbroer van de grafisch kunstenaar Maurits Cornelis Escher. De in 1994 ingestelde prijs wordt dit jaar voor de 13e maal uitgereikt.



Intrusieve gangen van graniet in de Sentinel Granodioriet.