



De Cordillera Real in Bolivia met bergtoppen boven de 6 km, gelegen aan de oostelijke rand van de Altiplano, een hoogvlakte in de Centrale Andes, die 4 km boven zeeniveau ligt. De foto is gemaakt vanaf de Altiplano. | Foto: N.A.M. Schellart

Bewonderenswaardige Bergen Bouwen: Hoe doe je dat?

Geodynamisch onderzoek over de Andes en de Himalaya

Duizenden jaren al zijn mensen gefascineerd door bergen. Ruim 200 jaar geleden begonnen de eerste geologen gesteenten en structuren in diverse bergketens, zoals de Alpen, Himalaya en Andes, in kaart te brengen, om deze bergen beter te begrijpen. De afgelopen decennia hebben aardwetenschappers steeds meer gebruik gemaakt van zowel analoge als numerieke geodynamische modellen om gebergtevorming te simuleren en de aandrijfkrachten te doorgronden.

Mogelijk de eerste wetenschappelijke theorie om de oorsprong van gebergten te verklaren is de 'contracting Earth theory', waarbij horizontale verkorting in de korst wordt veroorzaakt door planetaire afkoeling. Deze theorie werd honderden jaren geleden ontwikkeld door filosofen, waaronder Descartes die zijn versie van de theorie beschreef in het boek "Principia Philosophiae". In de late 18^e en 19^e eeuw begonnen wetenschappers als De Sausurre, Hutton en Suess gebergten zoals de Alpen geologisch in kaart te brengen, wat resulteerde in bewijs voor grootschalige horizontale verkorting van de korst door plooïing en opschuivingen. De belangrijke implicatie was dat deze structuren, alsmede de bergen waarin ze voorkomen, zijn gevormd door grootschalige horizontale compressieve krachten. Tegelijkertijd werden deze ideeën onderzocht en getest door middel van analoge laboratoriumexperimenten, o.a. door J. Hall en A. Favre. Sommigen verbonden de horizontale verkorting met Aarde-contractie, maar aan het einde van de 19e eeuw begonnen de meeste geologen deze verklaring in twijfel te trekken.

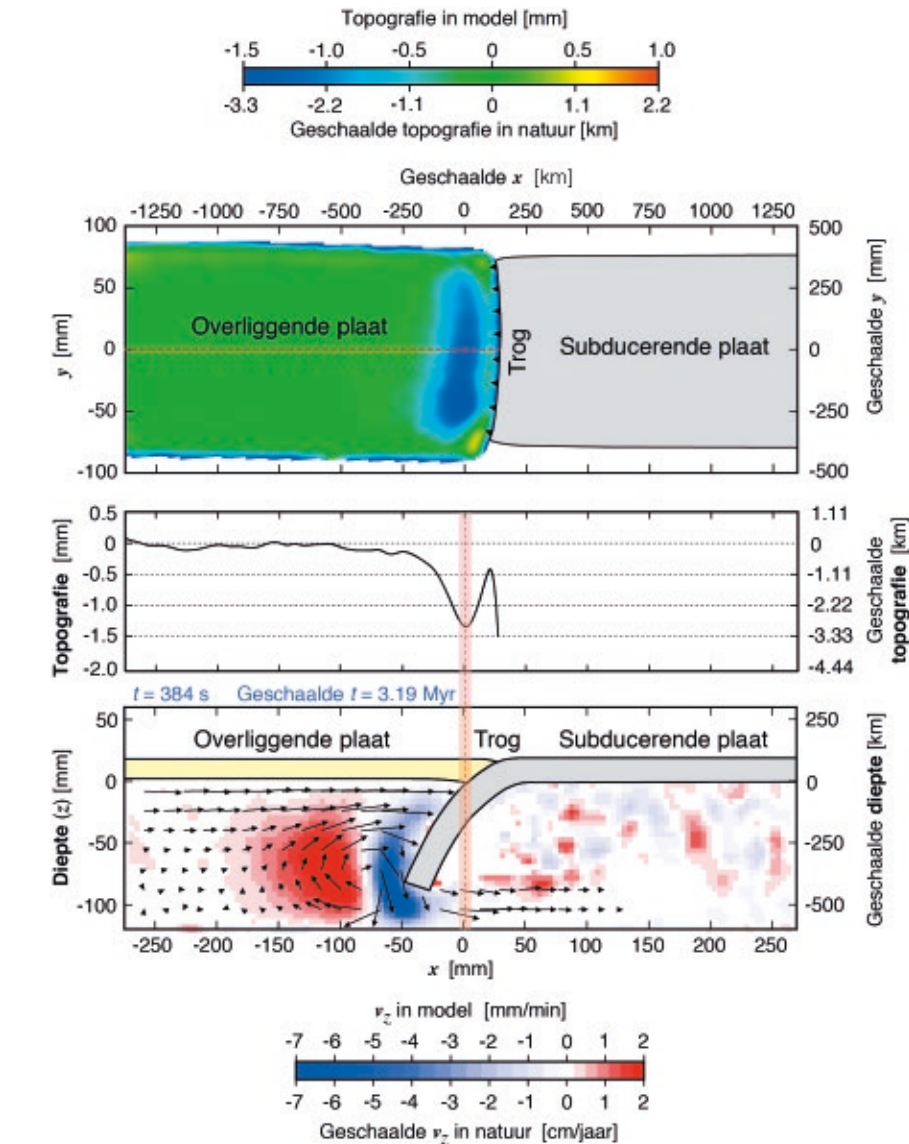
Aan het begin van de 20^e eeuw kwam Alfred Wegener met zijn 'Theory of continental drift'. Deze bood een nieuw kader om diverse geologische observaties te verklaren, waaronder de oorsprong van plooïen en opschuivingen in gebergten. Toen Arthur Holmes in 1928 voorstelde dat continentale drift kan worden aangedreven door mantelconvectiestromingen in het binnenste van de aarde, voegden anderen, waaronder Vening Meinesz, toe dat zulke stromingen ook verantwoordelijk kunnen zijn voor orogenese, plooïing en opschuivingen van korstgesteenten. In de jaren 60 van de vorige eeuw werd de theorie van de plaattektoniek ontwikkeld, waarbij gebergten zoals de Alpen, Himalaya en Andes in een plaattektonisch kader werden geïnterpreteerd. Hieruit bleek dat deze bergen, en hun structuren, zich vormen op convergente plaatgrenzen.

Vici-project

De theorie van de plaattektoniek heeft een enorme voorspellende kracht en biedt tevens een algemeen tektonisch kader voor orogenese. Het blijft echter fundamenteel onbekend welke krachten verantwoordelijk zijn voor de subductie-orogenese van de Andes sinds het midden-Krijt en voor gebergtevorming in de Himalaya sinds het Eoceen. Met het door NWO gefinancierde Vici-project 'Bewonderenswaardige Bergen Bouwen' dat ik op de Vrije Universiteit Amsterdam uitvoer, ben ik druk in de weer om deze fundamenteel wetenschappelijke vraag te beantwoorden.

Raadselachtig gebergte

De Andes ligt aan de westrand van de Zuid-Amerikaanse plaat en is het langste gebergte



Analoog model van progressieve subductie- en mantelstromingen in een 3D-ruimte, waarbij mantelstromingen en de oppervlakte-topografie van de overliggende plaat worden gemeten. Bovenste paneel: bovenaanzicht van subductiemodel met topografie in overliggende plaat. Middelste paneel: topografisch profiel door het midden van de overliggende plaat (rode stippellijn in bovenste paneel). Onderste paneel: zij aanzicht van de stroming in de mantel onder het centrum van de overliggende plaat. Experiment is afkomstig van Chen et al. (2017).

ter wereld. Het is zo'n 7500 km lang, en strekt zich uit van Colombia in het noorden tot Patagonië in het zuiden. Het gebergte bevindt zich bij een subductiezone waar de oceanische Nazca plaat (en eerder de Farallon plaat) wegduikt naar het oosten onder het Zuid-Amerikaanse continent. Deze tektonische setting voor de Andes is uitzonderlijk, en boeit mij al jaren, omdat de meeste subductiezones worden gekarakteriseerd door een lage topografie (bijvoorbeeld Indonesië) of een klein oceaانبekken ('backarc basin', o.a. Noord-Fiji bekken, Egeïsche Zee), en niet door een gigantisch gebergte. Er zijn diverse andere aspecten aan de Andes die uniek en fascinerend zijn, zoals de maximale verkorting en korstdikte

in de Centrale Andes, die afneemt naar het noorden en zuiden; het allergrootste hoogteverschil ter wereld (van -7000 m in de trog tot meer dan 6000 m hoge bergen) in de Centrale Andes, maar een veel lager hoogteverschil in het noorden en zuiden; de oostwaartse beweging van de vulkanische boog; en gebieden met zogenaamde 'flat-slab subduction', waar de onderduikende plaat zich over een afstand van meerdere honderden kilometers horizontaal onder de overliggende plaat uitstrekt. Bovendien is een belangrijke observatie ten aanzien van de Andes dat verkorting begon in het midden-Krijt, maar dat de subductie reeds actief was sinds begin Jura, zo'n 200 miljoen jaar geleden, en dat de verkorting werd

Over de auteur

In de jaren '90 studeerde Wouter Schellart Natuurkunde op de UvA en Geologie en Tektoniek op de VU. In 1999 vertrok hij naar Melbourne, Australië, voor een PhD onderzoek bij Gordon Lister en Mark Jessell op Monash University, dat zich richtte op het geodynamisch modelleren van subductie en "backarc extension". Na zijn PhD afgerond te hebben bleef hij in Australië om zijn geodynamisch onderzoek van subductie zones verder te verdiepen met behulp van research fellowships bij de Research School of Earth Sciences van The Australian National University in Canberra en de School of Earth, Atmosphere and Environment op Monash University in Melbourne. In 2016 keerde hij terug naar Nederland om een nieuwe onderzoeks- en onderwijs stroming in de Geodynamica en Tektoniek op te zetten aan de Vrije Universiteit Amsterdam, en een nieuw geodynamisch laboratorium, het Kuenen-Escher Geodynamics Laboratory (kortweg KEG lab), te ontwikkelen. Het KEG Lab is gebouwd voor het doen van geschaalde experimenten van diverse processen waaronder subductie, mantel convectie en continentale deformatie. Begin 2017 ontving Wouter Schellart een Vici-beurs van NWO voor het onderzoeksvoorstel 'Bewonderenswaardige Bergen Bouwen', dat zich richt op het ontwikkelen van geodynamische modellen om het aandrijfmechanisme en de evolutie van de allergrootste gebergten ter wereld, de Andes en de Himalaya, te doorgronden.

voorafgegaan door extensie in Jura en Vroeg-Krijt.

De Himalaya en Oost-Azië

De Himalaya vormt het hoogste gebergte ter wereld met toppen boven de 8 km, en het aangrenzende Tibetaanse plateau is het hoogste plateau ter wereld met een gemiddelde hoogte van 5 km boven zeeniveau. Dat het Himalaya-Tibetgebergte te maken heeft met de convergentie en botsing van twee continenten, India en Eurazië, is reeds decennia bekend. Tevens is bekend dat de regio gigantische korstverkortingen heeft ondergaan, met schattingen die liggen tussen de 1000 en 1800 km. Wat echter niet bekend is, is waarom de convergentie tussen de twee continenten, alsmede de deformatie in het gebergte, nog steeds actief zijn, lang nadat de continentale botsing zo'n 50 miljoen jaar geleden begon. Tevens is het een raadsel wat de drijfkraft is achter deze langdurige orogenese, en waarom niet alleen de Himalaya en Tibet zijn gedeformeerd, maar ook een gigantisch deel van Oost-Azië, van de zee van Okhotsk in het noorden tot en met Indonesië in het zuiden.

Modelleren

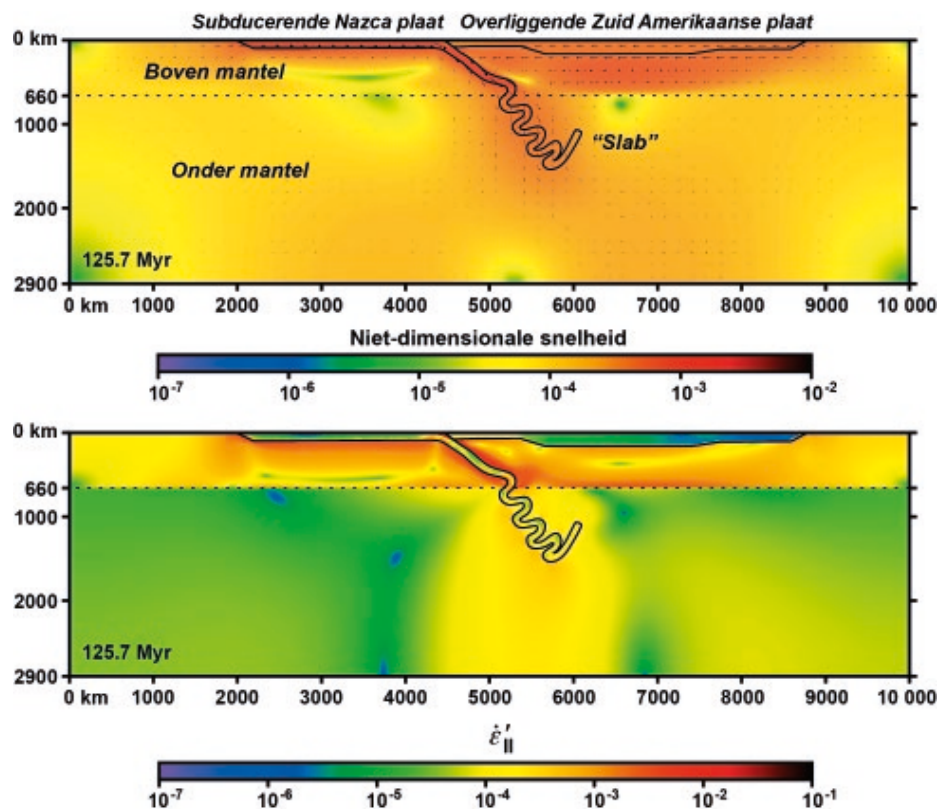
In het Vici-project zal gebruik gemaakt worden van twee modelleertechnieken: analoog modelleren (in het lab) en numeriek modelleren (op (super)computers). Deze twee technieken zijn complementair en bieden de mogelijkheid om diverse geologische processen te kwantificeren en te doorgronden. Onder de diverse krachten van geodynamisch modelleren kunnen worden gerekend de mogelijkheid tot het bieden van een vierdimensionaal (3D ruimte + tijd) plaatje van een bepaald geologisch proces,

en complexe systemen zijn, die door de tijd veranderen in zowel geometrie, kinematica en dynamica.

Analoog

Bij analoog modelleren wordt gebruik gemaakt van laboratoriumexperimenten in bakken tot enkele meters groot. Verschillende materialen worden gebruikt met verschillende materiaaleigenschappen, zoals viskeuze (bijvoorbeeld siliconen en glucosesiroop), visco-plastische (bijvoorbeeld was en parafine) en brosse materialen (granulaire materialen zoals zand en glasbolletjes) die de eigenschappen van gesteenten onder verschillende druk en temperatuur nabootsen. De analoge experimenten zullen plaatsvinden in het Kuenen-Escher Geodynamics Laboratory, een nieuw opgezet laboratorium op de Vrije Universiteit, en zullen worden opgenomen en geanalyseerd door middel van een geavanceerd 'Particle Image Velocimetry' systeem (PIV-systeem). Met zo'n PIV-systeem is het mogelijk om tegelijkertijd zowel de stromingspatronen in een vloeistof (bijvoorbeeld in de analoge mantel), alsook de deformatie (bijvoorbeeld in de analoge tektonische platen) en de topografie aan het oppervlak te meten en te kwantificeren. Met een dergelijk systeem wordt het dus mogelijk om bijvoorbeeld bij een analoog model van de Zuid-Amerikaanse sub-

de mogelijkheid voor kwantitatief parametrisch onderzoek, en het testen of een conceptueel geodynamisch model fysisch plausibel is of niet. Een van de belangrijke dingen die we reeds hebben geleerd van geodynamische modelleren van subductie is dat subductiezones extreem dynamische



Profiel van een numeriek model van progressieve subductie- en mantelstromingen in een 2D-ruimte, waarbij de Zuid-Amerikaanse subductiezone wordt gesimuleerd. Bovenste paneel: niet-dimensionale snelheidsveld; onderste paneel: niet-dimensionale deformatieveld.

ductiezone zowel de mantelstromingen te meten alsmede de deformatie in de analoge Zuid-Amerikaanse plaat en de topografie die zich vormt aan de westrand van de plaat.

Numeriek

De numerieke modellen gebruiken de open source numerieke code Underworld, die door Louis Moresi en collega's is ontwikkeld op Monash University en The University of Melbourne in Melbourne, Australië. Dit is een 'particle-in-cell' eindige-elementencode, die speciaal is ontwikkeld voor het simuleren van de evolutie van grootschalige geodynamische processen in tweedimensionale en driedimensionale ruimtes. De code is gebruikt voor het simuleren van diverse processen waaronder subductie en mantelconvectie, waarbij o.a. snelheidsvelden, deformatievelden en spanningsvelden kunnen worden gekwantificeerd.

Met de numerieke modellen heb ik reeds een aantal interessante bevindingen gedaan over de Andes, waaruit blijkt dat het ontstaan en een aantal unieke aspecten van dit gebergte voornamelijk kunnen worden toegeschreven aan de grootte, diepte en ouderdom van de subductiezone (Schellart, 2017). Potentieel de meest onverwachte uitkomst van deze eerste geodynamische modellen is dat ze ook implicaties hebben voor het debat over de groei en verwoesting van continentale korst op aarde en het totale budget hiervan. Het onderzoek laat zien dat de berekeningen voor het budget van de continentale korst, die leken te wijzen op een stabiel korstvolume in het Fanerozoïcum, onjuist zijn doordat de snelheid van verwoesting van continentale korst bij subductie (door subductie-erosie) ernstig is overschat. De schatting van de subductie-erosie snelheid was gebaseerd op de aanname dat de Zuid-Amerikaanse subductiezone geometrisch onveranderd is gebleven gedurende de afgelopen 200 miljoen jaar, maar het geodynamisch model heeft het tegendeel gedemonstreerd.

Wouter P. Schellart
w.p.schellart@vu.nl

Literatuur

Chen, Z., W. P. Schellart, J. C. Duarte, and V. Strak, 2017. Topography of the overriding plate during progressive subduction: A dynamic model to explain forearc subsidence, *Geophysical Research Letters*, 44, 9632-9643, doi:10.1002/2017GL074672.
Schellart, W. P., 2017 (in press). Andean mountain building and magmatic arc migration driven by subduction-induced whole mantle flow, *Nature Communications*.

.stukje steen

Onyx

Onyx is een term met verschillende betekenissen. Wij geologen gebruiken het voor gebande chalcedoon, de steenhandel voor gebande, doorschijnende 'marmers'. Dit zijn geen echte, metamorfe marmers maar gebande afzettingen van calciëet of aragoniet neergeslagen uit water, met andere woorden een variant op travertijn. Het is het alabaster van de Antieken, ook weer een verwarrende naam, aangezien albast geologisch per definitie uit gips bestaat. De naam zou terug gaan op de antieke winningslocatie Alabastron in Egypte. Ter 'verduidelijk' wordt dan van calciëetabast gesproken. De onyx marmers vertonen vaak een gebande structuur van wit-beige tot geel-bruin (door de aanwezigheid van ijzer(hydr)oxides) in allerlei gekromde patronen. Het materiaal kent een lange traditie als siersteen, net als witte en gekleurde marmers. Vaak gaat het om bijvoorbeeld inlegsteen (lastra) in wandbekledingen of tafelbladen, meestal in kleine hoeveelheden. Spectaculair zijn de

toepassingen als vensters, in plaats van glas. Gezaagd in dunne platen komt het doorschijnende karakter goed tot zijn recht. Middeleeuws Italië (Ravenna, Orvieto) kent verschillende toepassingen, maar moderne toepassingen zijn er ook. Een fraai voorbeeld is te vinden in St. Jan bij de Latijnse Poort in Rome, één van de vroeg-christelijke basilieken van de stad, gesticht tijdens paus Gelasius I (492-496). De kerk is in de 8e eeuw hersteld door paus Adriaan I (772-795) en eind 12e eeuw door paus Celestinus III (1191-1198) tot basiliek verheven. Bij de restauratie in 1940-1941 werden latere barokke toevoegingen weer verwijderd en de kerk terug gerestaureerd tot zijn 12e eeuwse vorm. Hierbij kreeg de zeszijdige koorabsis ook zijn huidige onyx vensters. In de ochtendzon komen ze bij uitstek tot hun recht.

Timo G. Nijland & Wim Dubelaar



Foto: Timo G. Nijland