

Samenvatting en conclusies (Summary and conclusions in Dutch)

Samenvatting

Dit proefschrift draait om de vraag welk type geodynamica actief was in de vroege Aarde en andere terrestrische planeten, met name Mars en Venus. De geologie van het Archaïcum (4.0-2.5 miljard jaar geleden) verschilt aanzienlijk van de recente geologie, en daarom is het waarschijnlijk dat andere processen verantwoordelijk waren voor de vorming hiervan dan de hedendaagse plaattektoniek. Deze wordt gekenmerkt door ten opzichte van elkaar bewegende platen die uiteen drijven (mid-oceanische ruggen), botsen (bijvoorbeeld de Himalaya) of de mantel in duiken in subductiezones (bijvoorbeeld aan de westkust van Zuid Amerika). Er zijn diverse aanwijzingen dat de interne temperatuur van de jonge Aarde beduidend hoger was dan de huidige. De fysische gevolgen die te verwachten zijn voor een hogere manteltemperatuur ondersteunen de conclusie dat een ander geodynamisch regime in de vroege Aarde actief moet zijn geweest.

Zowel Venus als Mars is vergelijkbaar met de Aarde wat betreft samenstelling, en Venus heeft ook een vergelijkbare grootte, terwijl Mars een diameter van ongeveer de helft van die van de Aarde heeft. Ondanks de overeenkomsten zien de oppervlakken van beide planeten er beduidend anders uit dan dat van de Aarde. Zo zijn er bijvoorbeeld op geen van beide planeten aanwijzingen voor recente plaattektoniek gevonden.

In dit proefschrift worden de omstandigheden waaronder plaattektoniek en alternatieve geodynamische regimes kunnen opereren onderzocht voor de terrestrische planeten. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van computermodellen. Voor de Aarde worden tevens meer gedetailleerde studies van de verschillende typen dynamica gebruikt om de resultaten van de gemodelleerde processen te vergelijken met overblijfselen van materiaal uit het Archaïcum die tegenwoordig nog op bepaalde plaatsen aan het aardoppervlak te vinden zijn (zie Figuur 1.1).

Na een bespreking van de numerieke modellen die in dit proefschrift worden gebruikt, en een beschrijving van de numerieke methoden die gebruikt zijn voor het verkrijgen van modeloplossingen, wordt een aantal studies gepresenteerd waarin de problemen die verband houden met het centrale thema van het proefschrift worden onderzocht.

Hoofdstuk 4 behandelt de omstandigheden waaronder plaattektoniek kan opereren op de verschillende terrestrische planeten.

Een belangrijke factor voor de werking van plaattektoniek is de verdeling van drijfvermogen (ten opzicht van de onderliggende mantel) in oceanische lithosfeer, hetgeen gerelateerd is aan de ouderdom van de lithosfeer. Het drijfvermogen hangt ook af van

composicionele gelaagdheid die het gevolg is van decompressiesmelten van mantelgesteente onder mid-oceanische ruggen. Het verloop van dit proces is afhankelijk van de temperatuur- en drukcondities die variëren tussen de terrestrische planeten en ook gedurende de afkoelingsgeschiedenissen van de planeten. In de modelexperimenten is een reeks van waarden voor de zwaartekrachtsversnelling (representatief voor verschillende terrestrische planeten), potentiële manteltemperatuur (representatief voor verschillende tijdstippen in de geschiedenis van de planeten) en oppervlaktetemperatuur toegepast om de condities waaronder plaattektoniek mogelijk is als mechanisme voor de afkoeling van de terrestrische planeten te onderzoeken. De effecten van manteltemperatuur op de samenstelling en dichtheid van smeltprodukten en op de lithosfeerdikte zijn meegenomen in de modelberekeningen. De resultaten tonen aan dat de tijd die nodig is voor oceanische lithosfeer om negatief drijfvermogen te ontwikkelen (ten opzichte van de onderliggende mantel) redelijk (minder dan enkele honderden miljoenen jaren) is voor een potentiële temperatuur onder de $\sim 1500^{\circ}\text{C}$ voor de Aarde. Voor Venus is dit ongeveer 1450°C (ter vergelijking: de huidige potentiële temperatuur van de Aarde is ongeveer 1350°C). In het geringere zwaartekrachtsveld van Mars wordt een veel dikkere gelaagdheid geproduceerd en het model geeft aan dat plaattektoniek alleen actief kan zijn op redelijke tijdschalen bij potentiële manteltemperaturen onder $1300 - 1400^{\circ}\text{C}$.

In het volgende hoofdstuk (5) worden afkoelingskarakteristieken van plaattektoniek en een alternatief mechanisme, i.e. grootschalig uitvloeiingsvulkanisme, gekwantificeerd. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van parametrische modellen.

Geofysische argumenten tegen plaattektoniek in een hete Aarde, gebaseerd op beschouwing van het drijfvermogen van oceanische lithosfeer, vereisen een alternatief middel om de planeet af te koelen van zijn vroege hete staat naar de huidige situatie. Grootschalig uitvloeiingsvulkanisme zou zo'n alternatief kunnen zijn in een situatie die meer lijkt op het *stagnant lid* regime waarin Mars en Venus zich tegenwoordig bevinden. Uitgaande van het idee dat de volledige warmte-afgifte van de Aarde door haar oppervlak moet komen zijn parametrische modellen opgezet om de afkoelingskarakteristieken van deze twee mechanismen, plaattektoniek en grootschalig uitvloeiingsvulkanisme, te evalueren. De modelresultaten laten zien dat, in het geval van een gelijkmatig (exponentieel) afkoelende Aarde, plaattektoniek in staat is om alle benodigde warmte af te voeren op een tempo dat vergelijkbaar of zelfs kleiner dan het huidige tempo. Dit is in strijd met eerdere speculaties. Het uitvloeiingsmechanisme is mogelijk een belangrijk afkoelingsmechanisme geweest in de vroege Aarde. Dit mechanisme vereist echter uitvloeiingssnelheden die tot twee orden van grootte groter zijn dan die van recente (van de laatste paar honderd miljoen jaar) grootschalige uitvloeiingsprovincies om een belangrijke bijdrage te kunnen leveren aan de afkoeling van de Aarde. Dit hoeft echter geen probleem te zijn, aangezien geologische waarnemingen aangeven dat uitvloeiingsvulkanisme grootschaliger was en bovendien vaker voorkwam in de vroege Aarde. Vanwege zijn geringere afmetingen is Mars in staat om via warmtegeleiding door de lithosfeer heen met een aanzienlijke snelheid af te koelen. Dientengevolge heeft het waarschijnlijk nooit een extra afkoelingsmechanisme nodig gehad. Venus daarentegen heeft waarschijnlijk gedurende iedere fase van haar mogelijk episodische geschiedenis een extra afkoelingsmechanisme nodig gehad, met een tempo vergelijkbaar met Aardse snelheden.

Nu de omstandigheden waaronder plaattektoniek kan opereren en de afkoelingskarakteristieken van zowel plaattektoniek als grootschalig uitvloeiingsvulkanisme bestudeerd zijn, wordt het uitvloeiingsmechanisme in meer detail onderzocht in hoofdstuk 6, met de nadruk op de dynamica en geochemische effecten.

Numerieke thermochemische convectiemodellen met inbegrip van partieel smelten en een simpel mechanisme voor de segregatie van smelt en produktie van oceaankorst worden gebruikt om een alternatieve reeks van dynamische processen die mogelijk actief zijn geweest in de vroege aarde te bestuderen. De modelresultaten tonen drie processen die mogelijk een belangrijke rol hebben gespeeld in de produktie van oceanische korst en haar terugkeer de mantel in: (1) Kleinschalige ($x \cdot 100$ km) convectie van de onderkorst en ondiepe bovenmantel, met partieel smelten en dientengevolge korstproduktie in de opwaartse stroming, en delaminatie van eclogitische onderkorst in de neerwaartse stroming. (2) Grootschalige *oppervlaktevernieuwing* waarin (bijna) de volledige korst de (uiteindelijk onder-) mantel in zinkt. Dit zorgt voor het ontstaan van een stabiel reservoir aangerijkt in incompatibele elementen in de diepe mantel. Nieuwe korst wordt gelijktijdig gevormd aan het oppervlak. (3) De intrusie van diapieren (vergelijkbaar met opstijgende blobs in een lavalamp op een wat grotere schaal) met een hoge temperatuur (ongeveer 250 K warmer dan de omringende mantel) uit de ondermantel, hetgeen smelten van mantelgesteente en korstvorming op grote schaal veroorzaakt. Dit mechanisme produceert diapieren in de Archaische bovenmantel die veel warmer zijn dan totnogtoe verwacht vanuit theoretische overwegingen.

Hoofdstuk 7 behandelt de vorming van continentaal materiaal in de geodynamische context van het vorige hoofdstuk.

Archaische cratons, gevormd in de vroege en hete geschiedenis van de Aarde, bestaan voor een belangrijk deel uit TTG-intrusieven (Tontaliet-Trondhjemet-Granodioriet) en groensteengordels. De vorming van deze graniet-groensteengebieden wordt vaak toegeschreven aan plaattektonische processen, die echter waarschijnlijk niet zijn opgetreden tijdens de vroege geschiedenis van de Aarde. Daarom wordt er hier een alternatief mechanisme voorgesteld voor de gelijktijdige en naburige produktie van TTG-intrusieven en groensteen-achtige korstsegmenten: Als een lokaal anomaal dikke basaltische korst wordt geproduceerd door achtereenvolgende opeenstapeling van extrusieve of intrusieve basalten door partieel smelten van de onderliggende convecterende mantel kan de overgang van een voldoende grote hoeveelheid basalt in de onderkorst naar eclogiet een oppervlaktevernieuwingsepisode veroorzaken. Hierbij zinkt een korstsectie van meer dan 1000 km lang in minder dan 2 miljoen jaar de mantel in. Decompressiesmelten in de complementair omhoog stromende mantel genereert een grote hoeveelheid basaltisch materiaal, die de oorspronkelijke (eveneens basaltische) korst vervangt. Partieel smelten aan de basis van deze nieuw gevormde korst kan felsische smelten opleveren die als intrusiva en/of extrusiva aan de overwegend mafische korst worden toegevoegd. Dit resulteert in een korstsequentie die lijkt op een groensteengordel. Partieel smelten van metabasalt in de zinkende korstsectie produceert een aanzienlijk volume TTG-smelt dat direct boven de plaats van 'subductie' aan de korst wordt toegevoegd, mogelijk in intrusieve vorm (batholiet). Dit scenario wordt op zelf-consistente wijze geproduceerd door numerieke thermochemische mantelconvectiemodellen met inbegrip van partieel smelten van mantel- en

korstmateriaal. De temperatuur- en drukcondities waaronder partieel smelten van metabasalten plaatsvindt in dit scenario zijn consistent met geochemische sporenelementgegevens voor TTG's. Deze resultaten geven aan dat smelten plaatsvindt onder amfibolietcondities, en niet onder eclogiet-condities (hogere druk/grotere diepte). Andere geodynamische settings die ook zijn onderzocht, namelijk partieel smelten in kleinschalige delaminaties van de onderkorst, aan de basis van een anomaal dikke korst en door de instroom van een diapier uit de ondermantel, vertonen veelal smelten in het eclogiet stabiliteitsveld en reproduceren dit gedrag dus niet. Het oppervlaktevernieuwingsscenario is mogelijk ook belangrijk geweest in de geschiedenis van Venus, maar waarschijnlijk heeft het hier geen grote volumina continentaal materiaal geproduceerd vanwege het droge karakter van de planeet.

De stabiliteit van Archaïsche cratons wordt vaak toegeschreven aan de aanwezigheid van een wortel met een lage dichtheid onder deze continentale fragmenten. In hoofdstuk 8 wordt het belang van verschillende deformatieprocessen in de vorming van een dergelijke wortel onderzocht.

Een mogelijk mechanisme voor het toevoegen van materiaal aan een continentale wortel is met behulp van opwaartse stromingen vanuit de convecterende mantel waarin decompressiesmelten optreedt. Dit hoofdstuk toont resultaten van numerieke modellen van de interactie tussen smeltende diapieren en continentale wortels onder Archaïsche omstandigheden. In een uitbreiding van eerder werk (De Smet et al., 2000a) wordt de invloed van mantelrheologie op het gedrag van diapieren onderzocht, met nadruk op het verschil in gedrag van diapieren met een composiete rheologie, waarin zowel het korrelgroottegevoelige diffusiekruip-mechanisme als het dislocatiekruip-mechanisme zijn meegenomen. De korrelgrootte, hier uniform verondersteld, wordt gebruikt als een regelparameter om modelgevallen te verkrijgen met een variabele bijdrage van de twee kruipmechanismen. De diapieren in het composiete rheologiemodel stijgen veel sneller dan in een puur Newtoniaans model (alleen diffusiekruip). Waargenomen stijgtijden voor de diapieren van 230 km diepte tot de top van het pad op ongeveer 80 km diepte zijn ongeveer 1 miljoen jaar voor een Newtoniaans model (gemiddeld 14 cm/jaar), terwijl een composiet rheologiemodel er slechts 50 duizend jaar over doet (gemiddeld 3 m/jaar) met dezelfde parameters voor de Newtoniaanse component. Dit illustreert de grote invloed van de dislocatiekruipcomponent op het visceuze deformatieproces.

Het effect van een toename van de viscositeit (strokerigheid) ten gevolge van dehydratie (waterverlies) gedurende partieel smelten werd ook onderzocht. Deze toename heeft een sterke invloed op de ontwikkeling van stijgende diapieren. De stijgsnelheid en laterale uitspreiding van de diapieren aan de top van hun stijgpaden worden effectief verminderd als een viscositeitstoename met een factor 10 wordt toegepast, en het effect wordt sterker voor grotere factoren. Gemiddelde verticale snelheden variëren van 1.4 cm/jaar voor een factor 10 tot 2 mm/jaar voor een factor 200. Hierdoor worden karakteristieke tijdschalen van diapierintrusie opgerekt tot een waarde tussen 5 en 50 miljoen jaar voor dehydratie viscositeitsprefactorwaarden van respectievelijk 10 en 200.

In tegenstelling tot het grote verschil tussen Newtoniaanse en composiete rheologiemodellen worden slechts kleine verschillen gevonden in de algehele dynamica tussen de composiete rheologiemodellen onderling, gekarakteriseerd door verschillende waarden

voor de uniforme korrelgrootte.

De compositie rheologiemodellen tonen een zelfregulerend gedrag, waarbij substantiële verschillen tussen de relatieve bijdragen van de twee deformatiemechanismen resulteren in vergelijkbare effectieve viscositeiten, en corresponderende stromingsdynamica, als gevolg van de lokaal overheersende werking van dislocatiekruip bij hoge spanningen.

Spanningsniveau's en druk- en temperatuurpaden in de modelresultaten zijn consistent met schattingen voor Precambrische peridotietlichamen, die waarschijnlijk voortgekomen zijn uit diapirisme zoals in dit hoofdstuk gemodelleerd.

Conclusies

Uitgaande van de diverse resultaten verkregen voor de Aarde, Venus en Mars in dit proefschrift kunnen grove planetaire geschiedenissen worden geconstrueerd.

Aarde

Het initiële stadium direct na accretie en differentiatie van de kern werd waarschijnlijk gekarakteriseerd door een magma-oceaan (Murthy, 1992b; Abe, 1993a, 1997). Na het stollen van de magma-oceaan was de mantel nog erg heet, te heet om plaattektoniek toe te staan op basis van het drijfvermogen van oceanische lithosfeer (zie hoofdstuk 4). Desalniettemin was er een effectief afkoelingsmechanisme noodzakelijk (hoofdstuk 5), en een combinatie van grootschalig uitvloeiingsvulkanisme en periodieke oppervlaktevernieuwing speelde waarschijnlijk een belangrijke rol in de dynamica, en ook in de afkoeling van de planeet. Daarbij produceerden de oppervlaktevernieuwingen aanzienlijke hoeveelheden felsisch materiaal, dat proto-continenten vormde (zie hoofdstuk 7). Toen de manteltemperatuur tot ongeveer 1500°C daalde verkreeg oceanische lithosfeer een negatief drijfvermogen op een tijdschaal van enkele honderden miljoenen jaren of minder en werd actieve plaattektoniek mogelijk (hoofdstuk 4). Er kan worden gespeculeerd dat een min of meer gelijkmatige overgang van overheersend oppervlaktevernieuwingen naar plaattektoniek plaatsvond rond deze manteltemperatuur, mogelijk gedurende het laat-Archæicum. De komst van plaattektoniek voorzag bovendien in een additioneel mechanisme voor continentgroeï via de accretie van vulkanische eilandbogen. Voortgaande activiteit van plaattektoniek en de resulterende afkoeling van de mantel brachten de Aarde in haar huidige toestand.

Venus

Hoewel Venus vergelijkbaar is met de Aarde wat betreft omvang en samenstelling, onderging Venus niet dezelfde ontwikkeling. Periodieke vernieuwing van de korst van Venus is gesuggereerd (Turcotte, 1995; Fowler and O'Brien, 1996), mogelijk door periodieke activiteit van plaattektoniek (Solomatov and Moresi, 1996) of door het oppervlaktevernieuwingsmechanisme dat in hoofdstuk 6 is gepresenteerd. Tegenwoordig is Venus een droge planeet, hetgeen plaattektoniek zou tegenwerken, met name door een toename in

de breuksterkte (Nimmo and McKenzie, 1998). Tijdens haar vroege geschiedenis was de planeet mogelijk minder droog (Campbell and Taylor, 1983; Nimmo and McKenzie, 1998), maar de manteltemperatuur was waarschijnlijk te hoog om plaattektoniek mogelijk te maken (zie hoofdstuk 4). Hieruit volgt de speculatie dat Venus na een initieel magma-oceaan regime gedurende de vroegste geschiedenis in een dynamisch regime van periodieke oppervlaktevernieuwing, beschreven in hoofdstuk 6, is blijven hangen tot op de dag van vandaag.

Mars

Als gevolg van de geringe grootte van Mars in vergelijking met de Aarde en Venus is zijn verhouding tussen oppervlak en volume ($\sim R^2/R^3$) veel groter, hetgeen conductieve afkoeling door de lithosfeer veel efficiënter maakt (zie hoofdstuk 5). Waarnemingen en geofysische overwegingen geven aan dat als er al een grootschalig tektonisch regime actief is geweest op Mars, dit tijdens de vroege geschiedenis moet zijn geweest (Zuber, 2001), hoewel mantelconvectiemodellen met decompressiesmelten onder geringe zwaartekrachtscondities laten zien dat een dikke, lichte schil in de bovenmantel wordt gevormd die plaattektoniek tegenwerkt (Schott et al., 2001). Echter, vanwege zijn zwakke zwaartekrachtveld in vergelijking met de Aarde zijn de omstandigheden waaronder plaattektoniek actief kan zijn beperkt to potentiële manteltemperaturen beneden $1300 - 1400^\circ C$ (hoofdstuk 5). De hogere manteltemperatuur die wordt verwacht voor de vroege geschiedenis van Mars werkt plaattektoniek dus tegen. Het is mogelijk dat het oppervlaktevernieuingsmechanisme van hoofdstuk 6 actief is geweest tijdens de vroege geschiedenis van de planeet. Maar na een mogelijke periode van dit regime ging Mars waarschijnlijk snel over naar het *stagnant lid* regime, waarin afkoeling overheersend door geleiding tot in het heden doorgaat.