

Diss. ETH No. 19387

U-SERIES CONSTRAINTS ON MANTLE MELTING AND MAGMA EVOLUTION

A dissertation submitted to the

ETH ZÜRICH

For the degree of
Doctor of Sciences

Presented by

Janne Marij Koornneef

MSc. Vrije Universiteit Amsterdam

Date of birth: 02.01.1979

Citizen of The Netherlands

Accepted on the recommendation of:

Prof. Dr. Bernard Bourdon

Prof. Dr. Andreas Stracke

Prof. Dr. Max Schmidt

Prof. Dr. Tim Elliott

Dr. John MacLennan

Zürich, 2011

Summary

The main part of this thesis investigates mantle melting beneath Iceland based on the geochemistry of postglacial lavas collected across the Iceland hotspot. The use of a wide variety of geochemical tracers allows constraining the relative influence of physical source parameters and dynamic melting processes. Particularly U-series isotopes, which inform us on rates of mantle melting are a sensitive tool to map the lateral expression of the temperature anomaly and to resolve variability in melt productivity as a result of source heterogeneity.

The first part of the thesis presents major- and trace element data, and Hf and Nd isotope compositions of lavas erupted along Iceland's main rift zones (Chapter 2). Relationships between trace element ratios that involve a moderately incompatible element (i.e. La/Yb) and Hf and Nd isotope compositions demonstrate that the melting processes and sampling of source heterogeneity beneath Iceland are closely related. Variability in the degree of melting on a local scale (a few square km) suggests that the depth from which melts are extracted is variable, which has a dominant control on the geochemistry of the lavas. This effect overwhelms the effect of lateral variation in excess mantle temperature (ΔT) across the Iceland plume on the trace element and isotope ratios that involve a moderately incompatible element. Highly incompatible elements are not influenced by the degree of melting, which leads to a decoupling from trace element ratios involving a moderately incompatible element and from Hf and Nd isotope compositions. Variable enrichments in ratios of highly incompatible trace elements such as Nb/U, Nb/La and U/La in different zones rift zones suggests that the enriched component, which has characteristics similar to a recycled E-MORB crust, is heterogeneously distributed in the mantle beneath Iceland. The importance of melt mixing during progressive melting is emphasised in Chapter 2 by a polybaric mixing model, which applies different styles of melt mixing during melt extraction. The majority of combined trace element and Nd-Hf-Sr-Pb isotope systematics of Icelandic basalts can be explained by a scenario in which melts from a recycled E-MORB crust and the depleted mantle are randomly and incompletely mixed and extracted from variable depths.

The results of Chapter 2 serve as the framework for the application of U-series systematics in the basalts presented in Chapter 4. A new method to separate U, Th, Pa and Ra from a single sample aliquot, and the mass spectrometric techniques to determine concentrations and isotope ratios by MC-ICPMS are presented in Chapter 3. This new method is applied to investigate the U-series systematics of the postglacial Icelandic lavas in Chapter 4.

The variability in U-series disequilibria measured on samples from Iceland's main rift zones reveals the influence of both ΔT and source heterogeneity (Chapter 4). A general decrease in the ^{230}Th and ^{231}Pa excesses towards the centre of Iceland is consistent with a model of increasing upwelling velocity and complies with the presence of a buoyant thermal plume beneath Iceland. However, local variability in the ^{230}Th - ^{238}U and ^{231}Pa - ^{235}U disequilibria for the samples that are also characterised by variable Nb/U, Nb/La and U/Th demonstrates that source heterogeneity induces variability in melting rates on a local scale. Low ^{230}Th - and ^{231}Pa -excesses for the most enriched samples indicate that the enriched source component is characterised by higher melt productivity, consistent with predictions from experimental studies. The results therefore highlight the importance of lithological heterogeneities to the physical mantle melting process and the final chemistry of MORB and OIB lavas.

In the final part of this thesis (Chapter 5) the potential to measure in situ U-Th disequilibria in titanite and apatite by femto second LA-MC-ICPMS is investigated. The study aimed to spatially resolve variability in U-series disequilibria in accessory minerals from Laacher See Volcano, Germany to constrain timescales of magma evolution within the crust. Accurate data obtained on an in-house standard titanite mineral (SM) bracketed by an in-house titanite glass (TG) are promising and show the great potential of this time efficient analysis technique. Two aspects are, however, found to limit the accuracy and precision of data for Laacher See titanite minerals: (1) Variable elemental fractionation between standards and samples and (2) Low signal intensities. This prevented using the collected data to infer timescales of crystal growth for the Laacher See samples. Further analytical developments to be preformed in near future experiments are required to improve both analytical precision and accuracy.

Zusammenfassung

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Untersuchung von Erdmantelschmelzen aus Island, basierend auf der Geochemie von postglazialen Laven, welche entlang des Island-Hotspots beprobt wurden. Die Verwendung diverser geochemischer Tracer erlaubt es, Rückschlüsse auf das Zusammenspiel von physikalischen Parametern der Magmenquelle und dynamischen Schmelzprozessen zu ziehen. Hervorzuheben sind Uran-Serien-Isotope, über welche sich Aufschmelzraten des Erdmantels bestimmen lassen. Darüber hinaus lassen sich laterale Temperaturanomalien auskartieren, sowie Veränderungen in der Magmenproduktionsrate aufgrund von Heterogenitäten in der Quellregion feststellen.

Im ersten Teil der Arbeit werden Haupt- und Spurenelementzusammensetzungen, sowie Hf- und Nd-Isotopendaten von Laven aus der Haupt-Riftzone Islands präsentiert (Kapitel 2). Anhand von Spurenelementverhältnissen, welche ein moderat inkompatibles Element beinhalten (z.B. La/Yb), und den Hf- und Nd-Isotopenzusammensetzungen wird eine Korrelation von Aufschmelzprozessen mit Quellheterogenitäten deutlich. Unterschiedliche Aufschmelzgrade deuten auf variable Quelltiefen hin, und bestimmen dadurch die lokale (wenige Quadratkilometer) chemische Zusammensetzung der Laven. Somit ist der Einfluss lateraler Unterschiede in überschüssiger Mantelwärme (ΔT) entlang des Island-Plumes auf die Isotopen- und Spurenelementverhältnisse mit moderat inkompatiblen Elementen sekundär. Hochinkompatible Elemente werden nicht vom Aufschmelzgrad beeinflusst und sind somit von den Hf und Nd Isotopenzusammensetzungen, sowie den Spurenelementverhältnissen, welche ein moderat inkompatibles Element beinhalten, entkoppelt. Entlang der Riftzone sind unterschiedlich starke Anreicherungen von hochinkompatiblen Spurenelementen in unter anderem Nb/U-, Nb/La- und U/La-Verhältnissen sichtbar. Dies deutet darauf hin, dass eine angereicherte Komponente, ähnlich zu rezykliertem E-MORB, heterogen im Erdmantel unter Island verteilt ist. Der Einfluss von Magmenmischung während des Aufschmelzprozesses wird in Kapitel 2 mit einem polybaren Mischungsmodell verdeutlicht. Das Modell verwendet dabei unterschiedliche Mischungsarten während der Schmelzextraktion. Der Grossteil der Spurenelement- und Nd-Hf-Sr-Pb Systematik wird dadurch erklärt, dass Schmelzen eines

rezyklierten E-MORB und verarmten Mantels regellos und unvollständig gemischt und aus unterschiedlichen Tiefen angezapft werden.

Die Ergebnisse aus Kapitel 2 werden als Grundlage für die U-Serien-Systematik der Basalte in Kapitel 4 genommen. In Kapitel 3 werden eine neuartige Methode zur Separation von U, Th, Pa und Ra von ein und derselben Probe, sowie die massenspektrometrischen Techniken zur Ermittlung ihrer Konzentrationen und Isotopenverhältnisse mittels MC-ICPMS präsentiert. Die neu entwickelte Technik wurde angewandt, um die U-Serien-Systematik der postglazialen isländischen Laven in Kapitel 4 zu untersuchen.

Die variablen U-Serien-Ungleichgewichte der Proben aus der isländischen Riftzone demonstrieren den Einfluss von ΔT und der Heterogenität der Magmenquelle (Kapitel 4). Allgemein abnehmende ^{230}Th - und ^{231}Pa -Überschüsse in Richtung Zentralislands sind im Einklang mit der Annahme eines heißen Plumes unter Island und einem Modell mit zunehmenden Auftriebsraten. Die neben den Nb/U-, Nb/La-, U/Th-Verhältnissen ebenfalls variablen ^{230}Th - ^{238}U - und ^{231}Pa - ^{235}U -Ungleichgewichte zeigen jedoch auf, dass Aufschmelzraten lokal durch die Heterogenitäten in der Magmenquelle beeinflusst werden. Geringe ^{230}Th - und ^{231}Pa -Überschüsse in den am stärksten angereicherten Proben zeigen, dass eine höhere Magmenproduktivität für die angereicherte Mantelkomponente typisch ist, was im Einklang mit experimentellen Beobachtungen steht. Die Ergebnisse verdeutlichen daher den Einfluss von lithologischen Heterogenitäten im Erdmantel auf Aufschmelzprozesse und die geochemische Zusammensetzung von MORB und OIB Laven.

Das abschliessende Kapitel 5 untersucht das Potenzial U-Th Ungleichgewichte in Titanit und Apatit mittels Femtosekunden-LA-MC-ICPMS zu quantifizieren. Ziel der Studie war es, eine räumliche Auflösung der U-Serien-Ungleichgewichte in akzessorischen Mineralen vom Laacher See Vulkan (Deutschland) zu erhalten, um Zeitskalen der Magmenentwicklung in der Erdkruste zu ermitteln. Sorgfältige Messungen eines hauseigenen Titanitminerals relativ zu einem hauseigenen Titanitglas-Standard sind vielversprechend und deuten auf ein grosses Potenzial dieser zeitsparenden Technik hin. Die Genauigkeit und Präzision der Daten für die Laacher See Titanite wird jedoch durch folgende Punkte beschränkt: (1) Unbeständige Elementfraktionierung zwischen Standards und Proben, sowie (2) niedrige Intensitäten. Als Folge dessen war es nicht möglich anhand der gesammelten Daten Zeitskalen von

Kristallwachstum an den Proben vom Laacher See zu bestimmen. Die Verbesserung der Präzision und Genauigkeit der Analysen ist zeitnah geplant.