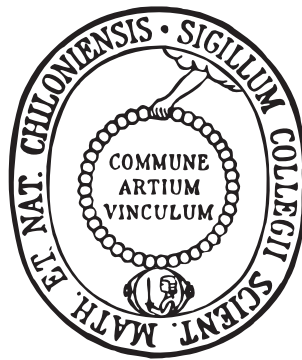

SO208 PLUMEFLUX:
Distribution of Galápagos plume
material in the equatorial East
Pacific Ocean



Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
Christian-Albrechts-Universität
zu Kiel
vorgelegt von
Antje Herbrich
Kiel, 2014

Erstgutachter:Prof. Dr. Kaj Hoernle

Zweitgutachter:Dr. habil. Jörg Geldmacher

Tag der mündlichen Prüfung: 17.11.2014

Zum Druck genehmigt: Kiel, 03.05.2016

Der Dekan

Zusammenfassung

Gegenstand der vorliegenden Dissertation ist die Untersuchung der Verbreitung von Galápagosplumematerial im äquatorialen Ostpazifik. Am Beispiel des Galápagosplume in Verbindung mit dem benachbarten Galápagosspreizungszentrum (GSC; auch als Cocos-Nazca-Spreizungszentrum (CNS) bezeichnet) soll diese Arbeit zu einem besseren Verständnis von Plume-Rücken-Wechselwirkungen und Materialtransport im oberen Mantel beitragen. Der Schwerpunkt wurde dabei auf die räumliche Ausdehnung von Galápagosplumematerial im äquatorialen Ostpazifik (Teilprojekt 1) und die zeitliche Entwicklung des Galápagosplume-Galápagosspreizungszentrum-Systems (Teilprojekt 2) gelegt. Die dafür analysierten Proben wurden während der Forschungsfahrt SO208 mit dem deutschen Forschungsschiff *Sonne* im Juli/August 2010 gewonnen.

In Teilprojekt 1 geht es um den Ursprung und das Alter von Intraplattenvulkanen (Seamounts) die vor der Küste Nordwest-Costa Ricas/SW Nicaraguas auf dem Teil der Cocosplatte liegen, die am Ostpazifischenrücken (EPR) gebildet wird. In diesem Gebiet gibt es eine ungewöhnlich hohe Anzahl an Seamounts deren Entstehung mit herkömmlichen Modellen nur schwer zu erklären ist. Dabei geht es vor allem darum, ob diese Seamounts am EPR gebildet wurden oder durch einen weiträumigen Transport von Galápagosplumematerial.

Insgesamt wurden 19 dieser Seamounts beprobt und auf ihre geochemische Zusammensetzung (Haupt- und Spurenelemente, Sr-Nd-Pb Isotopenverhältnisse) untersucht. Um die geochemischen Daten in einen zeitlichen Kontext zu setzen, wurden zusätzlich noch $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Altersdatierungen durchgeführt. Die, auf ihr Alter untersuchten Seamounts können in zwei Gruppen unterteilt werden: a) Seamounts mit einem Alter $\pm 2\text{ Ma}$ dem der darunter liegenden Kruste, b) Seamounts mit einem Alter mehr als 2 Ma jünger als die darunter liegende Kruste.

Geochemisch stellen die Seamounts eine Mischung einer angereicherten Galápagosplumekomponente, mit zwei unterschiedlich verarmten Komponenten dar. Eine dieser ver-

armten Komponenten ist ähnlich der Zusammensetzung wie sie am Ostpazifischen Rücken (EPR) vorkommt. Die zweite verarmte Komponente ist hingegen in den inkompatiblen Elementen stärker verarmt. Seamounts die mit dem Alter der darunter liegenden Kruste korrelieren, müssen am oder in der Nähe des EPR entstanden sein. Ihre Entstehung fällt mit der Zeit des superschnellen Spreizens (180-210 mm/a; Geldmacher *et al.*, 2013) am EPR (zwischen ~ 23 -11 Ma) zusammen. Während dieser Zeit floss, aufgrund der durch das superschnelle Spreizen ausgelösten Sogwirkung, Galápagosplumematerial zum EPR vermischte sich mit verarmten oberen Mantel und eruptierte am oder in der Nähe der Rückenachse.

Seamounts die deutlich jünger als die darunter liegende Kruste sind können nicht durch diesen Mechanismus erklärt werden. Sie deuten vielmehr auf Intraplattenvulkanismus hin. Diese Seamounts stellen geochemisch eine Mischung aus einer angereicherten Ozeaninselbasaltkomponente, wie die Nördliche Galápagosplumekomponente (Hoernle *et al.*, 2000), mit einer verarmten Komponente aus dem oberen Mantel (z.B. Mitellozeanischer Rückenbasalt (MORB) oder verarmte Galápagosplumekomponente) dar. Durch den nordwärts gerichteten Fluss von Galápagosplumematerial aufgrund der Lage des Galápagosplume nördlich des GSC wurde Plumematerial bis zu 900 km weit an der Basis der Cocosplatte transportiert und führte aufgrund von adiabtischen Schmelzen zu der Entstehung der Seamounts.

Teilprojekt 2 befasst sich mit der zeitlichen Entwicklung der Wechselwirkung zwischen dem Galápagosplume und dem benachbarten Galápagosspreizungszentrum. Der Galápagosplume mit dem angrenzenden Galápagosspreizungszentrum bietet aufgrund der langlebigen geochemischen Zonierung des Galápagosplumes (>15 Ma; Hoernle *et al.*, 2000; Geldmacher *et al.*, 2003; Werner *et al.*, 2003) eine weltweit einzigartige Möglichkeit Plume-Rücken-Interaktion und Transportprozesse im oberen Mantel zu untersuchen. Dafür wurde eine detaillierte Beprobung der Ozeankruste entlang des GSC an vier Profilen von der GSC-Rückenachse bis zu 60 km nördlich bzw. südlich (Profile 1, 3, 4, 5) der Rückenachse und das Gebiet direkt östlich der 91°W Transformstörung (Studiengebiet 2) durchgeführt.

Profil 1 ($\sim 92^\circ\text{W}$) erstreckt sich von der Rückenachse am westlichen Galápagosspreizungszentrum (WGSC) bis zu 50 km nach Norden. In diesem Bereich des WGSC erfolgt ein starker Eintrag von Galápagosplumematerial in das GSC, sowohl morphologisch als auch geochemisch nachweisbar (z.B. Schilling *et al.*, 2003; Christie *et al.*, 2005; Ingle *et al.*, 2010; Colman *et al.*, 2012). Profil 1 deckt die Entwicklung des WGSC über eine Zeitspanne von 1.6 Ma ab. Diese Proben können durch eine Mischung zweier unterschiedlich ver-

armer Komponenten (MORB und verarmte Galápagosplumekomponente) mit einer angereicherten Komponente erklärt werden. Allerdings bietet keine der Galápagosplumekomponenten die passende Zusammensetzung um als angereichertes Endglied geeignet zu sein. Ein Seamount ca. 23 km nördlich der Rückenachse (Seamount DR63) ist von extremer geochemischer Zusammensetzung und bietet dadurch das angereicherte Endglied für das Mischungssignal aller WGSC-Krustenproben.

Basierend auf ihren Sr-Nd-Pb-Isotopenverhältnissen können die WGSC-Proben in zwei Gruppen unterteilt werden: a) <30 km von der WGSC-Rückenachse und b) >30 km von der WGSC-Rückenachse. Proben beider Gruppen zeigen mit zunehmender Entfernung von der Rückenachse und demnach zunehmenden Alter wenig bis keine geochemische Variationen. Dies deutet auf einen konstanten Plumeeintrag in den letzten ~1.6 Ma hin. Die Proben der älteren Gruppe (>30 km Entfernung von der Rückenachse) jedoch, scheinen zusätzlich noch durch eine EMII-ähnliche Komponente beeinflusst worden zu sein.

Studiengbiet 2, Profil 3 bis Profil 5 und ein einzelner Seamount auf der Rückenachse wurden am östlichen Galápagosspreadingzentrum (EGSC) beprobt. Das Gebiet östlich der 91°W Transformstörung (~90°50'W) wird als das Zentrum für den Galápagosplumeeintrag am EGSC verstanden (Studiengbiet 2). Die Proben die aus diesem Bereich analysiert wurden, deuten auf einen Eintrag der zentralen Galápagosplumekomponente hin, die sich weiter nach Osten zunehmend mit einer verarmten Komponente vermischt.

Profil 3 bis Profil 5 wurden von der Rückenachse bis zu 60 km nördlich bzw. südlich der Rückenachse beprobt. Anders als bei Profil 1 ist die zeitliche Entwicklung des EGSC und damit auch die Profile durch Sprünge der Rückenachse zum Plume hin beeinflusst. Aufgrund dessen zeigt die EGSC-Kruste keine lineare Alterszunahme mit zunehmender Entfernung vom Rücken, sondern ist durch Alterssprünge von bis zu ~1.3 Ma gekennzeichnet. Ungeachtet der Alterssprünge, deuten die starken geochemischen Variationen in den Proben bis 1.17 Ma in Profil 3 (89°30'W) einen rivalisierenden Eintrag zweier Komponenten an. Sowohl in den inkompatiblen Spurenelementen als auch in den Isotopenverhältnissen zeigt dieses Profil eine große Spannbreite von sehr verarmten bis hin zu stark angereicherten Zusammensetzungen. Zusammen mit geochemischen und morphologischen Anomalien in anderen Profilen (Seamounts/Lava Plateaus) deutet dies auf einen zusätzlich kurzzeitigen Eintrag von angereicherten Plumematerial entlang des EGSC hin.

Literatur

- Christie, D. M., Werner, R., Hauff, F., Hoernle, K. & Hanan, B. B., 2005. Morphological and geochemical variations along the eastern Galápagos Spreading Center. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **6**, Q01006.
- Colman, A., Sinton, J. M., White, S. M., McClinton, J. T., Bowles, J. A., Rubin, K. H., Behn, M. D., Cushman, B., Eason, D. E., Gregg, T. K. P., Grönvold, K., Hidalgo, S., Howell, J., Neill, O. & Russo, C., 2012. Effects of variable magma supply on mid-ocean ridge eruptions: Constraints from mapped lava flow fields along the Galápagos Spreading Center. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **13**, Q08014.
- Geldmacher, J., Hanan, B. B., Blichert-Toft, J., Harpp, K., Hoernle, K., Hauff, F., Werner, R. & Kerr, A. C., 2003. Hafnium isotopic variations in volcanic rocks from the Caribbean Large Igneous Province and Galápagos hot spot tracks. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **4**, 1062.
- Geldmacher, J., Höfig, T., Hauff, F., Hoernle, K., Garbe-Schönberg, D. & Wilson, D., 2013. Influence of the Galápagos hotspot on the East Pacific Rise during Miocene superfast spreading. *Geology*, **41**, 183–186.
- Hoernle, K., Werner, R., Morgan, J. P., Garbe-Schönberg, D., Bryce, J. & Mrazek, J., 2000. Existence of complex spatial zonation in the Galápagos plume. *Geology*, **28**, 435–438.
- Ingle, S., Ito, G., Mahoney, J. J., Chazey, I., William, Sinton, J., Rotella, M. & Christie, D. M., 2010. Mechanisms of geochemical and geophysical variations along the western Galápagos Spreading Center. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **11**, Q04003.
- Schilling, J.-G., Fontignie, D., Blichert-Toft, J., Kingsley, R. & Tomza, U., 2003. Pb-Hf-Nd-Sr isotope variations along the Galápagos Spreading Center (101 °-83 °W): Constraints on the dispersal of the Galápagos mantle plume. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **4**, 8512.
- Werner, R., Hoernle, K., Barckhausen, U. & Hauff, F., 2003. Geodynamic evolution of the Galápagos hot spot system (Central East Pacific) over the past 20 m.y.: Constraints from morphology, geochemistry, and magnetic anomalies. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **4**, 1108.

Abstract

The main objective of this Dissertation is the investigation of the distribution of Galápagos plume material in the equatorial East Pacific. It provides a more detailed view on the Galápagos plume and the adjacent Galápagos Spreading Center (GSC; also known as Cocos-Nazca-Spreading Center (CNS)) and contributes to further our understanding of plume-ridge interaction and mantle material transport within the earth upper mantle. Of special interest in this context is the far-field lateral transport of plume material (sub-project 1) and the temporal evolution of plume-ridge interaction at the Galápagos plume-Galápagos Spreading Center system (sub-project 2). The necessary sample material in order to address these questions was recovered during the cruise SO208 with the German research vessel R/V *Sonne* in July/August 2010.

The focus of the first sub-project is the determination of age and origin of intraplate seamounts located off the coast of NW Costa Rica/SE Nicaragua, the part of the Cocos Plate that formed at the EPR. This area is characterised by an unusually high abundance of seamounts, that formation can not be explained by the common intraplate volcano model. A crucial question is, whether these seamounts formed at or close to the East Pacific Rise (EPR) or are the result of a far-field transport of Galápagos plume material.

In total, 19 seamounts have been sampled and for their geochemical composition (major and trace elements, Sr-Nd-Pb isotope ratios) analysed. In addition, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau ages were determined to be able to allocate the geochemical results into a chronological timeframe. The age dated seamounts can be subdivided into two groups: a) seamounts with ages similar as the underlying crust $\pm 2\text{Ma}$, b) seamounts that are more than 2 Ma younger than the underlying crust.

Geochemically, these seamounts require mixing between one enriched Galápagos component and two different depleted components. One of the depleted end member is similar to lava from the East Pacific Rise (EPR) but the second one is strongly depleted in the incompatible trace elements. Seamounts of similar age as the underlying crust must

have formed at or in close proximity to the EPR. Their ages correlate with the period of superfast-spreading (180-210 mm/a; Geldmacher *et al.*, 2013) at the EPR (\sim 23-11 Ma ago). During this time, due to increased ridge suction force Galápagos plume material was dragged into the EPR beneath the GSC, mixed with depleted upper mantle and erupted at or close to the EPR ridge axis.

Seamounts of significantly younger age than the underlying crust can't be explained by that mechanism. They rather indicate true intraplate volcanism. These seamounts represent mixing between enriched ocean island basalt, e.g., Northern Galápagos plume component (Hoernle *et al.*, 2000) with an depleted upper mantle component (e.g., mid-ocean ridge basalt (MORB) or depleted Galápagos plume component). Due to a northward transport of plume material along the base of the Cocos Plate, Galápagos plume material was transported up to 900 km and melted due to decompression melting and erupted within the plate leading to the formation of the seamounts. The second sub-project aimed to elucidate the temporal evolution of the interaction between the Galápagos plume and the Galápagos spreading center. The Galápagos plume-ridge-system provides, due to the distinct geochemical zonation of the Galápagos plume (>15 Ma; Hoernle *et al.*, 2000; Geldmacher *et al.*, 2003; Werner *et al.*, 2003) a unique possibility to study plume-ridge interaction and transport mechanisms in the upper mantle. For this, ocean crust was sampled in great detail along the GSC just east of the 91°W Transform Fault (Study Area 2) and at four profiles going from the ridge axis up to 60 km north and south (Profile 1, 3, 4, 5).

Profile 1 (\sim 92°W) was sampled from the ridge axis at the Western Galápagos Spreading Center (WGSC) up to 50 km to the North. This area is thought to be an area of strong plume input at the WGSC, observed both morphologically and geochemically (e.g., Schilling *et al.*, 2003; Christie *et al.*, 2005; Ingle *et al.*, 2010; Colman *et al.*, 2012). Profile 1 covers the evolution of the WGSC over a period of \sim 1.6 Ma. The crustal samples can be explained by mixing between two different depleted components (MORB and depleted Galápagos plume component) and an enriched component. None of the enriched Galápagos plume component, however, has the appropriate composition to serve as the enriched end member. A seamount located c. 23 km north of the ridge axis (Seamount 63) is of extrem geochemical composition and thus provides the appropriate composition to serve as the enriched end member for all WGSC samples.

Based on their Sr-Nd-Pb isotopic ratio the WGSC samples can be subdivided into two groups: a) <30 km from the WGSC axis and b) >30 km from the WGSC. The samples show only minor variations with increasing distance from the ridge axis and therefore increasing

age, indicating constant plume input in this area for at least the last ~ 1.6 Ma. The samples from the >30 km WGSC group, however, seem to be additionally influenced by an enriched mantle (EM)II-like component.

Study Area 2, Profile 3 to Profile 5 and one single on-axis seamount were sampled along the Eastern Galápagos Spreading Center (EGSC). The area east of the 91°W Transform Fault ($\sim 90^\circ 50'\text{W}$) is supposed to be the center of Galápagos plume input at the EGSC (Study Area 2). Samples from this area indicate the influx of enriched Zentral Galápagos plume component which becomes progressively diluted along the ridge axis towards east.

Profile 3 to Profile 5 have been sampled up to 60 km to the North and South of the ridge axis. Unlike Profile 1 the temporal evolution of the EGSC and therefore the profiles have been influenced by ridge jumps towards the plume in the past. Because of that the EGSC crust does not show linear age progression with increasing distance from the ridge axis but is characterised by age jumps of up to ~ 1.3 Ma. Despite the age jumps the large geochemical variations in Profile 3 samples ($89^\circ 30'\text{W}$) up to 1.17 Ma indicate an rivalling input of two different enriched components over time. Both, in incompatible trace elements as well as in isotopic ratios, samples of this Profile range from very depleted to very enriched compositions. Taking other geochemically and/or morphologically anomalies along the Profiles and the ridge axis into account this might indicate short episodes of additional enriched plume material input along the EGSC.

References

- Christie, D. M., Werner, R., Hauff, F., Hoernle, K. & Hanan, B. B., 2005. Morphological and geochemical variations along the eastern Galápagos Spreading Center. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **6**, Q01006.
- Colman, A., Sinton, J. M., White, S. M., McClinton, J. T., Bowles, J. A., Rubin, K. H., Behn, M. D., Cushman, B., Eason, D. E., Gregg, T. K. P., Grönvold, K., Hidalgo, S., Howell, J., Neill, O. & Russo, C., 2012. Effects of variable magma supply on mid-ocean ridge eruptions: Constraints from mapped lava flow fields along the Galápagos Spreading Center. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **13**, Q08014.
- Geldmacher, J., Hanan, B. B., Blichert-Toft, J., Harpp, K., Hoernle, K., Hauff, F., Werner, R. & Kerr, A. C., 2003. Hafnium isotopic variations in volcanic rocks from the Caribbean Large Igneous Province and Galápagos hot spot tracks. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **4**, 1062.
- Geldmacher, J., Höfig, T., Hauff, F., Hoernle, K., Garbe-Schönberg, D. & Wilson, D., 2013. Influence of the Galápagos hotspot on the East Pacific Rise during Miocene superfast spreading. *Geology*, **41**, 183–186.
- Hoernle, K., Werner, R., Morgan, J. P., Garbe-Schönberg, D., Bryce, J. & Mrazek, J., 2000. Existence of complex spatial zonation in the Galápagos plume. *Geology*, **28**, 435–438.
- Ingle, S., Ito, G., Mahoney, J. J., Chazey, I., William, Sinton, J., Rotella, M. & Christie, D. M., 2010. Mechanisms of geochemical and geophysical variations along the western Galápagos Spreading Center. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **11**, Q04003.
- Schilling, J.-G., Fontignie, D., Blichert-Toft, J., Kingsley, R. & Tomza, U., 2003. Pb-Hf-Nd-Sr isotope variations along the Galápagos Spreading Center (101 °-83 °W): Constraints on the dispersal of the Galápagos mantle plume. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **4**, 8512.
- Werner, R., Hoernle, K., Barckhausen, U. & Hauff, F., 2003. Geodynamic evolution of the Galápagos hot spot system (Central East Pacific) over the past 20 m.y.: Constraints from morphology, geochemistry, and magnetic anomalies. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **4**, 1108.