

SO249 BERING

ORIGIN AND EVOLUTION OF THE BERING SEA: AN INTEGRATED GEOCHRONOLOGICAL, VOLCANOLOGICAL, PETROLOGICAL, AND GEOCHEMICAL APPROACH



Abschlussbericht

- 03G0249A -

Berichtszeitraum: 01. März 2016 - 31. August 2018

K. Hoernle, M. Portnyagin, R. Werner (GEOMAR)

unter Mitarbeit von

***R. Bezard, F. Hauff (GEOMAR), and
G. Yogodzinski (USC)***

Gefördert von:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Teil I: KURZBERICHT

I.1 Aufgabenstellung und wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Forschungsvorhaben SO249 BERING führte russisch-deutsche geologische Meeresforschungsarbeiten weiter, die u.a. im Rahmen der BMBF-geförderten Projekte KOMEX und KALMAR erfolgreich durchgeführt wurden. Weiterhin knüpfte das Projekt an Arbeiten unserer U.S.-amerikanischen Kooperationspartner an, die seit langem Untersuchungen am Aleutensystem durchführen (s.a. Abschnitt I.3). Der wissenschaftlich-technische Stand, an den im Einzelnen angeknüpft wurde, wurde im Antrag zu dem Forschungsvorhaben SO249 BERING ausführlich beschrieben. Die aktuellen wissenschaftlichen Hypothesen und Fragestellungen werden im Zusammenhang mit unseren vorliegenden Ergebnissen in Teil II und III dieses Berichts diskutiert.

Übergeordnetes Ziel von BERING war die Rekonstruktion der magmatischen und tektonischen Entwicklung der Beringsee und ihrer Randbereiche während der letzten >50 Mill. Jahre. Insbesondere wurden Prozesse, die die Initiation und Entwicklung von Subduktionssystemen kontrollieren, untersucht. Damit sollten auch Basisdaten für eine bessere Einschätzung der Auswirkungen von Subduktionsvulkanismus auf die Umwelt und Menschheit gewonnen werden. Die wichtigsten zu bearbeitenden Themenfelder waren:

(1) Frühe Geschichte der Beringsee: Hier stand die Frage nach der Natur des Chukotka-Beringia Kontinentalrandes im Vordergrund (Teil einer ehemaligen Subduktionszone?). Weiterhin sollte festgestellt werden, ob die von der Satellitenaltimetrie an diesem Kontinentalrand abgebildeten Seamounts wirklich existent sind und, falls ja, ihre Natur, ihr Bildungsmilieu und ihr Alter charakterisiert werden.

(2) Die Bildung und Entwicklung des Aleutenbogens: Von besonderer Bedeutung war es, das Alter und die chemische Zusammensetzung der ältesten Gesteine des Aleutenbogens festzustellen. Damit sollten u.a. Hypothesen getestet werden, dass die Bildung des Aleutenbogens mit großen tektonischen Ereignissen im Pazifik in Verbindung steht. Weiterhin sollte untersucht werden, wie der Beginn von Subduktion entlang der westlichen Aleuten die Magmagenese und Krustenbildung beeinflusst hat.

(3) Das heutige Aleutenbogen-System: Die wichtigsten Fragen betrafen hier den Ursprung und das Vorkommen von rezenter vulkanischer Aktivität am westlichen Aleutenbogen und die chemische Zusammensetzung der dabei in diesem tektonisch komplexen Gebiet gebildeten Vulkane wie z.B. dem Piip-Vulkan. Weiterhin sollte geklärt werden, in wie weit westlich und östlich des Piip-Vulkans junger Vulkanismus existiert.

(4) Eintrag in das Subduktionssystem: Es sollte die räumliche und zeitliche kompositionelle Variabilität der subduzierenden pazifischen Lithosphäre erfasst und mit der Zusammensetzung der Inselbogengesteine abgeglichen werden. Damit sollte u.a. untersucht werden, wie effektiv ozeanische Lithosphäre in Subduktionszonen recycelt wird.

I.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf des Vorhabens SO249 BERING entsprach abgesehen von in den Zwischenberichten geschilderten Abweichungen bei den Laborarbeiten und im Personalbereich der von uns im Antrag vorgeschlagenen Arbeits- und Zeitplanung. Auf den beiden Fahrtabschnitten der FS. SONNE-Reise SO249 (05.06. - 14.08.2016) wurden neben umfangreichen Kartierungen und Sedimentecholotprofilierungen magmatische, metamorphe und sedimentäre Strukturen mit insgesamt 150 Dredgezügen beprobt (s. Werner et al. 2016, DOI 10.3289/GEOMAR_REP_NS_30_2016). Der auf dieser sehr erfolgreichen Reise gewonnene Probensatz repräsentiert die bis heute bei weitem umfassendste submarine Beprobung der Arbeitsgebiete und bildete eine sehr gute Grundlage für die weiterführenden Laborarbeiten und Analysemethoden. Ferner wurde an Bord auf den Gesteinen aufsitzende Makrofauna gesammelt, dokumentiert und fixiert sowie Lockersediment aus den in unseren Dredgen eingebauten Sedimentfallen für Meiofauna-Untersuchungen fixiert.

Zur Evaluierung der Gesteinsproben, für petrographische Untersuchungen und für ortsauflösende Analytik wurden über 530 Gesteinsdünnschliffe sowie diverse Anschliffe von

Gläsern und Mineralen angefertigt. Von etwa 300 Gesamtgesteinsproben wurde die Haupt- und die Spurenelementzusammensetzung analysiert. Ortsauflösende Analytik (Gläser, Minerale) wurde mittels Elektronenmikrosonde (EMP) an ca. 400 Proben und mittels Laserablations-ICP-MS an ca. 300 Proben durchgeführt. Sr-Isotopenverhältnisse wurden an insgesamt ca. 300 Proben, Nd- und Pb-Isotopenverhältnisse an 166 und Hf-Isotopenverhältnisse an 98 Proben gemessen. An der TU Freiberg wurden 25 Ar/Ar-Datierungen durchgeführt und weitere 23 Proben wurden an der University of Wisconsin-Madison datiert. Zudem wurden Zirkone aus 11 Proben von sechs Lokalitäten mittels U-Pb-Datierung datiert. Zur Zeit werden noch zusätzliche geochemische Analysen und 29 Altersdatierungen durchgeführt, um neue Fragestellungen zu bearbeiten, die sich während der Untersuchung der auf SO249 gewonnenen Proben ergeben haben.

Wichtige Meilensteine während der Datenauswertung und -Interpretation waren verschiedene Tagungen und Arbeitstreffen, auf denen Zwischenergebnisse vorgestellt und diskutiert wurden. Im Oktober 2016 wurde der Projektfortschritt auf dem 21. Arbeitstreffen im Rahmen der Fachvereinbarung über die Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Meeres- und Polarforschung zwischen dem Ministerium für Bildung und Wissenschaft der Russischen Föderation und dem BMBF in Berlin vorgestellt. Weitere wichtige Meilensteine waren die Abfassung der Publikationen und Manuskripte, die diesem Bericht und dem Erfolgskontrollbericht als Anlagen beiliegen.

I.3 Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

- Themenfeld "Frühe Geschichte der Beringsee": Am Chukotka-Beringia Kontinentalrand sind keine magmatischen Strukturen aufgeschlossen, aber es gibt dort Hinweise auf rezente Tektonik. Durch Untersuchungen an plutonischen und metamorphen Gesteinen der Shirshov- und Stalematerücken wurden jedoch Informationen über die Struktur und Zusammensetzung der ozeanischen Lithosphäre und die frühe tektonische Entwicklung des Arbeitsgebietes gewonnen.

-Themenfeld "Bildung und Entwicklung des Aleutenbogens": Subduktion setzte am Aleuteninselbogen bereits in der späten Kreide und damit ca. 20 Mill. Jahre eher ein als bisher angenommen. Die Bildung des Aleutenbogens stand damit nicht im Zusammenhang mit den großen plattentektonischen Ereignissen im Frühen Eozän im Pazifik. Die geochemische Entwicklung und Magmengenese des Aleuteninselbogens konnte erstmals über seine gesamte Lebensdauer rekonstruiert werden.

- Themenfeld "Das heutige Aleutensystem": SO249 zeigte, dass sich rezenter Vulkanismus im russischen Teil des Aleutenbogens offenbar nur am Piip-Vulkan ereignet. Die Laven der im Komandorskybecken beprobten Strukturen zeigen keine Subduktionssignatur und stammen aus isotopisch verarmtem Mantel, die des Volcanologists Massif und des Piip-Vulkans aus durch Subduktion modifiziertem Mantel (Mantelmaterial + Schmelzen aus der subduzierten Platte).

- Themenfeld "Eintrag in das Subduktionssystem": Es wurde die räumliche und zeitliche Variabilität in der Zusammensetzung der nordwestpazifischen Platte und darauf befindlicher Seamounts vor Kamtschatka und den Aleuten charakterisiert. Diese Daten werden zur Zeit noch mit Daten aus Kamtschatka und von den Aleuten abgeglichen.

SO249-BERING wurde im Rahmen der Fachvereinbarung über die Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Meeres- und Polarforschung zwischen dem Ministerium für Bildung und Wissenschaft der Russischen Föderation und dem BMBF sowie in enger Kooperation mit U.S.-Kollegen durchgeführt. Unsere wichtigsten Kooperationspartner waren bzw. sind (in alphabetischer Reihenfolge): Prof. Dr. Boris Baranov (P.P. Shirshov Inst. of Oceanology, Moskau, Russland, Geodynamik); Prof. Dr. Roman Botscharnikov (Johannes Gutenberg Universität Mainz, Petrologie); Dr. Dieter Garbe-Schönberg (CAU, Kiel, ICP-MS-Analytik); Dr. Brian Jicha (University of Wisconsin, USA, Ar/Ar-Geochronologie); Dr. Jörg Pfänder (TU Freiberg, Ar/Ar-Geochronologie); Dr. Vera Ponomareva (Institute of Volcanology and Seismology, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russland, Kamtschatka-Vulkanismus); Dr. Sergey Silantyev (Vernadsky Institut, Moskau, Russland, Petrologie); Prof. Dr. Gene Yogodzinski (University of South Carolina, USA, Aleutenbogen-Vulkanismus).

Teil II: Darstellung der im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten

II.1 Darstellung der erzielten Ergebnisse

II.1.1 Publierte oder in Manuskripten vorliegende Ergebnisse

Trotz des sehr aufwendigen präparativen und analytischen „Vorlaufs“ liegen zum Zeitpunkt der Abgabe dieses Abschlussberichts bereits vier begutachtete Publikationen vor, die zumindest teilweise auf Proben und Daten von SO249 BERING basieren, sowie mehrere Manuskripte über die Ergebnisse von SO249 BERING, die für die Publikation in internationalen Fachzeitschriften konzipiert sind. Die wichtigsten Ergebnisse, die in diesen Publikationen und Manuskripten vorgestellt werden, sind im Folgenden in knapper Form zusammengefasst. Die bereits publizierten Artikel liegen diesem Berichtsteil als Anlagen bei. Da die Manuskripte noch nicht publiziert und daher noch vertraulich sind, sind sie dem Erfolgskontrollbericht, der nicht publiziert wird, als Anlagen beigelegt.

- (1) Yogodzinski G, Kelemen PB, Hoernle K, Brown ST, Bindeman I, Vervoort JD, Sims KW, Portnyagin M, Werner R (2017) Sr Isotopes in Western Aleutian Seafloor Lavas: Implications for the Source of Fluids and Trace Element Character of Arc Volcanic Rocks. *Earth Planet Sci Lett* 475: 169-180, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2017.07.007>

In dieser Arbeit werden Sr- und O-Isotopendaten sowie Spurenelementdaten von submarinen Laven des Aleutenbogens vorgestellt, darunter auch Laven, die während SO249 (und SO201-1b) gewonnen wurden. Die hier präsentierten Daten sind konsistent mit vorherigen Untersuchungen, die darauf hinweisen, dass eine eklogitische Magmenquelle der Haupttransporteur von inkompatiblen Spurenelementen, die im Aleuten-Inselbogen präsent sind, ist. Die hier präsentierten Ergebnisse zeigen auch, dass H₂O-haltige Fluide, die für das Aufschmelzen der subduzierten ozeanischen Kruste erforderlich sind, durch Dehydration von Serpentiniten im Mantelteil der subduzierten Lithosphäre produziert worden sein könnten. Die Autoren folgern aus ihren Untersuchungen, dass die subduzierende pazifische Lithosphäre unter dem Aleuteninselbogen deutlich heißer ist als es die meisten thermalen Modelle zeigen. Diese Arbeit liegt diesem Berichtsteil als Anlage 1 bei.

- (2) Silantiev SA, Kubrakova IV, Portnyagin MV, Tyutyunnik OA, Zhilkina AV, Gryaznova AS, Hoernle K, Werner R (2018) Ultramafic–Mafic Assemblage of Plutonic Rocks and Hornblende Schists of Shirshov Rise, Bering Sea, and Stalemate Ridge, Northwest Pacific: Geodynamic Interpretations of Geochemical Data. *Petrology* 26, no. 5: 492–514, DOI: 10.1134/S0869591118050077

Am nordwestlichen Teil des Stalematerücken im Nordwestpazifik und am zentralen Teil des Shirshovrücken in der westlichen Beringsee wurden während SO249 metamorphe und plutonische Gesteine beprobt. Diese Proben erweitern und vervollständigen einen Probensatz, der bei einer Reconnaissance-Beprobung auf den FS. SONNE-Reisen SO201-1b und SO201-2 (BMBF-Projekt KALMAR) gewonnen wurde. Die Stalemate- und Shirshovproben wurden bzw. werden gemeinsam mit unserem russischen Kooperationspartner Dr. Sergei Silantiev und seiner Arbeitsgruppe untersucht und analysiert. Den neuen petrologischen und geochemischen Daten zufolge repräsentieren diese Gesteine ein mafisches bis ultramafisches Assamblage wie es für ein Kumulat aus Ophiolithkomplexen und Back-Arc-Spreizungszentren typisch ist. Die plutonischen Komplexe am Stalemate- und am Shirshovrücken ähneln sich stark in der Petrographie und Mineralogie ihrer Protolithen wie auch in der Art ihrer metamorphen Umwandlung. Die Mineralogie der Gesteine belegt für beide Gebiete ein weites Spektrum an Metamorphosegraden, die von der Amphibolit- bis zur Grünschieferfazies reichen. Hornblendeschiefer, die bei den plutonischen Gesteinen des Stalemate- und des Shirshovrücken gefunden wurden, sind ähnlich zu lamellierten Amphiboliten in subophiolitischen metamorphen Kontaktzonen. Somit könnten Bedingungen ähnlich wie bei der Bildung von Ophiolithkomplexen auch bei der Bildung des Shirshovrücken und des nordwestlichen Teils des Stalematerücken, der gegenwärtig mit der Aleuten-

Subduktionszone kollidiert, geherrscht haben. Diese Arbeit liegt diesem Berichtsteil als Anlage 2 bei.

- (3) Derkachev AN, Ponomareva VV, Portnyagin MV, Gorbarenko SA, Nikolaeva NA, Malakhov MI, Zelenin EA, Nürnberg D, Yanguang Liu (2018) Widespread tephra layers in the Bering Sea sediments: distal clues to large explosive eruptions from the Aleutian volcanic arc. *Bulletin of Volcanology*: <https://doi.org/10.1007/s00445-018-1254-9>

Diese Arbeit befasst sich schwerpunktmäßig mit Tephralagen aus pleistozänen bis holozänen Sedimenten in der Beringsee, in die Untersuchungen wurden aber auch Bimse mit einbezogen, die während SO249 am Piip-Vulkan im südlichen Komandorskybecken gedredgt wurden. Die große kompositionelle Variabilität der Aleutenvulkane erlaubt z.B. basierend auf den Verhältnissen hoch inkompatibler Spurenelemente (z.B. Ba/Nb, Th/Nb, Th/La, La/Nb) die Zuordnung von marinen Tephrapartikeln zu ihren Ursprungsvulkanen. Hier werden drei marine Tephralagen charakterisiert, bestimmten Eruptionen von Aleutenvulkanen zugeordnet und Volumen und Ausbreitung der Tephralagen sowie Eruptionsstärken rekonstruiert. Alle drei Tephralagen sind wertvolle Isochronen, die für die Korrelation und Datierung von Sedimenten der Beringsee genutzt werden können. Diese Arbeit liegt diesem Berichtsteil als Anlage 3 bei.

- (4) Ziegler A, Bock C, Ketten DR, Mair RW, Mueller S, Nagelmann N, Pracht ED, Schröder L (2018) Digital three-dimensional imaging techniques provide new analytical pathways for malacological research. *American Malacological Bulletin* 36: 248-273, open access: <https://bioone.org/journals/american-malacological-bulletin/volume-36/issue-2>

Aufgrund ihrer Seltenheit wurden die Tiefsee-Cephalopoden, die während SO249 als "Beifänge" in den Dredgen gewonnen wurde, mit modernsten bildgebenden Verfahren untersucht. Die im Rahmen dieser Studie erzeugten Datensätze stellen den "state-of-the-art" hinsichtlich nicht-invasiver Bildgebung mittels Mikro-Computer- und Magnetresonanztomographie dar. Diese Arbeit liegt diesem Berichtsteil als Anlage 4 bei. Zusätzlich zu diesen methodischen Erkenntnissen werden die sich aus den Datensätzen ergebenden biologischen Schlussfolgerungen in näherer Zukunft publiziert.

Die 3D-Datensätze für einen auf SO249 gesammelten Tiefsee-Cephalopoden (Dumbo-Oktopus) sowie einen Oktopus-Embryo sind auf "MorphoBank" verfügbar (Project DOI: 10.7934/P3107, <http://dx.doi.org/10.7934/P3107>):

https://morphobank.org/index.php/Projects/ProjectOverview/project_id/3107

- (5) Bezard R, Hoernle K, Pfänder JA, Jicha B, Werner R, Hauff F, Portnyagin M, Sperner B, Yogodzinski G, Turner S (in Vorbereitung) Aleutian subduction initiation > 20Ma earlier than previously thought: Implications for the Cretaceous and Paleogene geodynamic evolution of the Pacific. *Geology*

Das Einsetzen von Subduktion kann entweder eine Konsequenz oder der Auslöser für eine plattentektonische Reorganisation sein. Was davon auf den Aleuteninselbogen zutrifft war bisher unklar. Das bisher allgemein akzeptierte Minimalalter für die Bildung des Aleutenbogens (ca. 46 Ma) ist etwa zeitgleich der Bildung des Knicks in der Hawaii-Emperor-Seamountkette (HEB, ca. 50 - 47 Ma) und nur geringfügig jünger als die Bildung anderer großer Subduktionssysteme im Westpazifik (ca. 52-51 Ma). Allerdings konnte bisher kein Bezug zwischen der Bildung des Aleutenbogens und diesen anderen großen plattentektonischen Ereignissen hergestellt werden. In dieser Arbeit werden 33 statistisch gültige $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Alterdatierungen von magmatischen Proben aus verschiedenen geomorphologischen Einheiten des Aleutenbogens präsentiert, die an tiefen "fore-arc"-Canyons und im Gebiet des "rear-arc" beprobt wurden. Es wird u.a. gezeigt, dass die Subduktion im Bereich der heutigen Aleuten bereits vor ≥ 68 Millionen Jahren einsetzte und damit mindestens 20 Millionen Jahre eher als bisher angenommen. Eine der ältesten Aleutenproben ähnelt in ihrer Zusammensetzung stark den "fore-arc"-Basalten (FAB) des Izu-Bonin-Marina-Systems. Da diese FABs als initiale Produkte von Subduktionssystemen angesehen werden, deutet dies darauf hin, dass die Subduktion am heutigen Aleutenbogen in der Spätkreide einsetzte. Demzufolge stand die Bildung des Aleuteninselbogen nicht im

Zusammenhang mit der Bildung des HEB oder mit anderen globalen oder regionalen Ereignissen frühen Eozän. Dieses Manuskript liegt dem Erfolgskontrollbericht als Anlage I bei.

- (6) Bezard R, Hoernle K, Hauff F, Portnyagin M, Werner R, Gerke G, Jicha B, Yogodzinski G, Garbe-Schönberg D, Jung S, Turner S (in Vorbereitung) A similar along-strike convergence angle during the pre-Miocene activity for the Aleutian arc. *Geochimica et Cosmochimica Acta*

Die Rekonstruktion der chemischen Entwicklung von ozeanischen Inselbögen von ihrer Bildung bis zum ausgereiften Stadium ist grundlegend, um die physikalische Entwicklung von konvergenten Plattengrenzen zu verstehen. Allerdings existieren bisher kaum geochemische Datensätze, die die gesamte Lebensdauer einer Subduktionszone abdecken. In dieser Arbeit werden Haupt-, Spurenelement- und Sr-Nd-Pb-Hf-Isotopendaten von submarinen Proben präsentiert, die bei der ersten systematischen Beprobung der tieferen Einheiten des Aleutenbogens während der FS. SONNE-Reise SO249 gewonnen wurden und die nahezu die gesamte Entwicklung dieses Subduktionssystems abdecken. Die neuen Daten zeigen, dass es vor der Quartär keine ausgeprägten geochemischen Variationen entlang des Inselbogens gab, aber dass sich die Magmenquelle im Laufe der Zeit änderte. So war z.B. der Mantelkeil in der frühen Phase der Inselbogenentwicklung angereicherter in Bezug auf Nd- und Hf-Isotopen und verarmte anschließend zunehmend. Dies reflektierte zunächst die Zufuhr von Sediment/Sedimentschmelze in das Subduktionssystem und dann die Subduktion einer trockenen Mélange aus verarmtem Mantel, Metasedimenten und Metamagmatiten. Das Fehlen einer Granatsignatur in allen von uns untersuchten prä-quartären Proben deutet darauf hin, dass sich das Schmelzen der Mélange bei Drücken unter 2 GPa ereignete. In einigen Fällen kam es auch zum niedrig-gradigen Aufschmelzen der Inselbogenlithosphäre entweder durch Interaktion mit den Mélange-Schmelzen (Dehydration, Aufheizung) oder durch Dekompressionsschmelzen während der Öffnung des Komandorskybeckens im Miozän. Der prä-quartäre Magmatismus unterscheidet sich von dem im Quartär insbesondere durch (1) weniger Sedimente oder eine weniger angereicherte isotopische Zusammensetzung der Sedimente in der Quelle des zentralen Aleutenbogens und (2) durch mehr eklogitische Schmelzen und weniger Sedimente in der Magmenquelle des quartären westlichen Aleutenbogens. Die Änderungen in der Quellzusammensetzung der zentralen Aleuten können mit der Rotation der pazifischen Platte im Uhrzeigersinn (bei ca. 6 Ma) und durch eine höhere Zufuhr an glazigen Sedimenten im Quartär erklärt werden. Die geringere Menge an Sedimenten in der Quelle der quartären westlichen Aleuten deutet darauf hin, dass der Konvergenzwinkel damals größer war als heute und in etwa ähnlich dem der zentralen Aleutenbogens zu dieser Zeit. Dies lässt sich am besten damit erklären, dass das westliche prä-quartäre Aleutenbasement weiter im Osten der Subduktionszone gebildet wurde und später durch ein "Strike-Slip"-Störungssystem nach Westen transportiert wurde. Hohe Sedimentanteile in der Quelle der westlichen Aleuten am Ende des Miozän und im Pliozän können auf eine Vertiefung des Trench während der Subduktion des abgestorbenen Kula-Pazifik-Spreizungszentrum zurückgeführt werden. Dieses Manuskript liegt dem Erfolgskontrollbericht als Anlage II bei.

- (7) Portnyagin MV, Hoernle KA, Hauff F, Werner R, Yogodzinski GM, Baranov BV, Stepanov OV, Bezard R, Botcharnikov RE, Garbe-Schönberg D (in Vorbereitung) Voluminous and geochemically diverse volcanism in dual tectonic setting of the Far-Western Aleutian Arc: Volcanologists Massif and Piip Volcano revisited. *Chemical Geology*

Diese Arbeit befasst sich mit dem Themenfeld "Das heutige Aleutensystem". Es werden die Ergebnisse geochemischer Untersuchungen an während der FS. SONNE-Reisen SO201-2 und SO249 gewonnenen Gesteinen aus dem Komandorskybecken, vom Volcanologists Massif und vom Piip-Vulkan in der westlichen Beringsee präsentiert. Die Daten zeigen, dass allen analysierten Gesteinen aus dem Komandorskybecken eine Subduktionssignatur fehlt und dass sie eine Mantelquelle haben, die isotopisch verärmerter ist als

durchschnittlicher pazifischer mittelozeanischer Rückenbasalt (MORB). Die Manteltemperaturen belaufen sich auf 1.340°C und die durchschnittlichen Aufschmelzgrade betragen 8%. Sie liegen damit an unteren Ende der Eckwerte für junge Backarc-Becken. Dies kann mit der großen axialen Tiefe des Komandorskybeckens (ca. 4.000 m) und seiner geringen Krustenmächtigkeit (ca. 5,5 km) erklärt werden. Die Magmen des Volcanologists Massifs und des Piip-Vulkans stammen aus durchmischten Mantelquellen, die variable Anteile an peridotitischen Komandorsky-Mantel und geochemisch unterschiedliche Pyroxenite enthalten, wobei die Pyroxenite durch eine Reaktion von Schmelzen, die aus subduzierten Eklogiten stammen, mit Mantelperidotiten gebildet wurden. Das ungewöhnlich große Volumen des Volcanologists Massifs und des Piip-Vulkans wird durch Mantel-Upwelling unter einem ehemaligen Spreizungszentrum verursacht. Dieses Manuskript liegt dem Erfolgskontrollbericht als Anlage III bei.

II.1.2 Geplante Publikationen (derzeit noch in Arbeit befindlich)

Einige weitere geplante Publikationen, für die die Analytik und die Evaluierung und Auswertung der Daten weitestgehend abgeschlossen ist, die aber noch nicht im Manuskriptform vorliegen, werden im Folgenden kurz vorgestellt:

- (8) Yogodzinski GM, Hauff F, Portnyagin, M, Walden R, Koch S, Werner R, Hoernle K (in Vorbereitung) Nature and Significance of North Pacific Altered Oceanic Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*

In dieser Arbeit wird ein umfangreicher geochemischer Datensatz (>100 Haupt- und Spurenelement- sowie > 30 Sr-Nd-Pb-Hf-Isotopenanalysen) von SO201-1b und SO249-Proben genutzt um Ozeanbodenbasalte aus den bisher kaum beprobten Regionen im Osten und Westen der Emperor Seamountkette im Nordpazifik umfassend zu charakterisieren und mit der Zusammensetzung der Kamtschatka und Aleutenvulkanite abzugleichen. Damit werden Informationen über den Eintrag in das Kamtschatka-Aleuten-Subduktionssystem gewonnen. Das Fehlen magnetischer Anomalien westlich der Emperor Seamounts deutet darauf hin, dass der Ozeanboden in diesem Gebiet in der Kretazischen Ruhezone (80 - 120 Ma) gebildet wurde, während magnetische Anomalien im Osten der Emperor Seamounts zeigen, dass der Ozeanboden dort 40 - 50 Millionen Jahre alt ist. Damit kann hier der Eintrag in das Subduktionssystem zu verschiedenen Zeiten rekonstruiert werden. Mit diesem Ansatz werden Modelle überprüft und weiterentwickelt, nach denen die Quelle der Vulkanite der Aleuten und von Kamtschatka aus einer Mischung von subduzierten Sedimenten + alterierter Ozeankruste und oberen Mantel besteht (s. hierzu Abschnitt 1 des Erfolgskontrollberichts).

- (9) Silantiev SA, Shabykova VV, Kostitsin YuA, Krasnova EA, Ermakov Ya Yu, Dogadkin DN, Zhilkina AV (in Vorbereitung) Magmatic sources of north-western Pacific: interpretation of Sr and Nd isotope data in rocks from Stalemate Ridge, Ingenstrom Depression and Shirshov Ridge. *Geochemistry International*

In dieser Arbeit werden die Haupt- und Spurenelementzusammensetzung sowie erste Sr- und Nd-Isotopendaten von vulkanischen und plutonischen Gesteinen vorgestellt, die während SO249 an den Stalemate- und Shirshovrücken gedredgt wurden. Diese Daten werden dazu genutzt, um Informationen über das geodynamische Milieu bei der Bildung der ophiolitischen Komplexe magmatischer und metamorpher Gesteine dieser Rücken zu gewinnen.

- (10) Botcharnikov R, Wilke M, Portnyagin M, Garrevoet J, Klimm K, Krashennikov S, Buhre S, Faklenberg G (in Vorbereitung) Determination of Fe³⁺/Fe²⁺ ratio in micrometer-size objects by confocal micro-XANES: Application for melt inclusion studies. *American Mineralogist*

Diese Arbeit konzentriert sich auf die Entwicklung und Anwendung der konfokalen Mikro-XANES-Technik (mit einem konfokalen Volumen von weniger als 30 Kubikmikrometern) für die Analyse von Fe³⁺/Fe²⁺-Verhältnissen in Mikromillimeter-großen Schmelzeinschlüssen in Olivinen, um Redoxbedingungen zu charakterisieren, die in primitiven und entwickelten Magmen vom Piipvulkan, den Aleuteninseln und anderen Vulkanen vorherrschen.

II.1.3 Ausbildungs- und Qualifizierungsarbeiten

Insgesamt wurden sieben Bachelor- oder Masterarbeiten im Rahmen von SO249 BERING an verschiedenen deutschen und russischen Einrichtungen vergeben. Deren Inhalte werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

- (1) Gerke G (2017): Major and trace element geochemistry of lavas recovered on R/V Sonne SO249 cruise from submarine canyons cutting the basement of the Aleutian Arc. Master Thesis. Christian-Albrechts-Universität Kiel, 71 pp (Betreuer: K. Hoernle)

Die Masterarbeit von Frau Gerke befasst sich mit der Haupt- und Spurenelementanalytik von Proben des Inselbogen-Outputs, die repräsentativ über das Forschungsgebiet ausgewählt wurden. Das Hauptaugenmerk lag darauf, die Charakteristiken der einzelnen Lokalitäten entlang des Inselbogens zu bestimmen sowie diese untereinander zu vergleichen. Die Gesteine zeigen eine unterschiedlich starke Beeinflussung durch Alteration und Fluide. Einige der Proben haben FAB (Fore Arc Basalt)-ähnliche Spurenelementsignaturen, die auf eine Bildung während der frühen Entstehungsphase des Aleutenbogens hindeuten. Vor allem am Attu-Canyon und am Komandorsky-Block wurden FAB-ähnliche Gesteine gefunden.

- (2) Koch S (2017) Major and trace element geochemistry of the NW Pacific seafloor from R/V Sonne 249 cruise samples. Master Thesis, Christian-Albrechts-Universität Kiel, 77 pp (Betreuer: K. Hoernle)

Das Ziel der Masterarbeit von Herrn Koch war es, einen ersten Überblick über die Haupt- und Spurenelementzusammensetzung der nordwestlichen Pazifischen Platte zu gewinnen, da es vor SO249 nur sehr wenige Gesteinsproben und geochemische Daten aus diesem Gebiet gab. Zu diesem Zweck wurde die Haupt- und Spurenelementzusammensetzung von 65 Gesteins- und 23 Glasproben bestimmt, die von einem 2.000 km langen, ± parallel zum Aleutenbogen verlaufenden Profil im nordwestlichen Pazifik stammen. Die Proben, die an Störungszonen in der pazifischen Platte ("fracture zones", FZs) gewonnen wurden, zeigen eine N-MORB-Zusammensetzung. Anhand der Haupt- und Spurenelementdaten konnten jedoch keine Unterschiede zwischen den verschiedenen FZs festgestellt werden. Die auf der pazifischen Platte untersuchten Seamounts zeigen bis auf einige Ausnahmen eine angereichere Zusammensetzung als die FZs. Die gewonnenen Daten dienen zur Ermittlung des Beitrages ("Input") der Pazifischen Platte und darauf befindlicher Seamounts zum Subduktionsvulkanismus der Aleuten.

- (3) Stepanov O (2017) Petrographic rock types and composition of quenched glasses of the Volcanologists Massif, Western Aleutian Arc. Master Thesis. M.V. Lomonosov Moscow State University, 45 p. (Betreuer: M. Portnyagin, P. Plechov)

Herrn Stepanov hat in seiner Masterarbeit Gesteine und vulkanischen Gläser untersucht, die während SO249 bei sechs Dredgezügen am Volcanologists Massif und am auf dem Massif befindlichen Piip-Vulkan gewonnen wurden. Basierend auf ihrer Petrographie sowie der chemischen Zusammensetzung der Minerale und Gläser wurden die Proben in drei Gruppen unterteilt. Außerdem wurden die Wassergehalte von 20 Glasproben mittels konfokaler Ramanspektroskopie bestimmt. Es wird gezeigt, dass die drei Gruppen unterschiedliche Gehalte an magmatischen H₂O haben. Sie reichen von <0,2 Gew.% in MORB-artigen Basalten am Basement des Volcanologists Massif über 1,5 Gew.% in Olivin-führenden Andesiten bzw. ca. 3 Gew.% in Pyroxen-führenden Andesiten von den Flanken des Massifs bis zu ca. 6 Gew.% in Amphibole- und Pyroxen-führenden rhyolithischen Bimsen vom Piip-Vulkan. Diese Arbeit liefert den ersten Beweis für hohe H₂O-Gehalte in Magmen des Volcanologists Massif.

- (4) Sagorny CL (2017) Cephalopods of the R/V SONNE expedition SO-249 BERING – species descriptions of cirrate and incirrate octopods based on non-invasive imaging techniques. Master Thesis, Institut für Evolutionsbiologie und Ökologie, Bonn (Betreuer: A. Ziegler)

Die Masterarbeit von Frau Sagorny hatte zum Ziel, sämtliche im Verlauf von SO249

gesammelten Kopffüßer zu beschreiben, zu untersuchen und zu bestimmen. Die Ergebnisse zeigen, dass es sich bei dem im Nordpazifik gesammelten Exemplar eines Cirraten um einen sogenannten Dumbo-Oktopus handelt, also einen Vertreter der Gattung *Grimpot euthis*. Ein Vergleich mit allen Arten der Gattung zeigte, dass es sich bei dem Exemplar um eine neue Art handelt. Diese Ergebnisse werden momentan zu einer Publikation aufbereitet.

- (5) Krebs N (2018) Petrography, composition and U/Pb zircon ages of igneous rocks from the Aleutian Arc. Bachelor Thesis. Christian-Albrechts-Universität Kiel, 171 pp (Betreuer: M. Portnyagin, K. Hoernle)

Im Zuge der durch unseren Projektmitarbeiter Dr. Maxim Portnyagin im Rahmen von SO249-BERING am GEOMAR neu etablierten U-Pb-Zirkondatierungen wurde von Frau Krebs eine Bachelorarbeit angefertigt. Neben den U-Pb-Datierungen, bei denen Zirkone aus 11 Proben von sechs Lokalitäten aus dem zentralen und westlichen Aleutenbogen auf 3 - 46 Ma datiert wurden, umfasste diese Arbeit auch petrographische Untersuchungen sowie die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung des Probenmaterials mittels Elektronen-Mikrosonde und Laserablations-ICP-MS. Die mittels der U-Pb-Methode datierten Gesteine haben vorwiegend intrusiven Charakter und eine intermediäre bis felsische Zusammensetzung.

- (6) Shabykova VV (noch nicht abgeschlossen) Isotope geochemistry of magmatic complexes of Stalemate and Shirshov Ridges (NW Pacific). Master Thesis. Lomonosov Moscow State University (Betreuer: S.A. Silantiev)

Die Masterarbeit von Frau Shabykova basiert auf der Bestimmung der Sr- und Nd-Isotopenzusammensetzung von Gesteinen der Stalemate- und Shirshovrücken. Ziel der Arbeit ist es, die Magmenquellen, die bei der Bildung dieser Rücken eine Rolle gespielt haben, zu charakterisieren und Informationen über ihr paleo-geodynamisches Milieu zu gewinnen.

- (7) Kuper K (noch nicht abgeschlossen) Experimental investigation of sulfur solubility and speciation in adakitic magmas. Master Thesis. Institut für Geowissenschaften, Gutenberg Universität Mainz (Betreuer: R. Botcharnikov, S. Buhre, M. Portnyagin)

Die Masterarbeit von Frau Kuper befasst sich mit der experimentellen Untersuchung der Schwefel-Löslichkeit und -Spezifikation in adakitischen Magmen wenn diese aus den Tiefen, in denen sie gebildet wurden, zur Oberfläche aufsteigen. Dabei werden Proben, die während SO249 gewonnen wurden, für die Präparation des Ausgangsmaterials für die Experimente genutzt.

Neben diesen Qualifizierungsarbeiten wurden mehrere Studenten/innen aus Deutschland, Russland und den U.S.A. auf den beiden Fahrtabschnitten der FS. SONNE-Reise SO249 in den Bereichen Bathymetrie und Gesteinsbeprobung, -ansprache und -dokumentation ausgebildet.

II.1.4 Weitere Ergebnisse

An einigen Teilaspekten der Daten wird noch gearbeitet, dazu zählen Untersuchungen zum Eintrag in das Aleutensubduktionssystem und weiterführende Arbeiten zur Bildung und geodynamischen Entwicklung des Shirshovrückens. Vorläufige Ergebnisse aus diesen Arbeiten, die noch publiziert werden sollen und somit noch vertraulich sind, werden sie im Erfolgskontrollbericht, der nicht publiziert wird, kurz vorgestellt.

Im folgenden werden einige Ergebnisse des Vorhabens SO249 BERING kurz zusammengefasst, die größtenteils bereits im Fahrtbericht (Werner et al. 2016, DOI 10.3289/GEOMAR_REP_NS_30_2016) publiziert wurden.

Frühe Subduktionsgeschichte der Beringsee / Natur des Chukotka-Beringia Kontinentalrandes

Die frühe Geschichte der Beringsee vor Ausbildung des Aleutenbogens sollte basierend auf Kartierungen und Beprobungen magmatischer Gesteine am Chukotka-Beringia-Kontinentalrand rekonstruiert werden, der die nördliche Begrenzung des Aleutenbeckens bildet. Die Natur des nördlichen Teils des Beringia- und der Chukotka-Kontinentalrandes war vor SO249 völlig unbekannt. Eine Hypothese ist, dass es sich hierbei um eine ehemalige Subduktionszone handelt, die vor Ausbildung des Aleutenbogens aktiv war. Die auf Satellitenaltimetrie basierenden Karten zeigen deutlich mehrere Seamounts und sehr steile Hänge an diesem Kontinentalrand, von deren Beprobung wir uns magmatische Gesteine für weiterführende Analysen erhofften. Leider zeigten die bathymetrischen Kartierungen von SO249, dass die sonst recht zuverlässige Satellitenaltimetrie hier die Morphologie nicht korrekt wiedergibt und dass dort keinerlei Seamounts und Steilhänge existieren. Die Hänge dieses Kontinentalrandes sind zwar stark zerklüftet und von tiefen Canyons zerschnitten, aber ihre Morphologie deutet darauf hin, dass zumindest ihre oberen Einheiten aus Sedimenten aufgebaut sind. Dies bestätigte sich bei mehreren Dredgezügen, die nur verfestigte Sedimente erbrachten. Magmatische Gesteine konnten dort nicht gewonnen werden. Im südlichen Bereich des Chukotka-Kontinentalrandes wurden jedoch interessante junge Störungssysteme auskartiert, die mit der rechtslateralen "strike-slip"-Störung an der Grenze zwischen Beringia-Platte und nordamerikanischer Platte im Zusammenhang stehen könnten. Auch an der Schnittstelle zwischen dem Chukotka-Kontinentalrand und dem Shirshovrücken erbrachten die bathymetrischen Kartierungen Hinweise auf rezente tektonisch Deformation wie z.B. nicht zusedimentierte Störungen und verkippte Krustenblöcke.

Junger Vulkanismus östlich und westlich des Piip-Vulkans

Eine Fragestellung zum Themenfeld "das heutige Aleutenbogensystem" von SO249 BERING war, in wie weit westlich und östlich des Piip-Vulkans junger Vulkanismus existiert. Nördlich des im Westen des Komandorskybeckens gelegenen Betarückens befindet sich beispielsweise ein Gebiet, das durch eine ausgeprägte Wärmestromanomalie gekennzeichnet ist. Hier sollte überprüft werden, in wie weit diese Anomalie mit rezentem Vulkanismus verbunden ist. Dies scheint jedoch nicht oder nur in geringem Ausmaß der Fall zu sein. Neben den wenigen bekannten Erhebungen in diesem Gebiet zeigten die SO249-Kartierungen zwar drei bisher unbekannte, bis zu 500 m hohe Seamounts, wobei aber zunächst unklar blieb, ob dies jüngere vulkanische Strukturen sind oder ob sie einen tektonischen Ursprung haben. An einem dieser Seamounts wurden jedoch Olivin- und Plagioklas-führende Basaltfragmente beprobt, die sich als *in situ* erwiesen und somit einen vulkanischen Ursprung dieser Strukturen belegen (s.a. Manuskript Portnyagin et al., Anlage III zum Erfolgskontrollbericht).

Im Osten des Piip-Vulkans bzw. des Volcanologists Massifs wurde während SO249 der South Komandorsky Rise, eine NW-SE-streichende Kette von kleinen Seamounts unklaren Ursprungs, untersucht. Auf älteren bathymetrischen Karten zeigen diese Seamounts eine annähernd kegelförmige Form, daher hofften wir dort eine Reihe von jüngeren Vulkankegeln vorzufinden, die ein Bindeglied zwischen dem Piip-Vulkan und den weiter östlich gelegenen "Western Cones", den westlichsten jungen Vulkanen im U.S.-amerikanischen Teil der Aleuten, sein könnte. Fächerecholotkartierungen von SO249 zeigten jedoch, dass diese Strukturen sehr flache Hängen besitzen und offenbar zusedimentiert sind. Zwei Dredgeversuche erbrachten neben größeren Mengen an halbverfestigten Sedimenten jedoch auch einige Lavafragmente offenbar lokalem Ursprungs, bei denen es sich um Magnesium-reiche Andesite handelt. Dies deutet übereinstimmend mit Ergebnissen früherer seismischer Untersuchungen durch russische Wissenschaftler stark darauf hin, dass der South Komandorsky Rise vulkanischer Natur ist (s.a. Manuskript Portnyagin et al., Anlage III zum Erfolgskontrollberichts). Die starke Sedimentbedeckung auf diesen Vulkanen zeigt allerdings, dass diese rezent nicht mehr aktiv sind. Da auch im Bereich einer Wärmestromanomalie westlich des Piip-Vulkans keine

jungen Vulkane gefunden wurden ist es sehr wahrscheinlich, dass Piip der einzige rezente Vulkan im russischen Teils des Aleutenbogens ist.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen von SO249-BERING waren neben der bewilligten Schiffzeit (A) die TvöD-Stellen für Dr. M. Portnyagin (E14, 50%, 26 Monate) und R. Golowin (E13, 100%, 18 Monate; später mit Dr. R. Bezard besetzt, s. Zwischenbericht 2. Halbjahr 2016), (B) eine studentische Hilfskraft, (C) Reisekosten sowie sonstige unmittelbare Vorhabenskosten wie (D) die Vergabe von Aufträgen und (E) Transportkosten.

(A) Position 0831 Gehälter: Ohne die Mitarbeit der wissenschaftlichen Mitarbeiter bzw. Mitarbeiterin wäre das Vorhaben nicht durchführbar gewesen. Herr Portnyagin hat bei der Vor- und Nachbereitung der Ausfahrt mitgeholfen und an beiden Fahrtabschnitten von SO249 teilgenommen. Im weiteren Projektverlauf hat er einen Teil der analytischen Arbeiten und der Dateninterpretation übernommen sowie Modellierungen durchgeführt. Weiterhin hat er Analysemethoden neu am GEOMAR etabliert (U-Pb-Datierung) oder weiterentwickelt sowie Publikationen verfasst bzw. an Ihnen mitgearbeitet. Ferner hat Herr Portnyagin (u.a. aufgrund seiner Verbindungen und russischen Sprachkenntnisse) uns erheblich bei der Beantragung der Forschungsgenehmigung und bei der Koordination der Zusammenarbeit mit Russland unterstützt. Frau Bezard hat sich in erster Linie auf die Auswertung, Interpretation, Modellierung und Synthese von Daten sowie die Abfassung der Publikationen zum Themenfeld "Bildung und Entwicklung des Aleutenbogens" konzentriert (s. Abschnitt II.1).

(B) Position 0832 Löhne: Die bewilligten Mittel für die studentische Hilfskraft (Frau Rahmsdorf) wurde entsprechend dem Antrag verwendet. Sie hat bei der Vor- und Nachbereitung der Ausfahrt mitgeholfen und an beiden Fahrtabschnitten von SO249 teilgenommen. Im weiteren Verlauf des Projektes hat sie in erster Linie bei der Aufbereitung der Proben mitgewirkt. Frau Rahmsdorf hat somit die wissenschaftlichen Mitarbeiter wesentlich unterstützt und entlastet und damit zum Erfolg des Vorhabens beigetragen.

(C) Position 0838 Reisekosten: Die bewilligten Mittel wurden wie beantragt für Dienstreisen der Projektmitarbeiter im In- und Ausland verwendet. Dazu zählen die An- und Abreise zur Expedition SO249 sowie die Teilnahme an Tagungen im Inland (Sonne-Statusseminar) und Ausland (AGU Herbsttagung).

(D) Position 0855 sonstige unmittelbare Vorhabenskosten / Aufträge an Dritte: Es wurden die Anfertigung von Gesteinsdünnschliffen und analytische Arbeiten im Rahmen der Untersuchungen von SO249 BERING als Auftrag an Dritte vergeben. Die analytischen Arbeiten umfassten Haupt- und Spurenelementanalytik an Gesamtgesteinen (Röntgenfluoreszenzanalytik, ICP-MS) sowie an Gläsern und Mineralen (Laserablations-ICP-MS). Die Anfertigung von Dünnschliffen und die Auftragsanalytik war, wie im Projektantrag und im Abschnitt II.3 dieses Berichts dargestellt, grundlegend für den erfolgreichen Abschluss des Vorhabens.

(E) Position 0855 sonstige unmittelbare Vorhabenskosten / Transporte: Transportkosten wurden wie beantragt und bewilligt für den Transport von eines 20'Containers von Kiel nach Auckland verwendet, ein zweiter 20'Containers befand sich bereits in Auckland (ex-SO246). Beide Container wurden bereits in Auckland an Bord genommen, da der Versand nach Dutch Harbor, dem Ausgangshafen von SO249, logistisch sehr schwierig geworden wäre. Weitere Transportkosten wurden für den Rücktransport beider Container von Japan nach Kiel genutzt. Schließlich wurden die für Transporte bewilligten Mittel dafür verwendet, einen Teil des auf der Ausfahrt gewonnenen Probenmaterials vom Endhafen Tomakomai per Luftfracht nach Kiel zu schicken. Damit wurde sichergestellt, dass direkt im Anschluss an die Ausfahrt mit der Probenpräparation und Analytik begonnen werden konnte.

Aus dem institutionellen Bereich wurden dem Vorhaben vom GEOMAR neben der arbeitstechnischen Grundausstattung der Projektmitarbeiter Mittel für Verbrauchsmaterial

für die Probenaufbereitung sowie für die Isotopenanalytik und die Ar/Ar-Altersdatierungen und für den Betrieb der entsprechenden Labore beigestellt. Des Weiteren waren vom GEOMAR finanzierte Wissenschaftler, Techniker/innen und studentische Hilfskräfte in das Vorhaben involviert. Für die Expedition SO249 stellte GEOMAR neben Personal (Wissenschaftler/innen und studentische Hilfskräfte) verschiedene Geräte wie Dredgen inkl. Ersatzteilen sowie umfangreiches Labor- und Verbrauchsmaterial zur Verfügung.

Weiterhin wurden Mittel für SO249-BERING durch die Leibniz Universität Hannover, das Museum für Naturkunde Berlin, die Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, das P.P. Schirchow-Institut für Ozeanologie der Russischen Akademie der Wissenschaften, das W.I. Wernadskij-Institut für Geochemie und Analytische Chemie der Russischen Akademie der Wissenschaften, das Institut für Vulkanologie und Seismologie der Fernöstlichen Abteilung der Russischen Akademie der Wissenschaften, die Staatliche Universität Moskau, das Geologische Institut der Fernöstlichen Abteilung der Russischen Akademie der Wissenschaften, die Universität von Süd-Carolina und die Universität von Wisconsin-Madison sowie durch die Russian Science Foundation, die Russian Foundation for Basic Research, das Programm des Präsidiums der Russischen Akademie der Wissenschaften "World Ocean" und die National Science Foundation (NSF, U.S.A.) zur Verfügung gestellt.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die wichtigsten Arbeitsschritte (neben Nachwuchsförderung) waren die (1) Literaturarbeiten; (2) Probennahme und Datenerfassung während der SO249-Expedition; (3) Evaluierung, Auswahl und Aufbereitung der Proben; (4) umfangreiche analytische Arbeiten; (5) Evaluierung, Auswertung und Synthese der dabei anfallenden Daten sowie Synthese dieser Daten mit bereits publizierten Daten und (6) die Präsentation der Ergebnisse auf Tagungen, in Berichten und in wissenschaftlichen Publikationen. Diese Arbeiten wurden von den Antragstellern und ihrer Arbeitsgruppe, den im Projekt angestellten Mitarbeitern (Dr. Portnyagin, Dr. Bezard) und Studenten/innen in Zusammenarbeit mit unseren Kooperationspartnern und Auftragnehmern geleistet und waren notwendig, um SO249 BERING erfolgreich abzuschließen. Alle diese Arbeiten führten zu Ergebnissen, die wiederum zum erfolgreichen Abschluss von BERING beitrugen, und waren somit angemessen. Einige Arbeitsschritte von besonderer Notwendigkeit sind im Folgenden kurz dargestellt.

Auf den beiden Fahrtabschnitten der FS. SONNE-Reise SO249 wurden die für die Durchführung von BERING zwingend erforderlichen Daten (z.B. Bathymetrie) und Proben gewonnen. Ohne die Ausfahrt wäre dieses Forschungsvorhabens nicht durchführbar gewesen.

In der Auswertephase wurden zunächst Dünnschliffe von einem Großteil der während SO249 gewonnenen magmatischen Proben angefertigt und mikroskopiert. Die Anfertigung der Dünnschliffe und die Mikroskopie waren unbedingt notwendig, da sie nicht nur zur Bestimmung von Mineralbestand und der petrographischen Charakteristika der Proben diente, sondern auch um zu evaluieren, welche Proben für die verschiedenen Analysemethoden geeignet sind.

Haupt- und Spurenelementdaten (RFA, ICP-MS) in Kombination mit mineralogischen Daten (Mikroskopie) dienten der Charakterisierung von Schmelz- und Fraktionierungsprozessen und -tiefen sowie des Aufschmelzungsgrades. Quellen, die bei der Bildung der beprobten Strukturen eine Rolle gespielt haben und Mischungen zwischen diesen Quellen wurden mittels der Analytik inkompatibler Spurenelemente und von Sr-Nd-Pb-Hf-Isotopenverhältnissen (TIMS bzw. Multikollektor-ICPMS) rekonstruiert. Immobile inkompatible Spurenelemente wie Nd oder Hf und deren Isotope lieferten uns hierzu auch Informationen über Lokalitäten, von denen nur stark alterierte Gesteine gewonnen wurden. Durch $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Laserdatierungen an Kristallen und Matrixseparaten sowie U-Pb-Datierungen an Zirkonen wurden die Alter der verschiedenen geomorphologischen Strukturen bzw. Einheiten bestimmt, um z.B. das Alter des westlichen Aleutenbogens und den zeitlichen Ablauf seiner Bildung zu rekonstruieren. Insgesamt lieferte die geochemische und geochronologische Analytik der Hartgesteinsproben (neben der

Probennahme) den Großteil der für den erfolgreichen Abschluss des Vorhabens erforderlichen Daten bzw. Informationen und war somit sowohl angemessen als auch zwingend notwendig.

Die Teilnahme an Tagungen und Arbeitstreffen diente nicht nur der Präsentation von Ergebnissen, sondern auch dem Austausch mit unseren Kooperationspartnern und anderen Wissenschaftler/innen. Diese Diskussionen sind insbesondere in der Auswertephase sehr wichtig und grundlegend für die Erstellung qualitativ hochwertiger Publikationen.

II.4. Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit

Durch den erfolgreichen Verlauf des Forschungsvorhabens SO249 BERING haben wir unter anderem neue Erkenntnisse über Prozesse, die die Initiation und Entwicklung von Subduktionssystemen kontrollieren, gewonnen. Diese Themen besitzen in der geowissenschaftlichen Grundlagenforschung eine hohe Priorität, haben aber auch umwelt- und gesellschaftspolitische sowie wirtschaftliche Relevanz. Laut dem BMBF Rahmenprogramm "Forschung für nachhaltige Entwicklung" (FONA³) sind *"Erkenntnisse aus der Erforschung und Beobachtung der Erd- und Umweltprozesse für das Verständnis der Erde als System fundamental und können schließlich in ein effektives Erdsystem-Management überführt werden"*. Im Themenfeld *"4.2 Aktive Plattenränder und Vulkanismus"* des Fachprogramms GEO:N (Geoforschung für Nachhaltigkeit) von FONA³ heißt es, dass *"die Bildungs- und Transportprozesse des Magmas im Erdmantel, die Bewegung der magmatischen Schmelzen in der Erdkruste und ihre Umwandlung in kristalline Gesteine, Laven und Pyroklastika noch weitgehend unverstanden sind. Insbesondere Forschungsprojekte zu geochemischen Fragestellungen spielen auch zukünftig eine zentrale Rolle für das Verständnis der Zusammenhänge zwischen magmatischer und vulkanischer Aktivität sowie deren Einfluss auf Umwelt, Klima- und Ökosysteme"*. Die bei SO249 BERING untersuchten Prozesse haben z.B. auch einen erheblichen Einfluss auf chemische und physikalische Eigenschaften des Meerwassers oder das Klima. Um diese Zusammenhänge und deren Bedeutung und Folgen für die Umwelt besser zu erfassen, ist die Kenntnis der zugrundeliegenden geologischen Prozesse essentiell. Insgesamt sind somit aus diesem Arbeiten mittel- und langfristig verschiedene potentielle Nutzungen zu erwarten. Es kann z.B. eine wichtige Grundlage für weiterführende wissenschaftliche Projekte sein, die die Auswirkungen von magmatischer bzw. vulkanischer Aktivität auf die Menschheit untersuchen. Zum anderen können aus diesem Vorhaben aber auch umweltpolitische oder wirtschaftliche Programme resultieren, mit denen eine bessere Abschätzung der Folgen magmatischer bzw. vulkanischer Aktivität auf Umwelt, Klima und Weltwirtschaft erreicht werden soll. Weiterhin könnten wirtschaftliche Projekte zur Rohstoffexploration von SO249 BERING profitieren, da für die zukünftige Abschätzung mineralischer Rohstoffe die Kenntnis der ihrer Bildung zugrunde liegenden vulkanischen, magmatischen und tektonischen Prozesse essentiell ist. Die Daten und Ergebnisse können weiterhin zu den aktuellen Fragen der Seerechtskonvention, der nachhaltigen Entwicklung beim marinen Management und für Risikoanalysen (Vulkanismus, Erdbeben) von den dafür zuständigen nationalen und internationalen Stellen genutzt werden. Wissenschaftlich haben sich intensivere Kooperationen mit nationalen und internationalen Institutionen ergeben, die im Rahmen zukünftiger Projekte fortgesetzt und weiter ausgebaut werden sollen. Dies betrifft insbesondere unsere langjährige Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern aus Russland und den U.S.A. Die Veröffentlichung der Ergebnisse in der Fachliteratur hat zudem auch einen Werbeeffekt für die deutsche Meeresforschung, aus dem Nachfrage nach Expertise, Verfahren und Instrumenten erwachsen mag. Dementsprechend wurden bzw. werden die Ergebnisse aus SO249 BERING auf Tagungen vorgestellt und in der internationalen Fachliteratur publiziert und damit allgemein zugänglich gemacht. Weiterhin wurden Daten und Ergebnisse, soweit sinnvoll (Bathymetrie, PARASOUND, DSHIP, Stationsdaten etc.), an internationale Datenbanken transferiert (z.B. BSH, PANGAEA, OSIS Kiel). Gesteinsproben, Separate, Gesteinspulver etc. werden im zentralen Probenlager des GEOMAR archiviert und können zukünftig über OSIS recherchiert werden. Zusätzlich wurden Proben- und Datensätze den

russischen und U.S.-amerikanischen Kooperationspartnern zur Verfügung gestellt. Dort können die Daten dazu beitragen, die Voraussetzungen für die Nutzung der Meeresressourcen und die Bekämpfung der marinen Umweltprobleme in diesem Bereich zu verbessern.

II.5. Fortschritt bei anderen Stellen

Die Fortschritte bei anderen Stellen sind unter Abschnitt II.1. "Darstellung der Ergebnisse" bzw. im Erfolgskontrollbericht zusammengefasst.

II.6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Fahrtbericht:

Werner R, Hoernle K, Hauff F, Portnyagin M, Yogodzinski G, Ziegler A (eds) (2016) RV SONNE Fahrtbericht / Cruise Report SO249 - BERING – Origin and Evolution of the Bering Sea: An Integrated Geochronological, Volcanological, Petrological and Geochemical Approach. GEOMAR-Report 30: 89p + app. DOI 10.3289/GEOMAR_REP_NS_30_2016

Begutachtete Artikel in Fachzeitschriften:

- Yogodzinski G, Kelemen PB, Hoernle K, Brown ST, Bindeman I, Vervoort JD, Sims KW, Portnyagin M, Werner R (2017) Sr Isotopes in Western Aleutian Seafloor Lavas: Implications for the Source of Fluids and Trace Element Character of Arc Volcanic Rocks. *Earth Planetary Science Letters* 475: 169-180, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2017.07.007> (liegt diesem Bericht als Anlage 1 bei)
- Silantyev SA, Kubrakova IV, Portnyagin MV, Tyutyunnik OA, Zhilkina AV, Gryaznova AS, Hoernle K, Werner R (2018) Ultramafic–Mafic Assemblage of Plutonic Rocks and Hornblende Schists of Shirshov Rise, Bering Sea, and Stalemate Ridge, Northwest Pacific: Geodynamic Interpretations of Geochemical Data. *Petrology* 26, no. 5: 492–514, DOI: 10.1134/S0869591118050077 (liegt diesem Bericht als Anlage 2 bei)
- Derkachev AN, Ponomareva VV, Portnyagin MV, Gorbarenko SA, Nikolaeva NA, Malakhov MI, Zelenin EA, Nürnberg D, Yanguang Liu (2018) Widespread tephra layers in the Bering Sea sediments: distal clues to large explosive eruptions from the Aleutian volcanic arc. *Bulletin of Volcanology*: <https://doi.org/10.1007/s00445-018-1254-9> (liegt diesem Bericht als Anlage 3 bei)
- Ziegler A, Bock C, Ketten DR, Mair RW, Mueller S, Nagelmann N, Pracht ED, Schröder L (2018) Digital three-dimensional imaging techniques provide new analytical pathways for malacological research. *American Malacological Bulletin* 36: 248-273, <https://bioone.org/journals/american-malacological-bulletin/volume-36/issue-2> (liegt diesem Bericht als Anlage 4 bei)
- Bezard R, Hoernle K, Pfänder JA, Jicha B, Werner R, Hauff F, Portnyagin M, Sperner B, Yogodzinski G, Turner S (in Vorbereitung) Aleutian subduction initiation > 20Ma earlier than previously thought: Implications for the Cretaceous and Paleogene geodynamic evolution of the Pacific. *Geology* (liegt dem Erfolgskontrollbericht als Anlage I bei)
- Bezard R, Hoernle K, Hauff F, Portnyagin M, Werner R, Gerke G, Jicha B, Yogodzinski G, Garbe-Schönberg D, Jung S, Turner S (in Vorbereitung) A similar along-strike convergence angle during the pre-Miocene activity for the Aleutian arc. *Geochimica et Cosmochimica Acta* (liegt dem Erfolgskontrollbericht als Anlage II bei)
- Portnyagin MV, Hoernle KA, Hauff F, Werner R, Yogodzinski GM, Baranov BV, Stepanov OV, Bezard R, Botcharnikov RE, Garbe-Schönberg D (in Vorbereitung) Voluminous and geochemically diverse volcanism in dual tectonic setting of the Far-Western Aleutian Arc: Volcanologists Massif and Piip Volcano revisited. *Chemical Geology* (liegt dem Erfolgskontrollbericht als Anlage III bei)
- Yogodzinski GM, Hauff F, Portnyagin M, Walden R, Koch S, Werner R, Hoernle K (in Vorbereitung) Nature and Significance of North Pacific Altered Oceanic Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*

- Botcharnikov R, Wilke M, Portnyagin M, Garrevoet J, Klimm K, Krasheninnikov S, Buhre S, Fackenberg G (in Vorbereitung) Determination of Fe³⁺/Fe²⁺ ratio in micrometer-size objects by confocal micro-XANES: Application for melt inclusion studies. *American Mineralogist*
- Silantiev SA, Shabykova VV, Kostitsin YuA, Krasnova EA, Ermakov Ya Yu, Dogadkin DN, Zhilkina AV (in Vorbereitung) Magmatic sources of north-western Pacific: interpretation of Sr and Nd isotope data in rocks from Stalemate Ridge, Ingenstrem Depression and Shirshov Ridge. *Geochemistry International*

Qualifizierungsarbeiten:

- Gerke G (2017): Major and trace element geochemistry of lavas recovered on R/V Sonne SO249 cruise from submarine canyons cutting the basement of the Aleutian Arc. Master Thesis. Christian-Albrechts University of Kiel, 71 pp
- Koch S (2017) Major and trace element geochemistry of the NW Pacific seafloor from R/V Sonne 249 cruise samples. Master Thesis, Christian-Albrechts-University Kiel, 77 pp
- Stepanov O (2017) Petrographic rock types and composition of quenched glasses of the Volcanologists Massif, Western Aleutian Arc. Master Thesis. M.V. Lomonosov Moscow State University, 45 p.
- Sagorny CL (2017) Cephalopods of the R/V SONNE expedition SO-249 BERING – species descriptions of cirrate and incirrate octopods based on non-invasive imaging techniques. Master Thesis, Institut für Evolutionsbiologie und Ökologie, Bonn
- Krebs N (2018) Petrography, composition and U/Pb zircon ages of igneous rocks from the Aleutian Arc. Bachelor Thesis. Christian-Albrechts University of Kiel, 171 pp
- Shabykova VV (noch nicht abgeschlossen) Isotope geochemistry of magmatic complexes of Stalemate and Shirshov Ridges (NW Pacific). Master Thesis. Lomonosov Moscow State University.
- Kuper K. (noch nicht abgeschlossen) Experimental investigation of sulfur solubility and speciation in adakitic magmas. Master Thesis. Institut für Geowissenschaften, Gutenberg Universität Mainz.

Nicht begutachtete Artikel, Presse, Öffentlichkeitsarbeit:

- Savel'ev DP, Gorbach NV, Portnyagin MV (2016) Expedition of the research vessel «SONNE» in the Bering Sea, July–August 2016. *Vestnik KRAUNTS. Earth Sciences*, V. 32, No. 4: 129-132. <http://www.kscnet.ru/journal/kraesc/article/viewFile/109/pdf> (in Russian)
- Artikel in den Kieler Nachrichten (basierend auf einer Pressemitteilung des GEOMAR) zum Start der Expedition
- TV-Beitrag (WDR, 10.04.2017)
- Diverse Artikel in Zeitungen und Magazinen basierend auf einer Pressemitteilung der Univ. Bonn (z.B. Kölner Stadtanzeiger, General-Anzeiger, Express-Bonner Anzeiger, forsch) und in sozialen Medien über die biologischen Untersuchungen, insbesondere über einen Dumbo Oktopus, der auf SO249 als "Beifang" gefangen wurde und sich als neue Art erwies.

Konferenzbeiträge:

- Portnyagin M, Hoernle K, Werner R, Baranov B, Yogodzinski G (2016) BERING - A new international marine research project to investigate the magmatic and tectonic evolution of the Bering Sea and its margins. 9th Biennial Workshop on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Zone (JKASP 2016), 31 May - 3 June 2016, Fairbanks, Alaska, USA, Abstract volume: 40-41, Talk
- Hoernle K, Höfig T, Portnyagin M, Yogodzinski GM, Werner R, Hauff F, Van den Bogaard P, Garbe-Schönberg D (2016) Subduction initiation and early evolution of the Aleutian Arc: Combined on-land and off-shore studies. *GSA Annual Meeting*, 25-28 September, 2016, Denver, Colorado, USA, 48(7): doi: 10.1130/abs/2016AM-280508, Talk
- Hoernle K, Werner R, Portnyagin M, Yogodzinski GM, Hauff F, Baranov B, Silantiev S

- (2016) New Insights into the Origin of the Bering Sea from SO201 and SO249 cruises (Invited). AGU Fall Meeting, 12-16 December 2016, San Francisco, USA, Abstract T23F-04, Invited Talk
- Hauff F, Werner R, Portnyagin M, Baranov B, Yogodzinski G, Botcharnikov R, Hoernle K, Silantiev S, Van den Bogaard P (2016) Exploring the Origin of the Bering Sea: Initial Results of Cruise SO249-2 (17th July – 13th August 2016). AGU Fall Meeting, 12-16 December 2016, San Francisco, USA, Abstract T11C-2637, Poster
- Portnyagin M, Hoernle K, Werner R, Baranov B, Hauff F, Yogodzinski G (2017) Submarine Piip Volcano, Western Aleutian Arc: Temporal Evolution from Back-Arc Rift to Island-Arc Stratovolcano. AGU Chapman Conference, Hobart, Tasmania, 29.01. - 03.02.2017 - Talk
- Hoernle K, Portnyagin M, Hauff F, Werner R, Yogodzinski G, Baranov B, Silantiev S, Garbe-Schönberg D (2017) SO-249 BERING – Origin and Evolution of the Bering Sea: An Integrated Geochronological, Volcanological, Petrological and Geochemical Approach. Statusseminar Meeresforschung mit FS SONNE, 14. – 15. Februar, Oldenburg, Talk
- Sagorny CL, Nagelmann N, Pracht ED, Ziegler A (2017) Comprehensive morphological and molecular analysis of deep sea cephalopods collected in the North Pacific. 83rd Annual Meeting of the American Malacological Society, Newark, DE, USA, Juli 2017, Talk
- Bezard R, Hoernle K, Hauff F, Portnyagin M, Werner R, Yogodzinski G, Jicha B, Garbe-Schönberg D, Turner S, Schaefer B (2017) Inception and early evolution of the Aleutian arc. AGU Fall Meeting, New Orleans, USA, Poster
- Sagorny CL, Nagelmann N, Pracht ED, Ziegler A (2017) Comprehensive morphological and molecular analysis of deep sea cephalopods collected in the North Pacific. 83rd Annual Meeting of the American Malacological Society, Newark, DE, USA, Talk
- Ziegler A (2018) Expedition SO-249 BERING: Tiefseeorganismen vom Grunde des Nordpazifiks. Kinderuniversität Bonn, Talk
- Sagorny CL, Ziegler A (2018) A new species of dumbo octopod from the North Pacific. CIAC 2018, St. Petersburg, FL, USA, Talk
- Sagorny CL, Ziegler A (2018) Effects of fixation and preservation on deep sea octopodiform species. CIAC 2018, St. Petersburg, FL, USA, Poster
- Bezard R, Hoernle K, Hauff F, Portnyagin M, Werner R, Yogodzinski G, Jicha B, Garbe-Schönberg D, Turner S, Schaefer B (2018) Subduction initiation in the Aleutian arc system. Goldschmidt Conference, 12-17. August, Boston, Talk
- Gryaznova AS, Silantiev SA, Portnyagin MV, Hoernle K (2018) Petrography and geochemistry of plutonic rocks of the central part of the Shirshov Range (Bering Sea). All-Russian conference of young scientists «Actual problems in geochemistry – 2018», Irkutsk, May 29 – June 2, 2018, Talk
- Gryaznova AS, Silantiev SA, Portnyagin MV, Hoernle K (2018) Petrography and geochemistry of plutonic rocks dredged on north-western termination of the Stalemate Ridge (North-western Pacific). IX Siberian conference of young scientists. Novosibirsk. November 19 - 23, 2018, Talk

Danksagung

Wir danken dem BMBF für die gewährte Unterstützung und dem Projektträger PtJ-Rostock für die unbürokratische administrative Abwicklung. Weitere Mittel wurden durch GEOMAR, die Leibniz Universität Hannover, das P.P. Schirchow-Institut für Ozeanologie der Russischen Akademie der Wissenschaften, das W.I. Wernadskij-Institut für Geochemie und Analytische Chemie der Russischen Akademie der Wissenschaften, das Institut für Vulkanologie und Seismologie der Fernöstlichen Abteilung der Russischen Akademie der Wissenschaften, die Staatliche Universität Moskau, das Geologisches Institut der Fernöstlichen Abteilung der Russischen Akademie der Wissenschaften und die Universitäten von Süd-Carolina und Wisconsin-Madison (beide U.S.A.) für die vulkanologisch-geochronologisch-geochemischen Untersuchungen von SO249 BERING zur Verfügung gestellt. Das Museum für Naturkunde Berlin und die Rheinische Friedrich-

Wilhelms-Universität Bonn stellten Mittel für die Fixierung und Auswertung der biologischen Beifänge in den Dredgen sowie der gesammelten Lockersedimente zur Verfügung.

Die Teilnahme der russischen Wissenschaftler/innen an SO249 wurde finanziert durch die Russian Science Foundation, die Russian Foundation for Basic Research und das Programm des Präsidiums der Russischen Akademie der Wissenschaften "World Ocean". Die Teilnahme unserer U.S.-amerikanischen Kooperationspartner wurde ermöglicht durch die National Science Foundation (NSF).

Unser besonderer Dank gilt Kapitän Mallon sowie der Besatzung des FS. Sonne für ihre harte Arbeit, Professionalität, große Erfahrung, stete Hilfsbereitschaft und die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre an Bord. Dies alles hat wesentlich dazu beigetragen, dass die Reise SO249 erfolgreich verlief.

Den zuständigen Stellen Russlands und der U.S.A. danken wir für die Gewährung der Forschungsgenehmigung und dem Auswärtigen Amt, den Deutschen Botschaften in Moskau und Washington, dem Ministerium für Wissenschaft und Bildung der Russischen Föderation und dem BMBF für ihre Unterstützung in dieser Sache. Sehr dankbar sind wir Oksana Evdokimova und Dr. Dmitry Savelyev vom Institut für Vulkanologie und Seismologie der Fernöstlichen Abteilung der Russischen Akademie der Wissenschaften in Petropavlovsk-Kamchatsky für ihre enorme Hilfe bei der Visa-Beantragung für die deutschen und U.S.-amerikanischen Wissenschaftler und bei verschiedenen anderen Angelegenheiten bezüglich des Hafenanlaufs in Petropavlovsk-Kamchatsky. Wir danken auch Frau Anastasia Kusnetsova, der Direktorin des Komandorsky National Reservats, für die Erteilung der Genehmigung innerhalb des Komandorsky Schutzgebietes arbeiten zu dürfen.

Verzeichnis der Anlagen

- Anlage 1: Publikation von Yogodzinski et al. (2017)
- Anlage 2: Publikation von Silantiev et al. (2018)
- Anlage 3: Publikation von Derkachev et al. (2018)
- Anlage 4: Publikation von Ziegler et al. (2018)