



Doctoral Thesis

## Timing and evolution of Middle Triassic shoshonitic magmatism in the Southern Alps (northern Italy)

**Author(s):**

Storck, Julian-Christopher

**Publication Date:**

2019

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000349031> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 25878

**TIMING AND EVOLUTION  
OF MIDDLE TRIASSIC SHOSHONITIC MAGMATISM  
IN THE SOUTHERN ALPS (NORTHERN ITALY)**

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by  
JULIAN-CHRISTOPHER STORCK  
M. Sc. Earth Sciences, University of Heidelberg

born on 06.09.1988  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Peter Ulmer  
Dr. Peter Brack  
Dr. Jörn-Frederik Wotzlaw  
Prof. Dr. Cyril Chelle-Michou  
Prof. Dr. Blair Schoene

2019

# Abstract

The origin and magmatic evolution of high-potassium to shoshonitic magmas occurring throughout the geologic record is a highly controversial issue. In continental areas shoshonitic magmatism is extensively used as a geotectonic marker for specific environments and mantle sources. The more generally accepted scenario for the generation of shoshonitic magmas involves subduction related metasomatism of subcontinental lithospheric mantle that becomes remobilized during subsequent tectonic events. Widely differing models have been proposed for the mantle source compositions and conditions of melt generation and very limited information is available on the differentiation paths (pressure, temperature and volatile content) of such magmas on their way from the mantle through the Earth's crust.

The Middle Triassic shoshonitic province located in the Dolomites of the Southern Alps (northern Italy) is among the best-studied areas regarding the interplay of coeval tectonics, sedimentation and magmatic activity. This province further provides important insights into the evolution of shoshonitic magmatism in a complex tectonic setting, as it comprises a continuous differentiation series ranging from the most primitive to highly evolved compositions. By combining field geological observations, stratigraphy, high-precision geochronology and (isotope-)geochemistry the timing and involved magmatic processes through the crustal column down to the crust-mantle boundary can be constrained. In addition, the geochemical peculiarity of the high-potassium calcalkaline to shoshonitic magmas is investigated by an experimental approach, designed to explore potential causes of potassium enrichment of primitive melts during transfer from the subcontinental lithospheric mantle and storage in the lower continental crust.

Chapter 1 provides an introduction to potassic igneous rocks, with focus on shoshonites, including their occurrences within different tectonic settings, as well as some constraints on their petrological evolution. In the second part of this chapter a summary of recent advances in high precision zircon petrochronology is given. This tool allows determining the (isotope-) geochemical evolution of the Middle Triassic magmatic province in the Southern Alps (northern Italy) at high temporal resolution.

In Chapter 2, the geological field relationships and a comprehensive high-precision zircon U-Pb geochronology dataset for the major intrusive complexes and several volcanic ash layers are provided and integrated with a high-resolution stratigraphic framework of Middle Triassic volcano-sedimentary successions in the Southern Alps (northern Italy). New chemical abrasion isotope dilution thermal ionisation mass spectrometry (CA-ID-TIMS) U-Pb dates constrain the duration of the main interval of Middle Triassic magmatism to at least  $5.07 \pm 0.06$  million years (myr.). Silicic eruptions between  $242.653 \pm 0.036$  and  $238.646 \pm 0.037$  Ma predate a <900 kyr. eruptive interval of voluminous basaltic lava flows. Coeval mafic to intermediate intrusions dated at  $238.190 \pm 0.055$  to  $238.075 \pm 0.087$  Ma may rep-

resent feeder and subvolcanic complexes related to the basalt flows. Stratigraphically further up section, silicic tuffs from latest Ladinian to early Carnian sequences dated at  $237.680 \pm 0.047$  and  $237.579 \pm 0.042$  Ma represent the youngest evidence of the magmatic episode. Spatially resolved zircon trace element data discriminate between early volcanic products, later stage intrusions and post-intrusive volcanic ash beds and place tight constraints on the link between silicic and mafic igneous products in a complex geodynamic setting.

Chapter 3 builds on the findings of Chapter 2 by tracing the mantle-crust interaction in the roots of the Middle Triassic magmatic province in the Southern Alps (northern Italy). For ancient magmatic provinces, isotope-geochemical tracers (e.g. Hf, Sr and Nd) are powerful tools to probe the source regions and magma-crust interaction during ascent, storage and differentiation. Tracing the origin and evolution of magmas on their pathway through the lithosphere and crust is key to understand the magmatic processes that eventually produce eruptions. Here, I present hafnium isotopic compositions obtained by multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry (MC-ICP-MS) of ID-TIMS dated zircons to trace the evolution of the Middle Triassic magmatic province in the Southern Alps (northern Italy) at high temporal resolution. The magmatic products analysed here, show systematic changes in hafnium isotopic composition with time that record progressively stronger crustal assimilation over 3.5 million-years, followed by a rapid increase in  $\epsilon_{\text{Hf}}$  towards more juvenile mantle-dominated compositions for the major pulse of mafic intrusions (Monzoni-Predazzo) and post-intrusive volcanic ash beds within one million years. These trends are interpreted to reflect variations in mantle-crust interaction through time. Initial intrusions of basaltic dykes into the relatively cold lower crust cause only limited crustal assimilation/melting, but subsequent magma injections into progressively hotter crust results in more extensive partial melting and assimilation of crustal material. Subsequent intrusions into the magmatic lower-crustal roots cannibalize previous intrusions with progressively less isotopic contrast due to dilution with mantle-derived magmas. This is potentially accompanied by an increase in magma flux due to delamination of lower crustal cumulates into the subcontinental lithospheric mantle. Ancient pelitic to mafic lower crustal lithologies get progressively replaced by juvenile cumulates. Therefore, the observed trends in hafnium isotopic composition do not necessarily require tectonic re-organizations or changes in mantle sources, but trace variations in mantle-crust interaction during thermally induced chemical maturation of the lower crustal magmatic roots.

In Chapter 4 fractional and equilibrium crystallization experiments on hydrous shoshonitic parental magmas are conducted by exploring potassium enrichment along two different liquid evolution paths based on two different water contents (1 and 3 wt%) in the same initial starting material. The experimental investigation is linked to the magmatic products of the short-lived Middle Triassic shoshonitic activity in the Dolomites area of the Southern Alps (northern Italy) that provide a complete spectrum of plutonic and volcanic rocks from most primitive to highly evolved composition. The experimental runs are performed at a static pressure of 8 kbar and a temperature range from near-liquidus at  $1100^{\circ}\text{C}$  to  $950^{\circ}\text{C}$ . Resulting phase assemblages and liquid compositions are investigated by in situ techniques, secondary electron microscopy for imaging and standardized electron probe micro analyser (EPMA) for quantitative chemical characterisation. The compositional range of the liquid line of descent (LLD) evolves from basalt to trachyandesite. Anorthite-rich plagioclase and minor spinel are responsible for the silica increase at  $1010^{\circ}\text{C}$  from 51 to 53 wt% and 51 to 58 wt% in the high and low water experiments,

respectively. Fractionation of pargasitic amphibole and plagioclase cause an increase in  $K_2O/Na_2O$  leading to a potassium enriched melt. This trend becomes even more significant for experimental charges with low water contents that subsequently lead to lower melt fractions at a given temperature. The major element compositions along the LLD correlate well with the overall differentiation trend observed for the Middle Triassic shoshonitic magmas occurring in the Dolomites. The results infer that  $K_2O$  enrichment at lower crustal conditions (8 kbar) due to protracted crystallization of a moderately enriched ( $K_2O+Na_2O$ ) and moderately hydrous basaltic magma is a possible scenario to form high-potassium calc alkaline to shoshonitic magmas in continental environments.

Chapter 5 includes a compilation of the results and some general conclusions from the three projects carried out during this study. Finally, I provide additional suggestions and raise questions for further research advancing our understanding of the mantle-petrogenesis and transcrustal evolution of shoshonitic magmatism in continental areas and future perspectives why the Middle Triassic magmatic province (Dolomites, northern Italy) with its volcano-sedimentary record remains an ideal natural laboratory for multi-disciplinary research.

# Kurzzusammenfassung

Ursprung und Entwicklung Kalium-reicher bis shoshonitischer Magmen, welche durch die gesamte Erdgeschichte hin auftreten, obliegen hoch kontroverser Debatten. Im kontinentalen Bereich wird das Auftreten dieser shoshonitischen Magmen weithin als geotektonischer Marker für spezifische Umgebungen und Mantelquellen gebraucht. Das am weitesten akzeptierte Szenario für die Genese shoshonitischer Magmen beinhaltet die subduktionsbezogene Metasomatose des subkontinentalen lithosphärischen Mantels, welcher während späterer tektonischer Ereignisse remobilisiert wird. Verschiedenste Modelle wurden bislang vorgeschlagen, um die Mantelquelle und die schmelzbildenden Prozesse zu beschreiben. Es ist jedoch nur wenig darüber bekannt, inwiefern und unter welchen Bedingungen (Druck, Temperatur, Anteile an volatilen Elementen) die Magmen auf dem Weg vom Mantel bis zur Erdkruste differenzieren.

Der shoshonitische Magmatismus der Mittel-Trias in den Dolomiten der nord-italienischen Südalpen repräsentiert eines der am besten studierten Gebiete, die das Zusammenspiel aus Tektonik, sedimentären Prozessen und magmatischer Aktivität dokumentiert. Darüber hinaus ermöglicht diese Region wichtige Einblicke in die Entwicklung shoshonitischer Magmen innerhalb eines komplexen tektonischen Rahmens, welche die komplette Differentiationsserie von primitivsten zu hoch differenzierten Gesteinszusammensetzungen beinhaltet. Basierend auf der Kombination von feldgeologischen Untersuchungen, Stratigraphie, hoch-präzisen Altersdatierungen und der Isotopengeochemie lässt sich der magmatische Prozess entlang der Kruste bis hinab zur Krusten-Mantel-Grenze zeitlich aufgelöst rekonstruieren. Eine experimentelle Studie soll die geochemische Besonderheit des hoch-K kalkalkalinen bis shoshonitischen Magmatismus und potentielle Ursachen für die Anreicherung von Kalium in primitiven Schmelzen während des Transfers vom subkontinentalen lithosphärischen Mantel und anschließender Lagerung in der Unterkruste untersuchen.

Kapitel 1 beinhaltet eine Einführung zu Kalium-reichen magmatischen Gesteinen und fokussiert sich dabei speziell auf Shoshonite, deren Auftreten innerhalb bestimmter geotektonischer Milieus sowie deren petrologische Entwicklung. Im zweiten Teil dieses Kapitels wird eine Zusammenfassung der jüngsten Fortschritte in der hochpräzisen Zirkon-Petrochronologie gegeben. Dieses Werkzeug ermöglicht eine zeitlich hochaufgelöste Rekonstruktion der (isotopen-)geochemischen Entwicklung der magmatischen Provinz der mittleren Trias in den Südalpen (Norditalien).

In Kapitel 2 werden die geologischen Feldbeziehungen und ein umfassender, hochpräziser U-Pb-Datensatz für die wichtigsten intrusiven Komplexe und mehrere Vulkanascheschichten bereitgestellt und in ein hochauflösendes stratigraphisches Gerüst vulkanisch-sedimentärer Abfolgen der mittleren Trias der Südalpen (Norditalien) integriert. Neue U-Pb-Daten, die an chemisch abradierten Zirkonen

mittels Isotopenverdünnungs-Thermionenmassenspektrometrie (CA-ID-TIMS) generiert wurden, beschränken die Dauer des Hauptintervalls des mittleren Trias-Magmatismus auf mindestens  $5.07 \pm 0.06$  Millionen Jahre. Saure Vulkanite, die zwischen  $242.653 \pm 0.036$  und  $238.646 \pm 0.037$  Ma eruptierten, gingen einem weniger als 900 k.y. andauernden voluminösen Intervall aus basaltischen Lavaflässen voraus. Zeitgleich kam es zu mafischen bis intermediären Intrusionen, die auf  $238.190 \pm 0.055$  bis  $238.075 \pm 0.087$  Ma datiert werden konnten. Sie stellen potentielle subvulkanische Komplexe und Förderzentren dar, die mit den Basaltflüssen zusammenhängen. Stratigraphisch darüber wurden saure Tuffe in sedimentären Abfolgen des obersten Ladins bis frühen Karns auf  $237.680 \pm 0.047$  und  $237.579 \pm 0.042$  Ma datiert. Diese Aschelagen repräsentieren die bislang jüngsten bekannten Zeugen dieser magmatischen Episode. Ortsaufgelöste Zirkon-Spurenelementdaten unterscheiden zwischen frühen vulkanischen Produkten, späteren Intrusionen und post-eruptiven vulkanischen Aschelagen und lassen Rückschlüsse auf den Zusammenhang zwischen sauren und mafischen magmatischen Produkten in einer komplexen geodynamischen Umgebung zu.

Kapitel 3 baut auf den Erkenntnissen von Kapitel 2 auf und untersucht die Wechselwirkung zwischen Mantel und Kruste in den Wurzeln der magmatischen Provinz der Mitteltrias in den Südalpen (Norditalien). Für vorzeitliche magmatische Provinzen sind isotopengeochemische Tracer (z.B. Hf, Sr und Nd) geeignete Werkzeuge, um die Quellregionen von Magmen, sowie deren Interaktion mit der Kruste während ihres Aufstiegs, ihrer Lagerung und Differenzierung zu untersuchen. Den Ursprung und die Entwicklung von Magmen auf ihrem Weg durch die Lithosphäre und die Kruste zu untersuchen liefert Schlüsselinformationen, die zum Verständnis der magmatischen Prozesse und eventuellen Ausbrüchen führen. Hier präsentiere ich Hafniumisotopenzusammensetzungen, die mithilfe von Multikollektor-Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (MC-ICP-MS) von zuvor mittels ID-TIMS datierten Zirkonen untersucht wurden, um die Entwicklung der magmatischen Provinz der mittleren Trias in den Südalpen (Norditalien) unter hoher zeitlicher Auflösung nachzuvollziehen. Die hier analysierten magmatischen Produkte zeigen systematische Veränderungen in der Zusammensetzung ihrer Hafniumisotopie, die über 3.5 Millionen Jahre hinweg eine zunehmend stärkere Krustenassimilation verzeichnen, gefolgt von einem schnellen Anstieg des  $\epsilon_{\text{Hf}}$  hin zu mehr von juvenilem Mantel dominierten Kompositionen für den Hauptimpuls mafischer Intrusionen (Monzoni–Predazzo) und postintrusiven Vulkanaschen innerhalb einer Million Jahre. Diese Trends werden als zeitliche Variationen in der Interaktion zwischen Mantel und Kruste interpretiert. Anfängliches Eindringen basaltischer Gänge in die relativ kalte untere Kruste verursacht nur eine begrenzte Assimilation/Aufschmelzung der Kruste. Nachfolgende Magmainjektionen in eine zunehmend heißere Kruste jedoch führen zu einer stärkeren partiellen Aufschmelzung und Assimilation von Krustenmaterial. Weitere Intrusionen in die magmatischen Unterkrustenwurzeln können frühere Intrusionen mit fortschreitend geringerem Isotopenkontrast aufgrund der Verdünnung mit aus dem Mantel stammenden Magmen kanibalisieren. Dies wird möglicherweise von einem Anstieg des Magmenflusses begleitet, der durch Delaminierung von Unterkrustenkumulaten in den subkontinentalen lithosphärischen Mantel verursacht wird. Die beobachteten Trends in der Hafniumisotopenzusammensetzung erfordern daher nicht notwendigerweise tektonische Reorganisation oder Änderungen der Mantelquelle, sondern zeigen Variationen in der Wechselwirkung zwischen Mantel- und Kruste während der thermisch induzierten chemischen Reifung der unteren magmatischen Wurzeln der Unterkruste auf, welche alte pelitische bis mafische Unterkrustenlithologien

durch juvenile Kumulate ersetzen.

In Kapitel 4 werden Fraktionierungs- und Gleichgewichtskristallisationsexperimente an wasserhaltigen shoshonitischen parentalen Magmen durchgeführt, wobei die Kaliumanreicherung entlang zweier unterschiedlicher Entwicklungspfade, basierend auf zwei unterschiedlichen Wassergehalten (1 und 3 Gew.-%) im gleichen Ausgangsmaterial untersucht wird. Die experimentelle Untersuchung steht im Zusammenhang mit den shoshonitischen magmatischen Produkten der mittleren Trias in den Dolomiten der Südalpen (Norditalien), welche das komplette Spektrum plutonischer und vulkanischer Gesteine von primitiven bis hochentwickelten Zusammensetzungen liefern. Die Versuchsläufe werden bei einem statischen Druck von 8 kbar und einem Temperaturbereich nahe dem Liquidus bei 1100°C bis 950°C durchgeführt. Resultierende Mineralparagenesen und Schmelzzusammensetzungen werden durch In-situ-Techniken, wie Sekundärelektronenmikroskopie zur optischen Charakterisierung und anschließenden quantitativen Untersuchungen mittels standardisierter Elektronenstrahlmikrosonde (EPMA) analysiert. Der Zusammensetzungsbereich, der sich entwickelnden (differenzierten) Schmelze (LLD), verläuft von Basalt zu Trachyandesit. Anorthit-reicher Plagioklas und geringfügig Spinell sind für die Erhöhung des Silikatgehalts bei 1010°C von 51 auf 53 Gew.-% bzw. 51 auf 58 Gew.-% in den Experimenten mit hohem bzw. niedrigem Wasser verantwortlich. Die Fraktionierung von pargasitischem Amphibol und Plagioklas führt zu einem Anstieg von  $K_2O/Na_2O$ , was zu Kalium-Anreicherung in der Schmelze führt. Dieser Trend wird noch deutlicher für experimentelle Chargen mit niedrigen Wassergehalten, die bei gleicher Temperatur zu niedrigeren Schmelzanteilen führen und das inkompatible Kalium verstärkt in der Restschmelze anreichert. Die Hauptelementkompositionen entlang der LLD korrelieren gut mit dem Gesamtdifferenzierungstrend, der für die shoshonitischen Magmen der mittleren Trias in den Dolomiten beobachtet wurde. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die  $K_2O$ -Anreicherung bei Unterkrustenbedingungen (8 kbar) aufgrund der fortschreitenden Kristallisation eines mäßig angereicherten ( $K_2O + Na_2O$ ) und mäßig wasserhaltigen basaltischen Magmas ein mögliches Szenario darstellt, um in kontinentalen Umgebungen Schmelzen mit hohem Kaliumgehalt zu bilden.

Kapitel 5 enthält eine Zusammenstellung der Ergebnisse und einige allgemeine Schlussfolgerungen aus den drei Projekten, die im Rahmen dieser Studie durchgeführt wurden. Zum Schluss mache ich weitere Vorschläge und erhebe Fragen für weitere Untersuchungen, deren Beantwortung zu unserem Verständnis der Mantelpetrogenese und der transkrustalen Entwicklung shoshonitischer Magmen in kontinentalen Gebieten verbessern könnten. Darüber hinaus weise ich daraufhin, warum es sich auch in Zukunft wichtig ist, die mitteltriassischen vulkanisch-sedimentären Abfolgen der magmatischen Provinz der Dolomiten (Norditalien) als natürliches Labor für multi-disziplinäre Forschung zu nutzen.