

DISS. ETH NO. 25768

***MECHANICALLY-CONTROLLED CHEMICAL ZONING AND
ITS PRESERVATION IN HIGH-TEMPERATURE MINERALS
FROM THE WESTERN GNEISS REGION, NORWAY***

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

presented by
KATHARINA SCHMIDT

Master of Science in Geological Science, Freie Universität Berlin, Germany

born on
10.04.1988 citizen
of Germany

accepted on the recommendation of

*Prof. Dr. Lucie Tajčmanová, examiner
Dr. Johannes C. Vrijmoed, co-examiner
Dr. Evangelos Moulas, co-examiner
Prof. Dr. Lukas Baumgartner, co-examiner
Prof. Dr. Tim Eglinton, co-examiner*

2019

Abstract

Chemical zoning in metamorphic minerals reflects variations in pressure and temperature along the path which the rock experienced. In many mineral phases, chemical diffusion is sufficiently fast to homogenize the chemical heterogeneities on geological time scales at temperatures exceeding 700 °C. However, when chemical zonation in minerals that experienced high temperature conditions for millions of years is preserved, the current knowledge of chemical diffusion rates in minerals may not be sufficient to explain the preservation. Because in such cases, classical diffusion predicts complete chemical equilibration. Therefore, in high-temperature metamorphic rocks, the preservation of chemical zoning still remains enigmatic. Interestingly, the development and preservation of compositional zoning in minerals can be strongly influenced by mechanically-maintained pressure variations.

To investigate these effects on the chemical zoning, samples are targetly chosen from a region that witnessed a long lasting high temperature metamorphism - the Western Gneiss Region (WGR). In the northernmost part of the WGR, temperature and pressure conditions were the highest within the WGR. This region consists of numerous mafic enclaves that have been well studied. However, the pressure-temperature evolution as well as the timing of the main metamorphic events of the host gneisses remains unknown. This area offers an excellent opportunity to study those host gneisses and explore their relationship to the ultra-high pressure (UHP) conditions attained in the mafic lenses. Phase equilibria modelling and Lu-Hf geochronology was applied with the focus on quartzofeldspathic samples. Interestingly, garnets from these samples have pronounced compositional zoning. Lu-Hf dating of compositional zones garnets reveal that investigated rock specimens experienced Caledonian ultra-high pressure (U)HP metamorphism with peak metamorphic conditions of >800 °C and 3.2 GPa, and a post (U)HP decompression.

These samples are further investigated for mechanisms that might be responsible for the preservation of chemical zoning in high-temperature minerals and a comparison of classical diffusion modelling to approaches based on equilibrium under pressure gradient in natural garnets is provided.

The ability to preserve the chemical zoning despite of the high temperatures is investigated. Results from the diffusion modelling show too short duration of the high-temperature event which is inconsistent with the existing regional geology data. On the contrary, the new equilibrium approach that predicts compositional zoning as a result of spatially varying pressure has been applied. All samples were systematically tested whether the observed chemical zoning can be fit by the new equilibrium approach. The results show a good fit with naturally observed chemical zoning in multi-component systems. This points to an explanation for chemical zoning in multicomponent systems, such as garnet, being preserved mechanically under high-temperature conditions, i.e. by local pressure variations.

The enigmatic preservation of an oscillatory zoned plagioclase inclusion in garnet lead to a detailed microstructural characterisation of the sharp zoned inclusion. To better understand how such a microstructure with sharp chemical zoning can be preserved on the million years' time scale at high temperatures, two different diffusion modelling approaches were applied. The classical Fickian diffusion model predicts be homogenized within thousands of years. In contrast, when chemical diffusion is coupled with mechanical deformation, a significant intragranular pressure gradient is developed at the very early stage of the chemical re-equilibration. Due to slow viscous relaxation, further chemical homogenization is inhibited, which may have contributed to the preservation of the oscillatory zoning.

In this thesis, I investigated mechanisms that might be responsible for the preservation of chemical zoning in high-temperature minerals. The presented case studies show more evidence for the preservation of chemical zoning by mechanical effects. The results presented here may serve as inspiration to re-investigate the preservation of such a zoning in other high-temperature regions worldwide.

Kurzzusammenfassung

Die chemische Zonierung in metamorphen Mineralien spiegelt die Druck- und Temperaturschwankungen entlang des Weges wieder, den das Gestein erlebt hat. In vielen Mineralphasen ist die chemische Diffusion ausreichend schnell, um die chemischen Heterogenitäten während geologischer Zeitskalen bei Temperaturen über 700 °C zu homogenisieren. Wenn jedoch die chemische Zonierung in Mineralien, die Millionen von Jahren unter Hochtemperaturbedingungen stand, erhalten bleibt, reicht das derzeitige Wissen über die chemischen Diffusionsraten in Mineralien möglicherweise nicht aus, um die Konservierung zu erklären. Denn in solchen Fällen sagt die klassische Diffusion eine vollständige chemische Gleichgewichtseinstellung voraus. Daher bleibt in metamorphen Hochtemperaturgesteinen der Erhalt der chemischen Zonierung immer noch rätselhaft. Interessanterweise kann die Entwicklung und Erhaltung der Zonierung der Zusammensetzung in Mineralien durch mechanisch gehaltene Druckschwankungen stark beeinflusst werden.

Um diese Auswirkungen auf die chemische Zonierung zu untersuchen, werden gezielt Proben aus einer Region ausgewählt, die lang anhaltende Hochtemperatur-Metamorphose erlebt hat - die Western Gneis Region (WGR).

Im nördlichsten Teil der WGR waren die Temperatur- und Druckbedingungen innerhalb der WGR am höchsten. Diese Region besteht aus zahlreichen mafischen Enklaven, die bisher gut untersucht wurden. Jedoch sind die Druck-Temperatur-Entwicklung sowie der zeitliche Ablauf der wichtigsten metamorphen Ereignisse des Wirtsgestein weniger gut bekannt. Dieser Bereich bietet eine hervorragende Gelegenheit, diese Wirtsgneise zu untersuchen und ihre Beziehung zu den Ultrahochdruckbedingungen (UHP) der mafischen Linsen zu untersuchen. Dabei lag der Fokus auf quarzfeldspathische Proben und wenden Phasengleichgewichtsmodellierung und Lu-Hf-Geochronologie an. Interessanterweise haben Granate aus diesen Proben ausgeprägte Zonierung in ihrer Zusammensetzung. Die Lu-Hf-Datierung zeigt, dass die untersuchten Gesteinsproben mit zonierten Granaten kaledonische (U)-HP-Metamorphose mit metamorphen Spitzenzuständen von > 800 °C und 3.2 GPa erlebte und nachfolgender Dekompression nach (U)HP Metamorphose.

Diese Proben werden weiter auf Mechanismen untersucht, die für die Erhaltung der chemischen Zonierung in Hochtemperaturmineralien verantwortlich sein könnten. Dabei wird ein Vergleich der klassischen Diffusionsmodellierung mit Ansätzen, die auf dem Gleichgewicht unter Druckgradienten in natürlichen Granaten basieren gezogen.

Die Fähigkeit, die Zonierung der Zusammensetzung trotz der hohen Temperaturen zu erhalten, wird untersucht. Die Ergebnisse der Diffusionsmodellierung zeigen eine zu kurze Dauer des Hochtemperaturereignisses, die nicht mit den vorhandenen regionalen geologischen Daten übereinstimmt.

Im Gegensatz wurde der neue Gleichgewichtsansatz angewendet, der die Zonierung der Zusammensetzung aufgrund von räumlich variierendem Druck vorhersagt. Alle Proben wurden systematisch getestet, ob die beobachteten chemischen Zonen durch den neuen Gleichgewichtsansatz angepasst werden können. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit natürlich beobachteten chemischen Zonen in Mehrkomponentensystemen. Dies deutet auf eine Erklärung für die chemische Zonierung in Mehrkomponentensystemen wie Granat hin, die mechanisch unter Hochtemperaturbedingungen, d.h. durch örtliche Druckschwankungen, erhalten bleiben.

Ein oszillatorischer zonierter Plagioklaseinschluss in Granat zog Aufmerksamkeit wegen seiner Erhaltung an und führte zu einer detaillierten mikrostrukturellen Charakterisierung des scharfen Zoneneinschlusses. Um besser zu verstehen, wie eine solche Mikrostruktur mit einer scharfen chemischen Zonierung über Millionen von Jahren erhalten werden kann, wurden zwei unterschiedliche Ansätze der Diffusionsmodellierung angewandt. Das klassische Fick'sche Diffusionsmodell sagt voraus, dass es innerhalb von Tausenden von Jahren homogenisiert wird. Im Gegensatz dazu wird, wenn chemische Diffusion mit mechanischer Verformung gekoppelt ist, ein erheblicher intragranulärer Druckgradient zu einem sehr frühen Zeitpunkt der chemischen Äquilibration entwickelt. Aufgrund der langsamen viskosen Relaxation wird die weitere chemische Homogenisierung gehemmt, was zur Aufrechterhaltung der oszillatorischen Zonierung beigetragen haben kann.

In der vorliegenden Arbeit habe ich Mechanismen untersucht, die möglicherweise für die Erhaltung der chemischen Zonierung in Hochtemperaturmineralien verantwortlich sind. Die vorgestellten Fallstudien zeigen mehr Belege für die Erhaltung der chemischen Zonen durch mechanische Effekte. Die hier vorgestellten Ergebnisse können als Inspiration dienen, um die Erhaltung einer solchen Zonierung in anderen Hochtemperaturregionen weltweit erneut zu untersuchen.