



Doctoral Thesis

Fragmentation, eruption dynamics and depositional processes in mixed carbonatite-silicate volcanic eruptions

Author(s):

Stadlin, Sonja A.

Publication Date:

2015

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010474108> →

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. 22259

*Fragmentation, eruption dynamics and
depositional processes in mixed carbonatite-
silicate volcanic eruptions*

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

Presented by

Sonja Andrea Stadlin

Master of Science in Earth Sciences
ETH Zurich

born on 28.05.1984

citizen of Zurich, Switzerland

accepted on the recommendation of

PD. Dr. Hannes B. Mattsson

Prof. Dr. Max W. Schmidt

Dr. Anatoly Zaitsev

ETH Zurich

ETH Zurich

St. Petersburg State University

2015

Summary

The Oldoinyo Lengai stratovolcano is located in northern Tanzania. It belongs to the Gregory Rift Valley, a branch of the East African Rift System. The volcano is known for a unique magma composition, which is an alkaline carbonatitic magma, also commonly referred to as natrocarbonatitic magma. (Natro-)Carbonatites are defined as igneous rocks with more than 50 modal% magmatic carbonate and contain less than 20 wt.% SiO₂. Carbonatitic magmas are ionic liquids with only little polymerization and therefore the viscosity of such magmas is extremely low (down to 0.1 Pa s). Another characteristic feature of these melts is the low melting temperature. The natrocarbonatitic magmas of Oldoinyo Lengai are characterized by melting temperatures of 490-590°C, a low SiO₂ content (0.10-0.13 wt.%) and high alkali contents (Na₂O+K₂O=41 wt.%), as well as high rare earth element contents (La: 456 ppm; Ce: 486 ppm; Pr: 34 ppm; Nd: 79 ppm). Effusive carbonatitic activity was interrupted by highly explosive eruptions in the years 1917, 1926, 1940, 1966-67 and 2007-2008. These explosive eruptions were characterized by high eruption columns reaching up to 15 km into the atmosphere and the ash was dispersed several hundred kilometers away from the vent. The goal of this PhD study was to obtain a clear picture on the last (2007-2008) explosive eruption and to understand the processes which are responsible for the vigorous explosive eruption at this specific volcano. In addition, the consequences of the tephra fall on the quality of the drinking water was studied, since considerable amounts of fluorine and chlorine were measured in the bulk rock analyses of the Oldoinyo Lengai samples.

Fieldwork was conducted around Oldoinyo Lengai in May 2011 and 2013 in order to sample the tephra layers from the most recent explosive episode and to measure the thickness of the individual layers around the volcano. These samples were complemented with a series of samples from the first weeks and months of the eruption, which were not exposed to rainfall. Thin sections and epoxy pills of the tephra samples were prepared to study the morphology of the grains and the mineralogy of the erupted tephra. Bulk rock analyses were used to analyze the overall evolution of the tephra with time in the eruption and to constrain the mixing ratio of the two parental magmas (i.e., natrocarbonatitic and nephelinitic). The calculations of the mixing ratios showed that the samples collected three days after the eruption started are on average composed of 74% natrocarbonatites and 26% nephelinites, whereas the natrocarbonatitic part in the samples collected three weeks after the onset is only 27%, and the nephelinitic part 73%. These data support the visual observations of the eruption, which started with a mildly natrocarbonatitic activity and changed to explosive,

nephelinitic with time. The mixing of the two magmas led to forced exsolution of CO₂, which was the main driving force for the eruption.

Samples collected in September and December 2007 directly falling from the plume during the eruption were used for leaching experiments, as they were not exposed to rain. For comparative purposes, a sample from the 2006 natrocarbonatitic lava flow was resampled in 2011 (i.e., after 5 years of exposure to rainfall) was also analyzed to compare the leaching processes affecting both lavas and ashes from Oldoinyo Lengai. The ash samples were leached in deionized water, and the composition of the water was measured after 60 minutes of leaching. Such experiments give indications on possible hazards from elements which are leached into the drinking water. Special interest was given to fluorine, as a too high intake of fluorine (1.5-2 mg/l per day) may be toxic and can result in both dental and skeletal fluorosis. In the case of the Rift Valley population, these illnesses are already wide spread, as the fluoride content in the river waters is already elevated. The results show, that although the fluorine in the lavas is higher (3.22 wt.%) than in the ashes (0.5-1.7 wt.%), the lavas release less amounts of fluorine to the environment (319 mg/kg) than the ashes (573-895 mg/kg). This is a result of how the fluorine occurs in the rocks: in the lavas, most fluorine is present in the minerals fluorite and neighborite, which have very low solubilities in water (16 mg/l for fluorite), whereas the fluorine in the ashes occurs in the minerals neighborite, sellaite and villiaumite, which are found on the surface of the ashes. Villiaumite has a very high solubility in water (42'200 mg/l) and therefore releases a large amount of fluorine. In addition, the small ash grains have a very large surface area, and this also contributes to the large amount of fluorine released into the water. However, the release of fluorine from the tephra is a rapid process, and therefore it is not advisable to the local Maasai population to drink the river water during or hours after the eruption, as the fluoride concentration increases strongly in a short time. On the other hand, the release of fluorine from the lava flow is a slow process and has thus not a large impact on the river water quality.

Microprobe analyses of gregoryite and nyerereite, the two main minerals occurring in natrocarbonatites, were conducted in order to better characterize these unique phases and to record if there are any significant differences between these phases in the explosive 2007-2008 eruption compared to the normal effusive natrocarbonatitic activity. The minerals were measured in samples collected from a lava flow in June 2003 and from tephra collected in early September 2007. The analyses revealed higher Na₂O content in the tephra samples than in the lava lake samples which, compared to experimental results, leads to the conclusion that

the lava flow samples were cooled faster than the tephra samples and that the compositions of these phases may vary more than previously considered just as an effect of the cooling rate.

In May 2013 we sampled a location on the north western flank of the volcano, where a deposit of a pyroclastic flow from February 2008 was accessible. Accidental lithics and the matrix of the pyroclastic flow were sampled and analyzed in the lab. Thin section analyses showed a wide range of texture (ranging from very fine grained minerals and partly weathered to coarse grained (>5 mm) and well sorted), whereas the mineralogy remained similar through all the samples (main phenocryst phases are nepheline, pyroxene and phlogopite, with minor amounts of garnet and wollastonite). A large compositional spread is observed in the bulk rock compositions of the samples from the pyroclastic flow (e.g., SiO₂: 42-59 wt.%; Na₂O+K₂O: 7-18 wt.%). Comparisons to previously published data from silicate rocks of Oldoinyo Lengai show, that our new samples cover a much larger compositional spread than so far reported. This most probably due to the fact that our samples represent lavas from the surface as well as material that was ripped up from the inside of the volcano.

This PhD study has provided new important data on the explosive eruptions of Oldoinyo Lengai and the inner workings of this volcano. For the first time, a large set of samples from different stages during the eruption was available and analyzed, and the results show the geochemical evolution of the eruption with time. The importance of magma mixing and CO₂ exsolution have been highlighted, as well as the fact that the two parental magmas were not conjugate pairs, indicated by reaction rims on pyroxenes. In addition, this study provides important data on potentially toxic elements that are leached out of the lavas and tephra with rain water, especially fluorine. The water is consumed by the local Maasai population and it is important to know the consequences of intake of the water. Overall, this PhD project gave a new and detailed insight into the inner working of the volcano and gives important information to the local people about their health risk during eruptive activity.

Zusammenfassung

Der Schichtvulkan Oldoinyo Lengai liegt im Norden Tansanias, im Gregory Rift Valley, einem Seitenarm des Ostafrikanischen Grabenbruchs. Der Vulkan ist bekannt für seine einzigartige alkalische, karbonatitische Magmenzusammensetzung, welche auch natrokarbonatitisch genannt wird. Karbonatite sind Eruptivgesteine, welche per Definition aus mehr als 50 modal% magmatischen Karbonaten und weniger als 20 Gew.% SiO_2 bestehen. Karbonatitische Magmen sind ionische Schmelzen, welche nur eine schwache Polymerisation haben, was sich in der tiefen Viskosität der Schmelzen (0.1 Pa s) widerspiegelt. Eine weitere typische Eigenschaft dieser Schmelzen ist die sehr niedrige Schmelztemperatur. Die Schmelztemperatur der Natrokarbonatite des Oldoinyo Lengai liegt zwischen 490 und 590°C. Weitere charakteristische Merkmale sind der sehr tiefe SiO_2 -Gehalt (0.10-0.13 Gew.%), einen hohen Anteil an Alkalien ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=41$ Gew.%), sowie eine Anreicherung an Seltenen Erden (La: 456 ppm; Ce: 486 ppm; Pr: 34 ppm; Nd: 79 ppm). Die effusive karbonatitische Aktivität am Oldoinyo Lengai wurde in den Jahren 1917, 1926, 1940, 1966-1967 und 2007-2008 durch starke, explosive Eruptionen unterbrochen. Die explosiven Eruptionen erzeugten bis zu 15 km hohe Aschewolken, welche Material bis zu 100 Kilometer vom Krater wegtransportierten und ablagerten. Das Ziel dieser Dissertation ist, ein klares Bild der letzten explosiven Eruption in 2007-2008 zu erhalten, und zu verstehen, welche Prozesse zu einer solch starken Eruption führten. Zusätzlich wurden die Folgen der Ascheablagerungen in den Flüssen untersucht. Es wurde gezeigt, welche Elemente und in welchen Mengen diese aus der Asche in Wasser gelöst werden, da schon geringe Mengen an Chlor und Fluor im Trinkwasser starke gesundheitliche Schäden zur Folge haben können.

Im Mai 2011 und 2013 wurde Feldarbeit am und um den Oldoinyo Lengai durchgeführt, wobei Proben der Ascheschicht entnommen und zusätzlich die Mächtigkeit der Ascheschichten gemessen wurden. Diese wurden ergänzt mit Proben, die in den ersten Wochen und Monaten der Eruption gesammelt wurden. Diese Asche wurde direkt während der Eruption gesammelt und war nie Regen oder Feuchtigkeit ausgesetzt, die karbonatitischen Anteile sind somit noch nicht verwittert. Die Morphologie der Aschekörner und die Mineralogie der Asche sind anhand von Dünnschliffen und Epoxy-Pillen bestimmt worden. Gesamtgesteins-Analysen wurden gemacht, um die geochemische Evolution der Asche im Laufe der Zeit während der Eruption zu bestimmen, sowie das Mischverhältnis der beiden Magmen (karbonatitisch und nephelinitisch) zu definieren. Berechnungen der Mischverhältnisse zeigten, dass die Proben, die drei Tage nach Beginn der Eruption gesammelt wurden zu 74% aus natrokarbonatitischem und zu 26% aus nephelinitischem

Material bestehen. Die Proben, welche drei Wochen nach Beginn der Eruption gesammelt wurden, bestehen nur noch zu 27% aus Natrokarbonatiten und zu 73% aus Nepheliniten. Die Analysen unterstützen die visuelle Beobachtungen der Eruption: Diese startete mit einer leichten natrokarbonatitischen Aktivität und wechselte mit der Zeit zu einer explosiven, nephelinitischen Eruption. Das Mischen der beiden Magmen führte zur CO₂ Ausgasung, was die Eruption hauptsächlich antrieb.

Die direkt während der Eruption gesammelten Proben von September und Dezember 2007 wurden für Auswaschungs-Experimente benutzt, da diese vorgängig keinem Regen ausgesetzt waren. Zusätzlich wurden nochmals Proben des Lavaflusses von 2006 im Mai 2011 genommen, um die ursprüngliche Zusammensetzung mit derjenigen nach fünf Jahren zu vergleichen, sowie die Auswaschung der Elemente vom Lavafluss und der Asche zu vergleichen. Die Asche- und Lavaseeproben wurden in destilliertes Wasser gegeben und nach 60 Minuten wieder herausgefiltert. Danach wurde die Zusammensetzung des Wassers gemessen, um zu analysieren, welche Elemente in welchen Mengen von der Asche ins Wasser gelöst werden. Solche Experimente helfen die Gefahren und Folgen abzuschätzen, welche von einer Eruption bezüglich des Trinkwassers ausgehen. Von besonderem Interesse ist das Element Fluor, da eine Einnahme von zu viel Fluor (1.5-2 mg/l pro Tag) giftig ist und zu Dentalfluorose und Skelettfluorose führen kann. Diese Krankheiten sind im Rift Valley weit verbreitet, da der Fluorid-Gehalt in den Gewässern bereits erhöht ist. Die Resultate der Experimente zeigen, dass, obwohl der Fluor-Gehalt im Lavafluss höher ist (3.22 Gew. %) als in der Asche (0.5-1.7 Gew.%), weniger Fluor aus dem Lavafluss (319 mg/kg) als aus der Asche (573-895 mg/kg) gelöst wird. Dies liegt hauptsächlich an den Mineralien, in welchen das Fluor vorkommt: Im Lavafluss ist Fluor hauptsächlich in den Mineralien Fluorit und Neighborit gebunden, welche in Wasser praktisch unlöslich sind (0.016 g/l für Fluorit). In der Asche kommt das Fluor hauptsächlich als Neighborit, Sellait und Villiaumit vor, welche sich alle auf der Oberfläche der Asche befinden. Villiaumit hat eine sehr hohe Löslichkeit (42.2 mg/l) und erhöht deshalb den Fluor-Gehalt im Wasser markant. Die grosse Oberfläche der Asche trägt auch dazu bei, dass aus der Asche sehr viel Fluor gelöst wird. Fluor in der Asche wird schnell in Wasser gelöst; Der Fluorid-Gehalt steigt dementsprechend nach einem Ascheregen in den Gewässern stark an. Für die Bevölkerung sind diese Gewässer bereits während oder direkt nach der Eruption als Trinkwasser-Quellen gesundheitsgefährdend. Die Auslösung vom Lavafluss hingegen stellt eine kleinere Gefahr dar, da diese sehr langsam vorangeht.

Die zwei Hauptminerale in natrokarbonatitischen Gesteinen, Gregoryit und Nyerereit, wurden mit der Elektronen-Mikrosonde untersucht, um diese, bislang noch einzigartigen Mineralien, besser zu charakterisieren und um festzustellen, ob es geochemische Unterschiede zwischen den Mineralien der Asche und des Lavaflusses gibt. Die Mineralien wurden in Proben vom Lavafluss aus dem Jahr 2003 und von Asche vom September 2007 analysiert. Die Resultate zeigen einen höheren Na_2O -Gehalt in der Asche vom September 2007 als im Lavafluss 2003. Vergleiche dieser Daten mit experimentellen Resultaten zeigen, dass die Proben des Lavaflusses schneller abgekühlt sind als die der Asche. Die Unterschiede dieser Mineralien könnte auch noch andere Gründe haben und nicht nur, wie bisher angenommen, von der Abkühlungsrate bestimmt sein.

Während der Feldarbeit im Mai 2013 wurden Proben von der nord-westlichen Flanke des Oldoinyo Lengai genommen, wo man Zugang zu einer Ablagerung eines pyroklastischen Stroms von 2008 hat. Gesteinsfragmente sowie die Grundmasse wurden gesammelt und anschliessend im Labor untersucht. Analysen der Dünnschliffe der verschiedenen Proben zeigten eine grosse Variation in Textur (von feinkörnig und verwittert bis grobkörnig (>5 mm) und gut sortiert), während die Mineralogie durchgehend gleich bleibt (hauptsächlich Nephelin, (Aegirin-)Augit, Phlogopit, wenig Wollastonit und Granat). Die Gesamtgesteinszusammensetzungen der einzelnen Proben zeigen starke Variationen in z.B. SiO_2 von 42-59 Gew.% und $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ zwischen 7 und 18 Gew.%. Vergleiche zu früheren publizierten Analysen von silikat-reichen Gesteinen zeigen, dass die neuen Proben vom pyroklastischen Strom eine viel grössere Bandbreite, bezogen auf die Zusammensetzung, abdecken. Der Grund liegt an der Herkunft dieser Proben, welche sowohl von Laven der Oberfläche, als auch Material vom Innern des Vulkans sind.

Diese Dissertation hat neue, wichtige Daten des einzigartigen Eruptions-Systems von Oldoinyo Lengai hervorgebracht. Zum ersten Mal konnten Proben von verschiedenen Zeitabschnitten der Eruption analysiert werden. Die Ergebnisse zeigen die geochemische Veränderung der Eruption mit der Zeit. Es wurde gezeigt, welche wichtige Rolle das Vermischen von zwei Magmen, sowie die Ausgasung von CO_2 , während der Eruption spielt. Anhand von Reaktionsrändern an Klinopyroxenen wurde nachgewiesen, dass die beiden ursprünglichen Magmen nicht direkt miteinander in Kontakt waren, sondern sich nach der Separierung unabhängig voneinander entwickelt haben. Des Weiteren wurden wichtige Daten hervorgebracht über mögliche giftige Elemente, insbesondere Fluor, welche von der Asche durch Regen in die Flüsse herausgewaschen werden. Das Flusswasser wird von den lokalen

Maasai-Stämmen als Trinkwasser benutzt, und daher ist es wichtig, die gesundheitlichen Konsequenzen dieses Wassers aufzuzeigen.

Zusammenfassend hat diese Dissertation neue, detaillierte Informationen über das innere System des Vulkans aufgezeigt, sowie wichtige Informationen für die lokale Bevölkerung bezüglich des Trinkwassers gegeben.