

Magmatismus in Sedimentbecken – der Ursache vergangener Umweltkatastrophen auf der Spur

Dr. Christophe Galerne, Prof. Dr. Christian Berndt
(GEOMAR - Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel)

Der Magmatismus in Sedimentbecken verursachte globale Massenaussterben und ist die engste Analogie zum heutigen anthropogenen Klimawandel. Das Studium dieser natürlichen Prozesse ist oft schwierig, da die Magma-Aufstiegssysteme mit kaum sichtbarer Oberflächenexpression verschüttet bleiben. Bei GEOMAR untersuchen wir diese Systeme mit Hilfe von marinen seismischen Daten und modernsten numerischen Modellen.

- Unter Spalteneruptionen verbergen sich große Magma-Aufstiegssysteme, die mehr Treibhausgase freigesetzt haben als der größte der heutigen Vulkane.
- Die Magma-Aufstiegssysteme der Magmatischen Großprovinzen (engl.: Large Igneous Provinces – LIP) lösten im Verborgenen die Freisetzung großer Mengen Methan und Kohlendioxid aus, die rasch an der Erdoberfläche austraten.
- Das Verständnis dieser geologischen Auslöser von paläo-ökologischen Krisen ermöglicht eine bessere Prognose des anthropogenen Klimawandels und seiner Kipp-Punkte.

Wenn wir an Vulkane denken, dann stellen wir uns einzeln stehende Berge vor, die in den Himmel ragen. Doch repräsentieren diese nur einen kleinen Teil dessen, wie geschmolzene Magma aus der Erdkruste an die Oberfläche dringt.

Selbst die größten Vulkane auf der Erde, wie zum Beispiel der Mauna Loa auf Hawaii, sind winzig im Vergleich zu der Masse an vulkanischem Material, welches in der Vergangenheit der Erde in sogenannten Magmatischen Großprovinzen (engl.: Large Igneous Provinces – LIP) abgelagert wurde. Dabei handelt es sich um Gebiete in der Erdkruste, in denen große Mengen Magma ausgestoßen wurden. Beispielsweise entwickelte sich im Verlaufe der Entstehung des Nordatlantiks eine Magmatische Großprovinz. Sie war durch Spalteneruptionen (Abb. 1) gekennzeichnet, welche hunderte Kilometer lang waren und zu Lavaflüssen von einigen zehn Metern Dicke und einer Länge von einigen zehn Kilometern führten.

Diese Spalteneruptionen spuckten so viel Lava aus, dass der Rand des Nordatlantiks über eine Länge von 3.000 Kilometern von einer 12 Kilometer dicken Lavaschicht bedeckt war. In den letzten 55 Millionen Jahren ist nichts auch nur annähernd Vergleichbares geschehen, und doch ist die damit verbundene globale Erwärmung auch heute noch das jüngste Analogon zur vom Menschen verursachten Erderwärmung.

Eine Magmatische Großprovinz versteckt im Nordatlantik

Wie bei einem Eisberg waren die enormen Spaltenausbrüche nur der winzige Oberflächenausdruck von Magmabewegungen in den Sedimentbecken unter dem Meeresboden rund um den Nordatlantik. Das aufsteigende Magma verhielt sich wie ein durch die Luft fliegendes Geschoss, wenn es auf Wasser trifft: es verlor erheblich an Geschwindigkeit und verlangsamte sich aufgrund der veränderten Umgebung.



Abb. 1: A) Eine Spalteneruption an der Oberfläche. B) Erkalte Magma, die in einem Sedimentbecken erhalten ist. Das Magma ist zur Zeit des Ausbruchs durch einen vertikalen Spalt (Gesteinsgang oder Dyke) an die Oberfläche gedrungen und anschließend erkalte. C) Beispiel eines 20 Kilometer breiten und 100-150 Meter dicken Lagergangs (Sill) in Südafrika (Galerne et al., 2008). Der Lagergang hat die Form einer Untertasse. Diese Geometrie wird häufig bei Intrusionen in Sedimentbecken beobachtet (C-Oben: Luftaufnahme; C-Unten: Bodenaufnahme). **Foto A:** Ari Trausti Guðmundsson, Geophysiker und Dokumentarfilmer/Filmmacher, **Fotos B-C:** Christophe Galerne, Geologe und Petrophysiker.

Als das Magma den Boden des Sedimentbeckens in etwa 10 Kilometer Tiefe unterhalb des Meeresgrunds erreichte, kam es zu einem vergleichbaren Verlust an Geschwindigkeit und einer enormen Zerstörungskraft. Anstatt vertikal durch das Sediment an die Oberfläche aufzusteigen, wurde das Magma durch tausende Schichten von Sedimenten unterschiedlicher Widerstandskraft zur horizontalen Ausbreitung gezwungen.

Schließlich ging die gesamte hydraulische Sprengkraft des Magmas verloren und der Wärmeverlust war so groß, dass es nicht länger flüssig blieb. Die aus der Kristallisation des Magmas entstandenen Gesteinsschichten werden als Lagergang oder Sill bezeichnet und können überall um den Nordatlantik untersucht werden. Tausende dieser Lagergänge entstanden in den Sedimentbecken des Nordatlantiks bevor es schließlich zu einem Durchbruch kam, der zu den Spalteneruptionen führte.

Wie kann man einen Blick auf solche Magma-Aufstiegssysteme werfen?

Durch das Aussenden und Empfangen von seismischen Pulsen können wir Magmaaufstiegssysteme unterhalb der Erdoberfläche sichtbar machen. Die Ergebnisse der bisherigen Meeresforschung legen nahe, dass erkalte Magma-

systeme in Sedimentbecken weltweit verbreitet sind. Eine solche seismische Untersuchung unter der Leitung des GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel hat kürzlich ein aktives Magmasystem kartiert, dass sich derzeit im Golf von Kalifornien bildet (Berndt et al., 2016). Obwohl dieses System weitaus kleiner als die Magmasysteme der Magmatischen Großprovinzen im Nordatlantik, Südafrika, Indien oder Sibirien ist, so vermitteln uns die entsprechenden seismischen Daten einen Eindruck davon, was sich im Verlaufe dieser außerordentlichen Vulkanismusperioden ereignete.

Das geologische Rezept für Massenaussterben

Obwohl diese großen Magma-Aufstiegssysteme keinen unmittelbaren Einfluss auf die Erdoberfläche haben, lösen sie doch eine Kettenreaktion aus, die zu langanhaltenden katastrophalen Auswirkungen auf die Ozeane, die Atmosphäre und die Biosphäre führen kann (Eldholm & Thomas, 1993).

Während das Magma abkühlt, gibt es seine Wärme an die umgebenden Sedimente ab. Hier setzt das einen Prozess in Gang, der als Hydrothermalismus bezeichnet wird. Da Sedimentbecken die größten geologischen Kohlenstoffspeicher

der Erde sind (Jones et al., 2016), können diese Speicher durch die vom Magma abgeführte Wärme mobilisiert werden und große Mengen an eingeschlossenem Kohlenstoff durch gewaltige Entgasung freisetzen.

Wie die anthropogenen Aktivitäten der Gegenwart kann das Eindringen von Magma in Sedimentbecken, die reich an organischem Material sind, den natürlichen Kohlenstoffkreislauf der Atmosphäre und der Ozeane aus dem Gleichgewicht bringen. Wir wissen mittlerweile, dass die 150 Jahre der Nutzung fossiler Energieträger durch den Menschen einem durchschnittlichen globalen Temperaturanstieg von etwa 2 °C entsprechen.

Vor 55 Millionen Jahren wurde eine ähnliche Menge an Treibhausgasen (2.000–12.000 Gt) durch magmatische Aktivität in den Sedimentbecken vor der Küste Norwegens freigesetzt, was zu einem globalen Temperaturanstieg von 6–8° Celsius führte (Svensen et al., 2004).

In geologisch noch weiter zurück liegender Zeit führte ein magmatisches Ereignis in einem Becken, das heute den größten Teil Südafrikas ausmacht, zur Freisetzung etwa des zehnfachen der anthropogenen Emissionen seit Beginn der industriellen Revolution (Galerne & Hasenclever, 2019). Unsere Computersimulationen deuten darauf hin, dass die entsprechenden Entgasungsraten um fünf Größenordnungen ($10^5 = 100.000$) höher gewesen sein könnten als die jährlichen anthropogenen Emissionen.

Noch mehr Magma ist in die Sedimentbecken des späteren Zentralatlantiks (201 Millionen Jahre) und des Tunguska-Beckens in Sibirien (252 Millionen Jahre) eingedrungen. Diese beiden magmatischen Ereignisse sind die einzigen plausiblen und quantitativ bestimmbareren Ursachen für zwei der umfangreichsten Massensterben auf der Erde (Jones et al., 2016).

Ein besseres Verständnis der Vergangenheit ist ein Fenster zur Zukunft

Diese Art des Vulkanismus mit fast keinem Ausdruck an der Erdoberfläche ist ein verborgener Killer, vergraben durch die Zeit in den Gesteinschichten. Auf unserer Erde brechen jeden Tag Vulkane aus und setzen dabei unter anderem übelriechenden Schwefel frei, und dennoch stören sie dabei den natürlichen Kohlenstoffkreislauf nicht in signifikanter Weise. Selbst die größten Ausbrüche in historischen Zeiten wie der des Mt. Pinatubo (1991) veränderten das Weltklima nur für einige Monate.

Im Gegensatz dazu fallen die durch großflächige magmatische Intrusionen in Sedimentbecken freigesetzten Mengen an Treibhausgasen mit großen Massenaussterben auf der Erde zusammen. Ein besseres Verständnis dieser Krisen, ihrer Auslöser und Kipp-Punkte kann uns helfen, die Auswirkungen und langanhaltenden Folgen der anthropogenen Erderwärmung besser vorherzusagen.

Referenzen

- Berndt, C., Hensen, C., Mortera-Gutierrez, C., Sarkar, S., Geilbert, S., Schmidt, M., ... Lizarralde, D. (2016). Rifting under steam – How rift magmatism triggers methane venting from sedimentary basins. *Geology*, 44(9), 767-770. doi:10.1130/G38049.1
- Eldholm, O., & Thomas, E. (1993). Environmental-Impact of Volcanic Margin Formation. *Earth and Planetary Science Letters*, 117(3-4), 319-329. doi:10.1016/0012-821X(93)90087-P
- Galerne, C. Y. & Hasenclever, J. (2019). Distinct degassing pulses during magma invasion in the stratified Karoo Basin – New insights from hydrothermal fluid flow modelling. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(6), 2955-2984. doi:10.1029/2018GC008120
- Galerne, C. Y., Neumann, E.-R. & Planke, S. (2008). Emplacement Mechanisms of Sill Complexes: Information from the Geochemical Architecture of the Golden Valley Sill Complex, South Africa. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177(2), 425-440. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.06.004
- Jones, M., Jerram, D. A., Svensen, H. & Grove, C. (2016). The effects of large igneous provinces on the global carbon and sulphur cycles. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 441(1), 4-21. doi:10.1016/j.palaeo.2015.06.042
- Svensen, H., Planke, S., Malthé-Sørenssen, A., Jamtveit, B., Myklebust, R., Eidem, T. R. & Rey, S. S. (2004). Release of methane from a volcanic basin as a mechanism for initial Eocene global warming. *Nature*, 429, 542-545. doi:10.1038/nature02566

Magmatism in sedimentary basins – tracking down the cause of past environmental crises

Dr. Christophe Galerne, Prof. Dr. Christian Berndt
(GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel)

Magmatism in sedimentary basins caused global mass extinctions and it is the closest analogue to present-day anthropogenic climate change. Studying these natural processes is often difficult because the magma plumbing systems remain buried with little surface expression. At GEOMAR, we examine these systems with the help of marine seismic imaging during oceanic surveys and cutting-edge numerical models.

-
- Fissure eruptions hide large magma plumbing systems that have released more greenhouse gases than the largest of today's volcanoes.
 - The magma plumbing systems of Large Igneous Provinces (LIP) secretly triggered the release of large amounts of methane and carbon dioxide that rapidly vented out at the Earth's surface.
 - Understanding of these geological triggers of Paleo-environmental crises enables a better forecast of anthropogenic climate change and its tipping points.
-

When we think about volcanoes, we picture solitary mountains rising into the sky. But this is only a small part of how melted magma ascends from the Earth's mantle to the surface.

Even the largest volcanoes on Earth, like the Mauna Loa in Hawaii, are tiny compared to the volumes of volcanic material that has been emplaced in so called Large Igneous Provinces (LIP). These are areas in the Earth's crust where large amounts of magma have been expelled. For example, during the opening of the North Atlantic a LIP developed. It was characterized by fissure eruptions (Figure 1A,B) that were hundreds of kilometres long and fed lava flows that were tens of meters thick and travelled for tens of kilometres.

These fissure eruptions spewed out so much lava that the rim of the North Atlantic was covered by a 12-km-thick layer of lava over a length of 3,000 kilometres. Nothing remotely similar has happened in the last 55 million years and yet

the associated global warming is still the most recent analogue to man-made warming today.

A magmatic Large Igneous Province hidden in the North Atlantic

Like an iceberg, the enormous fissure eruptions were only the tiny surface expression of magma movements in the sedimentary basins beneath the ocean floor around the North Atlantic. The rising magma behaved like a projectile travelling through the air when it hits the water: it drastically slowed down due to the change of environment.

When the magma entered the base of the North Atlantic sedimentary basin some 10 km below the seabed, there was a comparable loss of speed and destructive power. Instead of rising vertically through the sediment to the surface, the magma was forced horizontally through thousands of layers of sediments of varying strength.

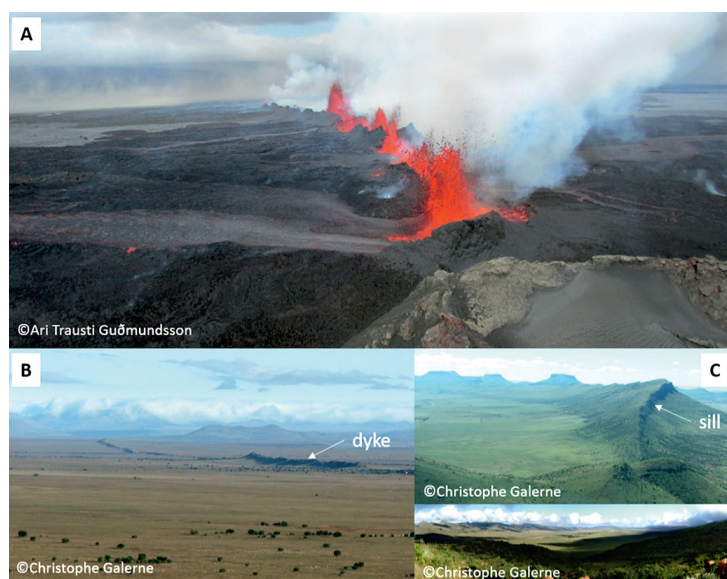


Figure 1: A) Surface expression of a fissure eruption. B) Cooled magma pathway preserved in a sedimentary basin. At the time of the eruption, the magma came to the surface through a vertical gap or fissure now filled with cooled magma (i.e. dyke). C) Example of a 20 kilometre across and 100–150 m thick horizontal intrusion (sill) from South Africa (Galerne et al., 2008). This sill is shaped like a saucer. This geometry is often observed in sedimentary basins worldwide (C-top: aerial view; C-bottom: ground view). **Photo A:** Ari Trausti Guðmundsson, geophysicist and documentarist/filmmaker. **Photos B-C:** Christophe Galerne, geologist and petrophysicist.

Eventually, all the hydraulic fracturing power was lost and the heat loss was too great to keep the magma fluidized. The rock layers resulting from the magma crystallization are called sills (Figure 1C) and can be studied everywhere around the North Atlantic. Thousands of these events occurred in the sedimentary basins before one fracture eventually broke through the surface and created the fissure eruptions.

How can one take a look at such a magma plumbing system?

By sending and receiving seismic pulses, we can visualize the magma plumbing systems underneath the Earth's surface. Oceanic surveys indicate that frozen magma plumbing systems are common in sedimentary basins worldwide. Such a seismic campaign led by GEOMAR Helmholtz Center for Ocean Research Kiel has recently mapped an active magma plumbing system in formation in the Gulf of California (Berndt et al., 2006). Although it is much smaller than the magma systems of the North Atlantic, South African, Indian, and Siberian LIPs, the seismic images can tell us what happened during those exceptional periods of volcanism.

The geological recipe for a mass extinction

Although these large magmatic plumbing systems do not affect directly the surface, they trigger a chain reaction that can lead to long-lasting catastrophic events for the oceans, atmosphere, and biosphere (Eldholm & Thomas, 1993).

As the magma cools down, the heat dissipates into the sedimentary surroundings. Here, it kick-starts a process called hydrothermalism. As sedimentary basins are the largest geological carbon storage on Earth (Jones et al., 2016), prematurely warming these reservoirs can remobilize and emit large amounts of trapped carbon through violent degassing.

Like anthropogenic activity today, magma emplacement in organic-rich sedimentary basin can put off balance the natural carbon cycle of the atmosphere and oceans. We now know that 150 years of fossil fuel used to power human activity equates to about a 2°C average global temperature rise.

55 Million years ago, a similar amount of greenhouse gases (2,000–12,000 Gt) was released by the magmatic activity in basins offshore Norway,

leading to a dramatic global temperature rise of 6–8° Celsius (Svensen et al., 2004).

Further back in geological time, a magmatic event occurred in a basin that constitutes most of today's South Africa and caused the release of more than 10 times the total anthropogenic emissions since the beginning of the industrial revolution (Galerne & Hasenclever, 2019). Our computer simulations indicate that degassing rates might have been five orders of magnitude (10⁵ = 100,000) greater than the annual anthropogenic emissions.

Older and greater still, large volumes of magmatic intrusions were emplaced into the sediments of what would later become the Central Atlantic Ocean (201 million years) and the Tunguska Basin in Siberia (252 million years). These two magmatic events are the only plausible and quantifiable causes for two of the most devastating mass extinctions on Earth (Jones et al., 2006).

Better understanding the past is a window to the future

This type of volcanism with almost no surface expression is a hidden killer, buried in the strata of time. Volcanoes erupt every day on Earth, emitting nauseous sulphur, among other things, and yet they do not significantly disturb the natural carbon cycle. Even the largest eruptions in historical times like that of Mt. Pinatubo (1991) only changed the world's climate for a few months.

In contrast, the large quantities of greenhouse gas emitted by large-scale magmatic intrusions into sedimentary basins coincide with large-scale mass extinction on Earth. A better understanding these crises, their triggers and tipping points can help us to better predict the effects and long-term consequences of anthropogenic global warming.

References

- Berndt, C., Hensen, C., Mortera-Gutierrez, C., Sarkar, S., Geilbert, S., Schmidt, M., ... Lizarralde, D. (2016). Rifting under steam – How rift magmatism triggers methane venting from sedimentary basins. *Geology*, 44(9), 767-770. doi:10.1130/G38049.1
- Eldholm, O., & Thomas, E. (1993). Environmental-Impact of Volcanic Margin Formation. *Earth and Planetary Science Letters*, 117(3-4), 319-329. doi:10.1016/0012-821X(93)90087-P
- Galerne, C. Y. & Hasenclever, J. (2019). Distinct degassing pulses during magma invasion in the stratified Karoo Basin – New insights from hydrothermal fluid flow modelling. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(6), 2955-2984. doi:10.1029/2018GC008120
- Galerne, C. Y., Neumann, E.-R. & Planke, S. (2008). Emplacement Mechanisms of Sill Complexes: Information from the Geochemical Architecture of the Golden Valley Sill Complex, South Africa. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177(2), 425-440. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.06.004
- Jones, M., Jerram, D. A., Svensen, H. & Grove, C. (2016). The effects of large igneous provinces on the global carbon and sulphur cycles. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 441(1), 4-21. doi:10.1016/j.palaeo.2015.06.042
- Svensen, H., Planke, S., Mørche-Sørensen, A., Jamveit, B., Myklebust, R., Eidem, T. R. & Rey, S. S. (2004). Release of methane from a volcanic basin as a mechanism for initial Eocene global warming. *Nature*, 429, 542-545. doi:10.1038/nature02566

Impressum

Herausgeber

Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Telegrafenberg
14473 Potsdam

Redaktion

PD Dr. Dierk Spreen
Jana Kandarr
Oliver Jorzik

Layout

Pia Klinghammer

E-Mail: redaktion-eskp@gfz-potsdam.de

Alle Artikel sind auch im Internet abrufbar:

<https://themenspezial.eskp.de/vulkanismus-und-gesellschaft/inhalt-937231/>

Stand: September 2020

Heft-DOI: doi.org/10.2312/eskp.2020.2

ISBN: 978-3-9816597-3-3

Zitiervorschlag:

Jorzik, O., Kandarr, J., Klinghammer, P. & Spreen, D. (Hrsg.). (2020). *ESKP-Themenspezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination*. Potsdam: Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi:10.2312/eskp.2020.2

Einzelartikel:

[Autor*innen]. (2020). [Beitragstitel]. In O. Jorzik, J. Kandarr, P. Klinghammer & D. Spreen (Hrsg.), *ESKP-Themenspezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination* ([Seitenzahlen]). Potsdam: Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi:[DOI-Nr.]

Die Verantwortung für die Inhalte der Einzelbeiträge der vorliegenden Publikation liegt bei den jeweiligen Autorinnen und Autoren.

Empfehlungen zum Verhalten an aktiven Vulkanen, Vulkaninfos für Reisende usw. sind nach bestem Wissen entwickelt worden. Dennoch können das GFZ sowie andere beteiligte Zentren oder Institutionen nicht verantwortlich gemacht werden und keinerlei Haftung für Schäden übernehmen, die durch die Beachtung dieser Hinweise entstehen. Das Gleiche gilt für die zu dieser Publikation beitragenden Autorinnen und Autoren oder in dieser Publikation zitierte Personen.



Text, Fotos und Grafiken soweit nicht andere Lizenzen betroffen:
[eskp.de | CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)