



lectures and posters & excursions stops



Geologie & Paläontologie
Studienzentrum Naturkunde
Universalmuseum Joanneum

ALAS
ALAS KLÖCH

Raiffeisenbank
Region Fehring



SONNEN
SPEICHER SÜD

joanneum verein
Geologie & Paläontologie

Commission on
Monogenetic Volcanism



Basalt 2025 in Kapfenstein in the Steirisches Vulkanland

Kapfenstein, Styria, Austria

28 September – 2 October 2025

Following the successful Basalt meetings in Görlitz (2013) and Kadan (2017), Basalt 2025 will also address Cenozoic magmatism throughout Europe from a multifaceted perspective across all relevant geoscience disciplines. In addition to facilitating expert exchanges, we aim to make these topics accessible to the general public through accessible presentations. The goal is to present new discoveries, insights, and developments for the understanding and social relevance of this important period in European geological history.

The Steirisches Vulkanland is located in the southeast of Austria in the center of Europe. The foundation stone for the Steirisches Vulkanland was laid with the vision of transforming the (former) border region into an innovative and livable region. In 1999, the association for the promotion of the Steirisches Vulkanland was founded, and with it the name “Vulkanland” was officially adopted. The decision behind this is to bundle all activities in the region and make them visible using the regional brand “Steirisches Vulkanland”. With the vision of human, ecological and economic sustainability, the Styrian Volcanic Land is on the way to becoming the most livable region in Europe.

Since 2022, making geology and volcanism visible has been a focus of regional projects supported by the federal government, the state and the European Union.

As the organizer of the conference, I would like to take this opportunity to sincerely thank the municipality of Kapfenstein (Mayor Ferdinand Groß and his team) and the Steirisches Vulkanland (Chairman Mayor Prof. Ing. Josef Ober) for the opportunity to host the event and for their support. Several sponsors (see logos) have made it possible for us to offer this meeting at a particularly reasonable price – a huge thank you for that! Special thanks go to the core organizing team: Anna Knaus-Maurer, Christine Kant and Tanja Gradwohl.

Ingomar Fritz

Universalmuseum Joanneum
Geologie & Paläontologie
Weinzöttlstrasse 16
A-8045 Graz
ingomar.fritz@museum-joanneum.at



Olivin in Salmanazar (9 L)

Meeting schedule

28. Sept	8330 Feldbach, Rathausplatz 1		
	"Come together" in the Rathaus	18:30 - 21:00	
29. Sept.	Transfer to Kapfenstein*	from 08:15	Departure locations and times will be announced
	8353 Kapfenstein, 123 - community center		
	Welcome and opening	09:00 - 09:15	
	Lectures	09:15 - 09:30	Josef Ober <i>Presentation of the Steirisches Vulkanland</i>
		09:30 - 10:00	Martin Gross The Styrian Basin
		10:00 - 10:30	Ingomar Fritz Volcanic Remnants in the Styrian Basin – what do we see?
		10:30 - 11:00	Coffee break
		11:00 - 11:30	Robert Scholger et al. Paleomagnetic results from Pliocene basalts in Styria (Austria) indicate intermediate field directions recorded during the Matuyama chron
		11:30 - 12:00	Vladislav Rapprich et al. Submarine volcanism associated with incipient rifting on the Gondwanan periphery – Silurian volcanic rocks of the Prague Basin
	Poster presentation	12:00 - 12:30	Martin Kasing et al. Almost eroded but still there: Oldest diatreme volcanoes of pre-Quaternary age in the eastern Bohemian Massif, Czechia
			Tomáš Magna et al. Contrasting lithium isotope signature during weathering of submarine ocean island basalts and mid-ocean ridge basalts
			Stephan Karl The Exploitation of Trachyandesite in Roman Times – Millstone Quarries at the Gleichenberger Kogel, Styria (Austria)
			Robert Scholger et al. Geophysical prospection of the Pliocene volcanic massif Königsberg-Klöch in Southeast Styria (Austria)
			Anna Knaus-Maurer et al. "The regional rock box" - a networked school project in the Steirisches Vulkanland
	Lunch	12:30 - 13:30	
	Lectures	13:30 - 14:00	John M. Hora et al. A clue to the origin of the Common Mantle Reservoir? Unaltered minerals from Teschenite Association Rocks provide a snapshot of Early Cretaceous mantle isotopic compositions beneath the northern margin of the Tethys

	Guided hike Kapfensteiner Kogel	14:00 - 14:30	Kai-Uwe Hess et al.	Limits of imitation: volatile loss in lunar mare simulants and fresh volcanic analogues
		14:30 - 15:00	Olaf Tietz et al.	Pre-rift diatremes in the Lusatian volcanic field: Mapping of two complex volcanic structures provides first data on the Campanian-Maastrichtian paleogeography of the northern Bohemian Massif
		15:00 – 15:30	Jakub Jirásek	Rare accessory minerals bound to the latest stage of the ijolite and turjaite (ex silico-carbonatite?) crystallization from the Cenozoic Podhorní vrch Hill volcano (Czechia)
		15:30 - 16:00	Maria Heinrich	Do rocks make the wine?
		16:00 - 18:30	Ingomar Fritz Maria Heinrich	Museum Geo-Info Kapfenstein and part of the Geotrail Kapfenstein Visit to the exhibition <i>Struktur und Textur - Skulpturen aus Stein</i> (Maria Heinrich & Gerhard Koch) in the "Langen Keller", Weingut Winkler-Hermaden.
30. Sept.	Dinner at the Kapfensteinerhof, Kapfenstein (then transfer)	18:30 - 20:00		
	Transfer to Kapfenstein*	from 08:15		Departure locations and times will be announced
	8353 Kapfenstein, 123 - community center			
	Lectures	08:45 - 09:15	Kai-Uwe Hess et al.	Cooling rates of lunar orange glass beads
		09:15 - 09:45	Froukje M. van der Zwan et al.	Magmatic processes in distributed basalt volcanism at the young intraplate Harrat volcanoes, Saudi Arabia
		09:45 - 10:15	Károly Németh et al.	Basalts of the harrats as heritage stone for Saudi Arabia
		10:15 - 10:45	Coffee break	
		10:45 - 11:15	Károly Németh et al.	The role of geoheritage and geodiversity of Saudi Arabia in the light of sustainable development and natural resource management within geosystem services concept
		11:15 - 11:45	Mathias Steinbichler et al.	GeoSphere Maps and other public available geological data in the Vulkanland
	Lunch at Gasthof Höfler, Kapfenstein	12:00 - 13:00		
	Fieldtrip Steirisches Vulkanland (Northern part)	13:00 - 18:00		Clay pit Mataschen - Basalt quarry Steinberg / Feldbach - Riegersburg - Altenmarkt /Riegersburg
	Dinner (cold) at the Buschenschank Bernhart in Riegersburg (then transfer)	18:00 - 20:00		

1. Oct.	Transfer to Kapfenstein*	from 08:15	Departure locations and times will be announced
	8353 Kapfenstein, 123 - community center	08:45 - 09:15	Vladislav Rappich et al. Recurrent growth of maar-hosted pyroclastic cone – case of Pleistocene Bažina maar, Western Bohemia
		09:15 - 09:45	Mátyás Hencz et al. Paleogeographic control on eruption style changes in a Miocene maar-diatreme: rock componentry analysis and detailed field work (Bakony-Balaton Highland Volcanic Field, Hungary)
		09:45 - 10:15	Robert Scholger et al. Geophysical prospection of the Pliocene volcanic massif Königsberg-Klöch in Southeast Styria (Austria)
		10:15 - 10:45	Coffee break
		10:45 - 11:15	Heimo Ecker-Eckhofen Energy project Weitendorf quarry
		11:15 - 11:45	Ioan Seghedi et al. Changing eruption styles of Pliocene Klöch monogenetic volcanic field in south eastern Austria, Styrian basin
	Lunch at Gasthof Höfler, Kapfenstein	12:00 - 13:00	
	Fieldtrip Steirisches Vulkanland (Southern part)	13:00 - 18:00	Stradnerkogel (basalt quarry) - Königsberg-Klöcher volcanic field
	Galadinner in Schloss Kapfenstein (then transfer)	18:00 - 21:00	
2. Oct.	Fieldtrip Steirisches Vulkanland - off/on Graz, (off/on Feldbach)	08:00 (09:00) - 17:00 (18:00)	Riegersburg (point of view) - Steinberg / Feldbach (former basalt quarry "Ostbruch") - Burgfeld / Fehring (former clay pit) - Kapfenstein (museum - lunch break) - St. Anna am Aigen (point of view) – Stradnerkogel (basalt quarry) - Klöch (basalt quarry) - Weitendorf (basalt quarry)

(possibility of transfer to the main station and airport in Graz)

* We offer a daily transfer from a central location of the accommodation to the conference venue in Kapfenstein, which will be coordinated with the participants.

Table of contents

Meeting schedule	1
ABSTRACTS (ENGLISH AND GERMAN)	7
Energy project Weitendorf quarry	7
Heimo Ecker-Eckhofen	7
Volcanic Remnants in the Styrian Basin – what do we see?	10
Ingomar Fritz	10
The Styrian Basin	12
Martin Gross	12
Do rocks make the wine?	16
Maria Heinrich	16
Paleogeographic control on eruption style changes in a Miocene maar-diatreme: rock componentry analysis and detailed field work (Bakony-Balaton Highland Volcanic Field, Hungary)	18
Mátyás Hencz ¹ , Károly Németh ^{1,2,3} , Tamás Spránitz ¹ , Tamás Biró ⁴ , Dávid Karátson ⁴ , Márta Berkesi ¹	18
A clue to the origin of the Common Mantle Reservoir? Unaltered minerals from Teschenite Association Rocks provide a snapshot of Early Cretaceous mantle isotopic compositions beneath the northern margin of the Tethys	21
John M. Hora ¹ , Vladislav Rappich ¹ , Jakub Jirásek ² , Jitka Míková ¹ , Zuzana Čvančarová ¹ , Dalibor Matýšek ³ , Zsolt Benkó ^{4,5} , Kata Molnár ⁴	21
Cooling rates of lunar orange glass beads	25
Hejiu Hui ¹ , Kai-Uwe Hess ² , Youxue Zhang ³ , Alexander R.L. Nichols ⁴ , Anne H. Peslier ⁵ , Rebecca A. Lange ³ , Donald B. Dingwell ² , Clive R. Neal ⁶	25
Rare accessory minerals bound to the latest stage of the ijolite and turjaite (ex silico- carbonatite?) crystallization from the Cenozoic Podhorní vrch Hill volcano (Czechia)	27
Jakub Jirásek ¹ , Dalibor Matýšek ² and Ondřej Pour ^{1,3}	27
The Exploitation of Trachyandesite in Roman Times – Millstone Quarries at the Gleichenberger Kogel, Styria (Austria)	29
Stephan Karl	30
Almost eroded but still there: Oldest diatreme volcanoes of pre-Quaternary age in the eastern Bohemian Massif, Czechia	32
Martin Kašing ¹ , Jakub Jirásek, Dalibor Matýšek, Jan Valenta, Petr Tábořík, Vladislav Rappich, Tomáš Pek	32
Contrasting lithium isotope signature during weathering of submarine ocean island basalts and mid-ocean ridge basalts	33
Tomáš Magna ¹ , Vladislav Rappich ¹ , Jakub Jirásek ² , Dalibor Matýšek ³ , Michaela Vašinová Galiová ⁴ , Julia Neukampf ⁵	34
"The Regional rock box" - a networked school project in the Steirisches Vulkanland	35
Anna Knaus-Maurer ¹ & Ingomar Fritz ²	36

The role of geoheritage and geodiversity of Saudi Arabia in the light of sustainable development and natural resource management within geosystem services concept	38
Károly Németh ^{1,2} , Mohammed Rashad Moufti ¹ , Turki Sehli ¹	38
Basalts of the harrats as heritage stone for Saudi Arabia	43
Károly Németh ^{1,2,3,4} , Mohammed Rashad Moufti ¹ , Turki Sehli ¹ , Iyaed Zalmout ¹ , Yahya Mufarreh ¹ , and Abdulrahman Sowaigh ¹	43
Recurrent growth of maar-hosted pyroclastic cone – case of Pleistocene Bažina maar, Western Bohemia	47
Vladislav Rapprich ¹ , Zsolt Benkó ² , Jan Hošek ¹ , Tomáš Magna ¹ , Ondřej Pour ¹ , Zuzana Čvančarová ¹ , Stuart Thomson ³ , Pavla Hrubcová ⁴ , Tomáš Fischer ⁵	47
Geophysical prospection of the Pliocene volcanic massif Königsberg-Klöch in Southeast Styria (Austria)	49
Robert Scholger ¹ , Ingomar Fritz ² , Otto Nell ³	49
Paleomagnetic results from Pliocene basalts in Styria (Austria) indicate intermediate field directions recorded during the Matuyama chron	51
Robert Scholger ¹ , Elisabeth Schnepf ¹ , Ingomar Fritz ²	51
Changing eruption styles of Pliocene Klöch monogenetic volcanic field in south eastern Austria, Styrian basin	53
Ingomar Fritz ¹ , Ioan Seghedi ²	53
GeoSphere Maps and other public available geological data in the Vulkanland	55
Mathias Steinbichler, Isabella Bayer, Gerit Griesmeier, Viktoria Haide, Esther Hintersberger, Hans-Georg Krenmayr, Otto Kreuz, Martin Schiegl, Werner Stöckl	55
Limits of imitation: volatile loss in lunar mare simulants and fresh volcanic analogues	57
Jennifer Sutherland ^{1,2} , Kai-Uwe Hess ¹ , Thilo Bissbort ¹ , Simon Stapperfend ³ , Axel Müller ⁴ , Thomas C. Hansen ² , Alexander Rack ⁵ , Donald B. Dingwell ¹	57
Submarine volcanism associated with incipient rifting on the Gondwanan periphery – Silurian volcanic rocks of the Prague Basin	59
Zuzana Tasáryová ¹ , Vladislav Rapprich ¹ , Tomáš Magna ¹ , Vojtěch Janoušek ¹ , Ondřej Pour ¹	59
Pre-rift diatremes in the Lusatian volcanic field: Mapping of two complex volcanic structures provides first data on the Campanian-Maastrichtian paleogeography of the northern Bohemian Massif	61
Olaf Tietz ¹ , Jörg Büchner ¹ , Erik Wenger ¹ , Roland Nádaskay ² , Johannes Zieger ³	61
Magmatic processes in distributed basalt volcanism at the young intraplate Harrat volcanoes, Saudi Arabia	65
Froukje M. van der Zwan, S. Beatrice Jägerup, Evelyn R. Garcia Paredes, Om P. Pandey, Jörg Follmann, Murtadha Y. Al Malallah, Konstaninos Thomaidis, Ivana Zivadinovic, Valentin R. Troll, Thor H. Hansteen	65
EXCURSIONS TO THE VOLCANIC REMNANTS IN THE STYRIAN BASIN	66
The Styrian Basin – Regional geological setting	68
The pre-Neogene basement	70
The Neogene of the Styrian Basin	72
Visualizations of landscape changes in the Miocene of the Styrian Basin	73

Volcanic remnants in the “Steirisches Vulkanland”	75
Excursion stops	77
Stop 1 – Geotrail Kapfenstein	78
Stop 2 – Claypit Matschen	80
Stop 3 – Quarry Steinberg	82
Stop 4 – Riegersburg	84
Stop 5 – Altenmarkt / Riegersburg	87
Stop 6 – Quarry Hochstraden.....	89
Stop 7 – Quarry Klösch.....	90
Stop 8 – Zaraberg.....	94
Stop 9 – Königsberg / Tieschen	94
Stop 10 – Riegersburg (Winery Eibel at Starzenberg).....	94
Stop 11 – “Ostbruch” Steinberg / Feldbach.....	95
Stop 12 – Burgfeld	97
Stop 13 – Museum Geo-Info Kapfenstein.....	101
Stop 14 – St. Anna am Aigen	102
Stop 15 – Quarry Weitendorf.....	103
For further reading	104
List of figures	109



ABSTRACTS (ENGLISH AND GERMAN)

Energy project Weitendorf quarry

Heimo Ecker-Eckhofen

Wärmespeicher Weitendorf Gmbh, Franz-Heresch-Straße 1, 840 Wildon, Austria

General

The Sonnenspeicher Süd project is a flagship initiative for the decarbonisation of district heating in Graz, Austria's second largest city. Located in a still operated basalt quarry of Wildon/Weitendorf, approximately 20 km south of Graz, the project combines a large-scale seasonal thermal energy storage (TES) system with renewable heat sources. The repurposed quarry will hold a 1.5 million m³ water reservoir, supplied by 62 hectares total (25 ha net) of solar thermal collectors, supported by biomass boilers and heat pumps, delivering up to 400 GWh annually to the district heating grid. This makes the facility the largest seasonal storage project of its kind worldwide, with replication potential across Europe.

Geological and Hydrogeological Setting

The site is characterised by a Miocene shoshonitic basalt body, part of a volcanic edifice formed in the Styrian Basin. This basalt overlies fossil-rich marls and is further covered by Quaternary gravels of the Kainach valley. Investigations conducted in 2023, including boreholes, confirmed the basalt's thickness and the presence of fossil-bearing marls. The Kainach aquifer was identified as the dominant hydrogeological system, with hydraulic conductivities around 5×10^{-4} m/s and groundwater fluctuations up to 2.5 m. Flow direction is predominantly towards the southeast. The hydrogeological model of 2024 integrates these findings and supports the design of sealing measures to prevent interaction between the reservoir and groundwater.

Thermal conditions were also investigated, with groundwater temperatures stabilising at around 10-12 °C. These parameters form the baseline for assessing thermal impacts during storage operation. Thermophysical properties of the basalt, marl, and sediments were determined according to VDI 4640 guidelines and integrated into the numerical modelling of heat storage efficiency.

Geophysics

Geoelectric surveys conducted in 2023 (Profiles 1-6) and historic geomagnetic data from 1975, later updated with overlays on 2018 aerial imagery, delineated the geometry of the basalt body and aquifer boundaries. Resistivity anomalies correspond well with borehole lithologies, confirming the reliability of the models. While compact basalt appears as high resistivity zones, weathered or water-bearing basalt is expressed as low-resistivity features. These datasets together allow precise 3D geological interpretation.

Geochemistry

Geochemical leaching experiments were conducted on basalt and marl samples under hydrothermal conditions (95 °C, up to 8 weeks) and compared with room temperature controls. Results indicated limited mobilisation of major and trace elements. Calcite precipitation occurred consistently, leading to reduced calcium concentrations and stabilisation of alkalinity. Moderate increases in Na, K, Mg, Si, Sr, and Li were observed, whereas As and V showed only minor variations. Fossil stability tests demonstrated that carbonate fossils, such as molluscs, remain structurally intact under simulated storage conditions, with only surface coatings forming.

Geomechanics

Stability analyses carried out in 2024 identified potential risks in the southwest slopes, particularly under groundwater influence. Without countermeasures, safety factors could drop

below acceptable thresholds. Mitigation measures include flattening of slopes, construction of berms at 10 m intervals, and the implementation of a lamella sealing wall around the reservoir perimeter. Laboratory tests on representative samples determined strength parameters for basalt ($\varphi \approx 48^\circ$, $c \approx 133$ kPa), marls ($\varphi \approx 28^\circ$, $c \approx 5\text{-}15$ kPa), and Quaternary sediments ($\varphi \approx 35^\circ$, $c \approx 15$ kPa). The integration of geotechnical design with geological and hydrogeological models ensures long-term stability of the reservoir, even under fluctuating groundwater conditions and thermal loads associated with seasonal storage cycles.

Next Steps

The immediate tasks include finalising the geotechnical design, constructing the lamella wall, and implementing monitoring systems for groundwater, slope stability, and geochemistry. Environmental permitting is in progress. Upon approval, construction is scheduled to begin, with commissioning planned thereafter. With its unique scale and integration of multiple renewable sources, Sonnenspeicher Süd provides a replicable model for transitioning European district heating systems from fossil fuels to sustainable energy.

Corresponding author: heimo@ecker-eckhofen.com

Sonnenspeicher Süd

Allgemein

Das Projekt Sonnenspeicher Süd ist eine Leuchtturminitiative für die Dekarbonisierung der Fernwärme in Graz, der zweitgrößten Stadt Österreichs. Das Projekt befindet sich in einem noch in Betrieb befindlichen Basaltsteinbruch in Wildon/Weitendorf, ca. 20 km südlich von Graz, und kombiniert ein großflächiges saisonales thermisches Energiespeichersystem (TES) mit erneuerbaren Wärmequellen. Der umfunktionierte Steinbruch wird über ein Wasserreservoir von 1,5 Mio. m³ verfügen, das von insgesamt 62 Hektar (25 ha netto) solarthermischen Kollektoren gespeist wird, die von Biomassekesseln und Wärmepumpen unterstützt werden und jährlich bis zu 400 GWh (ca. 1/3 des Gesamtbedarfs) in das Fernwärmenetz einspeisen. Damit ist die Anlage das größte saisonale Speicherprojekt seiner Art weltweit, mit Replikationspotenzial in ganz Europa.

Geologisches und hydrogeologisches Umfeld

Der Standort ist geprägt von einem miozänen Shoshonitischen Basaltkörper, der Teil eines im Steirischen Becken entstandenen Vulkangebildes ist. Dieser Basalt liegt über fossilreichen Mergeln und wird zusätzlich von quartären Kiesen des Kainachtals bedeckt. Im Jahr 2023 durchgeführte Untersuchungen, einschließlich Bohrungen, bestätigten die Mächtigkeit des Basalts und das Vorhandensein von fossilhaltigen Mergeln. Der Kainach-Aquifer wurde als dominierendes hydrogeologisches System identifiziert, mit hydraulischen Leitfähigkeiten von etwa 5×10^{-4} m/s und Grundwasserschwankungen von bis zu 2,5 m. Die Fließrichtung ist überwiegend in Richtung Südosten. Das hydrogeologische Modell des Jahres 2024 integriert diese Erkenntnisse und unterstützt die Gestaltung von Abdichtungsmaßnahmen, um Wechselwirkungen zwischen Stausee und Grundwasser zu verhindern.

Auch die thermischen Bedingungen wurden untersucht. Diese Parameter bilden die Grundlage für die Bewertung der thermischen Auswirkungen während des Speicherbetriebs. Die thermophysikalischen Eigenschaften des Basalts, des Mergels und der Sedimente wurden nach den Richtlinien der VDI 4640 ermittelt und in die numerische Modellierung des Wärmespeicherwirkungsgrads integriert.

Geophysik

Geoelektrische Untersuchungen, die im Jahr 2023 durchgeführt wurden, und historische geomagnetische Daten aus dem Jahr 1975, die später mit Überlagerungen von Luftbildern aus dem Jahr 2018 aktualisiert wurden, zeigten die Geometrie des Basaltkörpers und der

Grenzen des Grundwasserleiters. Die Widerstandsanomalien stimmen gut mit den Bohrlochlithologien überein, was die Zuverlässigkeit der Modelle bestätigt. Während kompakter Basalt als Zonen mit hohem Widerstand auftritt, wird verwitterter oder wasserführender Basalt als Merkmale mit niedrigem Widerstand ausgedrückt. Zusammen ermöglichen diese Datensätze eine präzise geologische 3D-Interpretation.

Geochemie

Geochemische Laugungsexperimente wurden an Basalt- und Mergelproben unter hydrothermalen Bedingungen (95 °C, bis zu 8 Wochen) durchgeführt und mit Raumtemperaturkontrollen verglichen. Die Ergebnisse deuteten auf eine begrenzte Mobilisierung von Haupt- und Spurenelementen hin. Die Calcitausfällung trat konsequent auf, was zu einer Verringerung der Kalziumkonzentrationen und einer Stabilisierung der Alkalinität führte. Es wurden moderate Erhöhungen von Na, K, Mg, Si, Sr und Li beobachtet, während As und V nur geringe Schwankungen aufwiesen. Fossile Stabilitätstests zeigten, dass Karbonatfossilien, wie z. B. Weichtiere, unter simulierten Lagerbedingungen strukturell intakt bleiben und sich nur Oberflächenbeschichtungen bilden.

Geomechanik

Stabilitätsanalysen, die im Jahr 2024 durchgeführt wurden, identifizierten potenzielle Risiken in den Südwesthängen, insbesondere unter Grundwassereinfluss. Ohne Gegenmaßnahmen könnten die Sicherheitsfaktoren unter akzeptable Schwellenwerte fallen. Zu den Minderungsmaßnahmen gehören die Abflachung von Böschungen, der Bau von Bermen im Abstand von 10 m und die Implementierung einer Lamellendichtwand um den Stauseeumfang. Laboruntersuchungen an repräsentativen Proben ermittelten Festigkeitsparameter für Basalt ($\phi \approx 48^\circ$, $c \approx 133$ kPa), Mergel ($\phi \approx 28^\circ$, $c \approx 5\text{--}15$ kPa) und quartäre Sedimente ($\phi \approx 35^\circ$, $c \approx 15$ kPa).

Die Integration der geotechnischen Planung mit geologischen und hydrogeologischen Modellen gewährleistet die Langzeitstabilität des Speichers, auch bei schwankenden Grundwasserbedingungen und thermischen Lasten, die mit saisonalen Speicherzyklen verbunden sind.

Nächste Schritte

Zu den unmittelbaren Aufgaben gehören die Fertigstellung der geotechnischen Planung, der Bau der Lamellenwand und die Implementierung von Überwachungssystemen für Grundwasser, Hangstabilität und Geochemie. Die Umweltgenehmigung ist im Gange. Nach der Genehmigung soll mit dem Bau begonnen werden, die Inbetriebnahme ist danach für 2028/2029 geplant. Mit seiner einzigartigen Größe und der Integration mehrerer erneuerbarer Quellen bietet der Sonnenspeicher Süd ein replizierbares Modell für den Übergang der europäischen Fernwärmesysteme von fossilen Brennstoffen zu nachhaltiger Energie unter Umwandlung einer bestehenden künstlichen geologischen Formation.

Volcanic Remnants in the Styrian Basin – what do we see?

Ingomar Fritz

Universalmuseum Joanneum, Abteilung für Geologie und Paläontologie, Weinzöttlstraße 16, 8045 Graz, Austria

Most of the volcanic remnants are located in the „Steirisches Vulkanland“ and the adjacent eastern region, but there are also traces of volcanic activity in the western part of the Styrian Basin and an isolated occurrence in the Lavanttal (Carinthia). The “Steirisches Vulkanland” comprises an economic region and trademark in Eastern Styria, Austria. The name also contains the specific geological history of the region, which gives the landscape its special character. Starting in the 19th century several authors mapped the region and Winkler-Hermaden published the first comprehensive paper about the volcanism of the region (Winkler 1913). Modern geological and geophysical investigations, e.g. in the volcanic field near Fehring and in Klöch, focus on the younger volcanic successions (summarized in Gross et al. 2007, Schnepf et al. 2021).

The Styrian Basin was filled up by marine, limnic and fluvial sediments (carbonates, clay, silt, sand and gravel) in the Miocene. Today's morphology of the region is characterized by the remnants of two volcanic phases in the Neogene. While the ascent of andesitic magmas produced a voluminous volcanic system (a basin with about 30 km diameter is postulated) in the Middle Miocene, a second volcanic phase produced basalts and their explosive variations in Plio-/ Pleistocene times. Several maar-diatreme volcanoes were formed and of course the lithology documents a very dynamic history. The volcanic rocks (basalt, variations of tuff) are more resistant against weathering than the unconsolidated sedimentary rocks. Therefore the exposed volcanic remnants show different stages of development of diatremes, maar-lakes, scoria cones, intrusions, lava lakes and rarely lava flows.

Tourism is economically important for the region and many tourists are interested on the volcanic history. Geotourism is in the early stages of development. Up to now a geotrail was arranged in Kapfenstein as a “path through a volcano” and based on the regional rock – collection of Prof. Winkler-Hermaden a small museum was installed in the community center of Kapfenstein. A project focusing on volcanism and regional geology is currently being implemented. The aim is to create general intelligible information of the regional geology, to integrate outcrops with “speaking rocks” in the existing network of rambling trails and to establish localities for information and communication between science, schools, tourism organisations, companies of raw material economy or agriculture (e.g. winegrowers) and all persons who are interested on the geological fundament of the “Steirisches Vulkanland”.

References

- Gross, M., Fritz, I., Harzhauser, M., Hubmann, B., Moser, B., Piller, W.E. Soliman, A., Suttner, T.J. & Bojar, H-P. (2007): The Neogene of the Styrian Basin – Guide to Excursions.- Joannea Geologie und Paläontologie, 9: 117-193, Graz.
- Schnepf, E., Arneitz, P., Ganerød, M., Scholger, R., Fritz, I., Egli, R., & Leonhardt, R. (2021): Intermediate field directions recorded in Pliocene basalts in Styria (Austria): evidence for cryptochron C2r.2r-1. Earth Planets Space, 73, 182 (2021).
<https://doi.org/10.1186/s40623-021-01518-w>
- Winkler, A. (1913): Das Eruptivgebiet von Gleichenberg in Oststeiermark. – Jahrbuch der Geologischen Reichsanstalt, 63: 403-502, Wien.

Reste von Vulkanen im Steirischen Becken – was sehen wir?

Die meisten vulkanischen Überreste befinden sich im „Steirischen Vulkanland“, aber auch in der östlich angrenzenden Region und im westlichen Teil des Steirischen Beckens sowie in einem isolierten Vorkommen im Lavanttal (Kärnten) findet man Spuren vulkanischer Aktivität. Das „Steirische Vulkanland“ ist eine Wirtschaftsregion und ein Markenzeichen in der Oststeiermark, Österreich. Der Name spiegelt auch die spezifische geologische Geschichte der Region wider, die der Landschaft ihren besonderen Charakter verleiht. Ab dem 19. Jahrhundert kartierten mehrere Autoren dieses Gebiet, Winkler-Hermaden veröffentlichte die erste umfassende Arbeit über den Vulkanismus der Region (Winkler 1913). Jüngere geologische und geophysikalische Bearbeitungen, z.B. im Vulkanfeld bei Fehring und in Klöch, beschäftigen sich mit den plio-/pleistozänen vulkanischen Abfolgen (zusammengefasst in Gross et al. 2007, Schnepf et al. 2021).

Karbonate, Ton, Schluff, Sand und Kies belegen eine marine, limnische und fluviatile Sedimentation im Steirischen Becken im Miozän. Die heutige Morphologie der Region ist durch die Überreste zweier vulkanischer Phasen im Neogen geprägt. Während im mittleren Miozän der Aufstieg andesitischer Magmen ein mächtiges Vulkansystem aufbaute (eine Basis mit etwa 30 km Durchmesser wird angenommen), entstanden in einer zweiten vulkanischen Phase, im Plio-/Pleistozän, Basalte und deren explosive Variationen. In den Gesteinen der zahlreichen Reste von Maar-Diatrem-Vulkanen ist eine dynamische Entstehungsgeschichte dokumentiert. Da diese harten Vulkangesteine (Basalt, Tuffvariationen) verwitterungsbeständiger als die umgebenden weichen Sedimentgesteine sind, bleiben sie erhaben in der Landschaft stehen. Die freigelegten vulkanischen Überreste zeigen unterschiedliche Entwicklungsstadien von Diatremen und belegen ehemalige Maarseen, Schlackenkegel, Intrusionen, Lavaseen sowie selten Lavaströme.

Der Tourismus ist wirtschaftlich bedeutend für die Region und viele Touristen interessieren sich auch für die „feurige Vergangenheit“. Der Geotourismus befindet sich in der Anfangsphase der Entwicklung. Neben einigen thematischen Zugängen (z.B. Gnas, Gniebing, Tieschen) wurde bislang in Kapfenstein ein Geotrail als „Weg durch einen Vulkan“ angelegt und basierend auf der regionalen Gesteinssammlung von Prof. Winkler-Hermaden im Gemeindezentrum von Kapfenstein ein kleines Museum eingerichtet. Ein Projekt („Erlebnis Geologie“) zum Thema Vulkanismus und regionale Geologie wird derzeit umgesetzt. Ziel ist es, allgemein verständliche Informationen zur regionalen Geologie zu erstellen, Aufschlüsse mit „sprechenden Gesteinen“ in das bestehende Wanderwegenetz zu integrieren und Orte der Information und Kommunikation zwischen Wissenschaft, Schulen, Tourismusorganisationen, Unternehmen der Rohstoffwirtschaft oder Landwirtschaft (z. B. Winzer) sowie all jenen Personen zu schaffen, die sich für die geologische Entwicklung des Steirischen Vulkanlandes interessieren.

The Styrian Basin

Martin Gross

Universalmuseum Joanneum, Abteilung für Geologie und Paläontologie, Weinzöttlstraße 16, 8045 Graz, Austria

The Styrian Basin is located at the southeastern margin of the Alps and is part of the Pannonian Basin system. Its northern, western and southwestern borders are formed by metamorphic Austroalpine units and the Graz Paleozoic, and in the northeast by the Güns Mountains (Penninic unit). To the east, the South Burgenland Swell separates the Styrian Basin from the Western Pannonian Basin.

The Styrian Basin is approximately 100 km long, 60 km wide, and basin fill reaches a maximum thickness of up to 4000 m. The Middle Styrian Swell (Sausal Mountain range) divides it into a Western and an Eastern Styrian Basin. In addition, subordinate swells and basement spurs lead to a complex differentiation in several subbasins and embayments.

The basin filling (synrift phase) began in Early Miocene times (Ottangian) with fluvial and limnic sediments in central basin areas (Limnic Series) and with alluvial fan, fluvial, deltaic and limnic deposits at the basin margins (Radl Fm., "Lower" Eibiswald Fm., Köflach-Voitsberg Fm., Naas Beds, Zöbern Fm., Mönichkirchen Fm.).

In the Karpatian increased subsidence and a sea level rise led to the deposition of several hundred metres thick offshore clay- and siltstones (Kreuzkrumpl Fm.). Alluvial/submarine fan, fluvial and deltaic sediments were deposited at marginal basin areas (Sinnertsdorf Fm., Conglomerate-rich Group, Stiroll Fm.). Extensional tectonics were accompanied by volcanic activity (Gleichenberg Volcanics), which continued until the early Badenian. Around the boundary between the Early and Middle Miocene, a global sea level fall and tectonic movements caused block tilting and a significant unconformity ("Styrian Tectonic Phase").

In the early Badenian (onset of the postrift phase), the marine environments reached their greatest extend. While predominantly fine clastics (Marl-Silt-Sand-Gravel) were deposited in the central Eastern Styrian Basin, mixed siliciclastic-carbonatic systems formed on morphologic highs (Kreuzberg Fm., Weißeneck Fm., Tauchen Fm.). Lagoonal deposits (Florian Beds) dominate the central Western Styrian Basin, including basaltic intrusions (Weitendorf Basalt) at the transition to the Eastern Styrian Basin. On the western edges of the Western Styrian Basin, deltaic (Arnfeld Fm., Teichbauer Fm.), limnic-deltaic ("Middle" and "Upper" Eibiswald Fm.), alluvial fan (Schwanberg Fm.), fluvial-limnic (Stallhofen Fm., Rein Fm.) and talus sediments (Eggenberg Fm.) were deposited.

After a marked regression at the Badenian/Sarmatian boundary, sedimentation in the late Middle Miocene (Sarmatian) is characterised by pelitic sediments (Mantscha Fm., Rollsdorf Fm.) or bryozoan-serpulid bioconstructions (Grafenberg Fm.). A regressive event ("Carinthian Phase") caused basin ward progradation of fluvial-deltaic environments (Carinthian Gravel, Gratkorn Fm.), followed by cyclic successions of siliciclastics and carbonates (e.g., silt/sand/oolite; Gleisdorf Fm.) as well as by limnic-fluvial ("Lower" Coal-bearing Beds of Weiz) and alluvial fan (Puch Gravel) deposits at the northern margin of the Eastern Styrian Basin.

The complete isolation of the Central Paratethyan Sea around the Middle/Late Miocene boundary is accompanied by considerable erosion and the formation of Lake Pannon. Repeated changes of limnic-deltaic-fluvial environments determined sedimentation throughout the Late Miocene (Pannonian; lower Pannonian: "Upper" Coal-bearing Beds of Weiz, Puch Gravel, Feldbach Fm., Kleinsemmering Fm., Paldau Fm., Ries Fm.; middle Pannonian: Loipersdorf-Unterlamm Beds, Stegersbach Beds; upper Pannonian:

Oberneuberg Beds, Tabor Gravel, Jennersdorf Beds, Kirchfidisch-Königsberg Freshwater Limestone, Csater-Berg Opalite).

Subsequent basin inversion led to significant erosion and a hiatus (c. 3.5 Ma) until the early Pliocene. Fluvial clastics are observed below or adjacent (Silberberg Gravel) and on top (Postbasaltic Gravel) of alkali basaltic rocks of largely Plio-/Pleistocene age (Basalt and Tuff/Tuffite).

Except for the numerous contributions of Arthur Winkler-Hermaden (e.g., Winkler-Hermaden, 1957), in particular the work of Kollmann (1965), the studies by Kröll et al. (1988), Ebner & Sachsenhofer (1991, 1995) and Sachsenhofer et al. (1997) provide detailed data on the basement and basin filling. Schreilechner & Sachsenhofer (2007) and Dax et al. (2024) present a sequence stratigraphic framework. More recent compilations on the Styrian Basin offer Gross et al. (2007), Berka (2015) and Gross (2022).

References

- Berka, R., 2015: Zur Geologie der großen Beckengebiete des Ostalpenraumes. – Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt, 64: 71-141, Wien.
- Dax, F, Sachsenhofer, R.F., Schreilechner, M.G. & Tari, G., 2024: The Styrian Basin: an overview with new insights from seismic data. – Geological Society, Special Publications, 554, London.
- Ebner, F. & Sachsenhofer, R.F., 1991: Die Entwicklungsgeschichte des Steirischen Tertiärbeckens. – Mitteilungen der Abteilung für Geologie und Paläontologie am Landesmuseum Joanneum, 49: 1-96, Graz.
- Ebner, F. & Sachsenhofer, R.F., 1995: Palaeogeography, subsidence and thermal history of the Neogene Styrian Basin (Pannonian basin system, Austria). – Tectonophysics, 242: 133-150, Amsterdam.
- Gross, M., 2022: Styrian Basin. – Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt, 76: 187-232, Wien.
- Gross, M., Fritz, I., Piller, W.E., Soliman A., Harzhauser, M., Hubmann, B., Moser, B., Scholger, R., Suttner, T.J. & Bojar, H.-P., 2007a: The Neogene of the Styrian Basin - Guide to Excursions. – Joannea Geologie und Paläontologie, 9: 117-193, Graz.
- Kollmann, K., 1965: Jungtertiär im Steirischen Becken. – Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien, 57 (2): 479-632, Wien.
- Kröll, A., Flügel, H.W., Seiberl, W., Weber, F., Walach, G. & Zych, D., 1988: Erläuterungen zu den Karten über den prätertiären Untergrund des Steirischen Beckens und der Südburgenländischen Schwelle. – 49 p., Wien (Geologische Bundesanstalt).
- Sachsenhofer, R.F., Lankreijer, A., Cloetingh, S. & Ebner, F., 1997: Subsidence analysis and quantitative basin modelling in the Styrian Basin (Pannonian Basin System, Austria). – Tectonophysics, 272: 175-196, Amsterdam.
- Schreilechner, M.G. & Sachsenhofer, R.F., 2007: High Resolution Sequence Stratigraphy in the Eastern Styrian Basin (Miocene, Austria). – Austrian Journal of Earth Sciences, 100: 164-184, Wien.
- Winkler-Hermaden, A., 1957: Geologisches Kräftespiel und Landformung. – 822 p., Wien (Springer Verlag).

Corresponding author: martin.gross@museum-joanneum.at

Das Steirische Becken

Das Steirische Becken liegt am südöstlichen Rand der Alpen und ist Teil des Pannonischen Beckensystems. Seine nördlichen, westlichen und südwestlichen Grenzen werden durch metamorphe Ostalpine Einheiten und das Grazer Paläozoikum gebildet, im Nordosten vom Günser Gebirge (Penninikum). Im Osten trennt die Südburgenländische Schwelle das Steirische Becken vom Westpannonischen Becken.

Das Steirische Becken ist etwa 100 km lang, 60 km breit und die Beckenfüllung erreicht eine maximale Mächtigkeit von bis zu 4000 m. Die Mittelsteirische Schwelle (Sausaler Gebirgszug) teilt es in ein West- und Oststeirisches Becken. Untergeordnete Schwellen und Grundgebirgssporne führen zu einer weiteren Differenzierung in mehrere Teilbecken und Buchten.

Die Beckenfüllung (Synrift-Phase) begann im frühen Miozän (Ottangium) mit fluviatilen und limnischen Sedimenten in den zentralen Beckenbereichen (Limnische Serie) und mit Schwemmkegel-, Fluss-, Delta- und See-Ablagerungen an den Beckenrändern (Radl-Formation, „untere“ Eibiswald-Formation, Köflach-Voitsberg-Formation, Schichten von Naas, Zöbern-Formation, Mönichkirchen-Formation).

Im Karpatium führten verstärkte Subsidenz und ein Anstieg des Meeresspiegels zur Ablagerung von mehreren hundert Metern mächtigen, tiefmarinen Ton- und Siltsteinen (Kreuzkrumpl-Formation). Alluviale/submarine Fächer-, Fluss- und Deltaablagerungen wurden an den Randbereichen des Beckens abgelagert (Sinnerndorf-Formation, Konglomeratreiche Gruppe, Stiroll-Formation). Die Extensionstektonik ging mit vulkanischer Aktivität einher (Gleichenberger Vulkanite), die bis zum frühen Badenium andauerte. An der Grenze vom frühen zum mittleren Miozän verursachten ein globaler Meeresspiegelmrückgang und tektonische Bewegungen eine Blockkipfung und eine bedeutende Diskordanz („Steirische Diskordanz“).

Im frühen Badenium (Beginn der Postriftphase) erreichte die marine Bedeckung ihre größte Ausdehnung. Während sich im zentralen Oststeirischen Becken vorwiegend feinklastische Sedimente (Mergel-Silt-Sand-Kies) ablagerten, bildeten sich auf morphologischen Erhebungen gemischte siliziklastisch-karbonatische Systeme (Kreuzberg-Formation, Weißenegg-Formation, Tauchen-Formation). Lagunäre Ablagerungen (Florianer Schichten) dominieren das zentrale Weststeirische Becken, einschließlich basaltischer Intrusionen (Weitendorfer Basalt) am Übergang zum Oststeirischen Becken. An den westlichen Rändern des Weststeirischen Beckens finden sich deltaische (Arnfels-Formation, Teichbauer-Formation), limnisch-deltaische („mittlere“ und „obere“ Eibiswald-Formation), alluviale Fächer (Schwanberg-Formation), fluviatil-limnische (Stallhofen-Formation, Rein-Formation) und Talus-Sedimente (Eggenberg-Formation) abgelagert.

Nach einer deutlichen Regression an der Grenze zwischen Badenium und Sarmatium ist die Sedimentation im späten mittleren Miozän (Sarmatium) durch pelitische Sedimente (Mantscha-Formation, Rollsdorf-Formation) oder Bryozoen-Serpuliden-Biokonstruktionen (Grafenberg-Formation) gekennzeichnet. Ein regressives Ereignis („Carinthische Phase“) bewirkte das Vorrücken von Fluss- und Deltasedimenten (Carinthischer Schotter, Gratkorn-Formation) in Richtung Becken, gefolgt von zyklischen, siliziklastisch-karbonatischen Abfolgen (z. B. Silt/Sand/Oolith; Gleisdorf-Formation) sowie limnisch-fluviatile („untere“ Kohleführende Schichten von Weiz) und alluviale Fächerablagerungen (Pucher Schotter) am nördlichen Rand des Oststeirischen Beckens.

Die vollständige Isolierung des Zentralen Paratethysmeeres an der Grenze zwischen mittlerem und spätem Miozän geht mit erheblicher Erosion und der Bildung des Pannon Sees einher. Wechselnde limnische, deltaische und fluviatile Sedimentationsräume bestimmten die Ablagerung während des gesamten späten Miozäns (Pannonium; unteres Pannonium: „obere“ Kohleführende Schichten von Weiz, Pucher Schotter, Feldbach-

Formation, Kleinsemmering-Formation, Paldau-Formation, Ries-Formation; mittleres Pannon: Schichten von Loipersdorf-Unterlamm, Stegersbacher Schichten; oberes Pannon: Schichten von Oberneuberg, Taborer Schotter, Jennersdorfer Schichten, Süßwasserkalk von Kirchfidisch und Königsberg, Opalite vom Csater-Berg).

Anschließende Hebung führte zu einer erheblichen Erosion und einer Schichtlücke (ca. 3,5 Ma) bis zum frühen Pliozän. Flusssedimente sind unterhalb oder neben (Silberberg Schotter) und auf (Postbasaltische Schotter) alkalibasaltischen Gesteinen von überwiegend plio-/pleistozänem Alter (Basalt und Tuff/Tuffit) zu beobachten.

Abgesehen von den zahlreichen Beiträgen von Arthur Winkler-Hermaden (z. B. Winkler-Hermaden, 1957), liefern insbesondere die Arbeiten von Kollmann (1965), die Studien von Kröll et al. (1988), von Ebner & Sachsenhofer (1991, 1995) und von Sachsenhofer et al. (1997) detaillierte Daten zum Grundgebirge und zur Beckenfüllung. Schreilechner & Sachsenhofer (2007) und Dax et al. (2024) präsentieren einen sequenzstratigraphischen Rahmen. Neuere Zusammenfassungen zum Steirischen Becken bieten Gross et al. (2007), Berka (2015) und Gross (2022)

Do rocks make the wine?

Maria Heinrich

Marxergasse 37/5, 1030 Wien, Austria

No, neither rocks nor soils make the wine! First and foremost photosynthesis makes the growth of vine possible, of course winegrowers make the wine. Nevertheless, soil and the bedrock are important factors of winegrowing.

Superimposing Austria's quality wine regions onto the geological map shows the concurrence with the south-eastern margin of the Bohemian Massif and the eastern margin of the Alps as well as with the Molassezone and the big basins in the East. Generally the climate and terrain here are favourable for winegrowing only because of geologic events in the past.

According to Cornelis van Leeuwen and Laure de Rességuier (2018) the following topographic-, soil- and rock-related factors are important for vine phenology, grape ripening and terroir expression of a particular vineyard: a) soil temperature in the root zone b) water supply c) mineral supply d) rooting of the vine and e) depth of the root zone. The choice of the appropriate grape variety grown in its ideal climate, together with favourable topography and soil and bedrock characteristics define the potential to produce exquisite wine. The French term 'terroir' embodies this potential as a holistic and interacting concept. Terroir expression can be optimized by techniques of vineyard cultivation.

The impact of soil and bedrock on grape composition and wine quality is conveyed through the vine. You cannot taste minerals in the wine. There is no direct correlation between soil composition and wine quality. Multiple interactions need to be taken into account and great wines are not restricted to one soil or rock type. Nevertheless, the soil and bedrock on which vines grow, influence both the quality and the style of wine.

Some Styrian vineyards where the vines grow on volcanic substrate and especially on basalt will be highlighted: Hochstraden, Hochwarth, Klöchberg, Königsberg, Seindl, Schlosskogel and vineyards near Riegersburg. Weathered basalt provides the vines with an excellent range of mineral nutrients and coarse rock fragments break up the clayey to loamy texture of the vineyard soil. The taste of basalt-wines is often described as stony and smoky.

References

van Leeuwen, C. & Rességuier, L. de: Major Soil-Related Factors in Terroir Expression and Vineyard Siting. – Elements, Vol. 14, Number 3, June 2018.

Corresponding author: maria.heinrich@gmx.at

Machen die Gesteine den Wein?

Nein, weder Gesteine noch Böden machen den Wein! In erster Linie ist die Photosynthese für das Wachstum des Weins verantwortlich, und natürlich machen die Winzer den Wein. Dennoch sind Boden und Ausgangsgestein wichtige Faktoren für den Weinbau.

Vergleicht man die Qualitätsweinregionen Österreichs mit der geologischen Übersicht, so zeigt sich die Übereinstimmung mit dem südöstlichen Rand des Böhmisches Massivs und dem östlichen Rand der Alpen sowie mit der Molassezone und den großen Becken im Osten. Im Allgemeinen also sind das Klima und das Gelände hier nur dank geologischer

Ereignisse in der Vergangenheit für den Weinbau günstig!

In Bezug auf einen bestimmten Weingarten sind laut Cornelis van Leeuwen und Laure de Rességuier (2018) die folgenden Faktoren bezüglich Lage, Boden und Gestein für die Phänologie der Reben, für die Reifung der Trauben und den Ausdruck des Terroirs von Bedeutung: a) Bodentemperatur im Wurzelbereich b) Wasserversorgung c) Mineralstoffversorgung d) Verankerung der Rebe e) Tiefe des Wurzelbereichs. Die Wahl der geeigneten Rebsorte, die in ihrem idealen Klima angebaut wird, in Verbindung mit günstigen topografischen, Boden- und Gesteinsmerkmalen, vereint das Potenzial zur Herstellung von edlen Weinen. Der französische Begriff Terroir verkörpert dieses Potenzial als ganzheitliches und interagierendes Konzept. Die Terroir-Ausprägung kann durch Techniken zur Bewirtschaftung der Weinberge optimiert werden.

Der Einfluss von Boden und Ausgangsgestein auf die Zusammensetzung der Trauben und auf die Weinqualität wird durch die Rebe vermittelt, man kann Mineralien im Wein nicht schmecken. Es gibt keinen direkten Zusammenhang zwischen Bodenzusammensetzung und Weinqualität, vielfache Interaktionen müssen bedacht werden und große Weine sind nicht auf einen Boden, ein Gestein beschränkt. Dennoch, der Boden- und der Gesteinsuntergrund auf dem ein Wein wächst, beeinflusst sowohl Qualität als auch Stil des Weines.

Einige steirische Rieden mit vulkanischem, speziell basaltischem Untergrund werden hervorgehoben: Hochstraden, Hochwarth, Klöchberg, Königsberg, Seindl, Schlosskogel und die Weingärten bei der Riegersburg. Verwitterter Basalt stellt der Pflanze ein exzellentes Spektrum an mineralischen Nährstoffen zur Verfügung und Gesteinsbruchstücke lockern als grobe Anteile den tonig-lehmigen Weingartenboden auf. Der Geschmack von Basalt-Weinen wird oft als steinig und rauchig beschrieben.

Paleogeographic control on eruption style changes in a Miocene maar-diatreme: rock componentry analysis and detailed field work (Bakony-Balaton Highland Volcanic Field, Hungary)

Mátyás Hencz¹, Károly Németh^{1,2,3}, Tamás Spránitz¹, Tamás Biró⁴, Dávid Karátson⁴, Márta Berkesi¹

¹ MTA-EPSS FluidsByDepth Lendület Research Group, Institute of Earth Physics and Space Science, Hungarian Research Network (HUN-REN), Sopron, Hungary

² National Program for Earthquakes and Volcanoes, Geohazard Research Center, Saudi Geological Survey, Jeddah, Saudi Arabia

³ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Bologna, Italy

⁴ Department of Physical Geography, Institute of Geography and Earth Sciences, ELTE Eötvös Loránd University, Budapest, Hungary

The paleoenvironment significantly influences the evolution of small, monogenetic volcanoes by affecting their eruption style (e.g., magmatic versus phreatomagmatic explosive), mainly through the availability, amount and recharge rate of external water to the magma and water interaction zone. When surface-reaching magma meets this external water, it can trigger explosive phreatomagmatic eruptions. The duration and variation of phreatomagmatic eruption phases are influenced by environmental factors, which can be studied by analyzing pyroclastic rocks formed during volcanic activity. This research examines the volcanic development of Szent György Hill, located within the monogenetic basaltic Miocene-Pleistocene Bakony–Balaton Highland Volcanic Field (BBHVF) in the western Pannonian Basin, Central Europe. Szent György Hill is a deeply eroded monogenetic maar-diatreme volcano, appearing as a butte on the western side of the BBHVF. This study employed surface image analysis of rock slabs and thin sections of pyroclastic rocks to assess the relative proportions of juvenile and lithic components within samples based on their stratigraphic positions. The primary rock-forming components (juvenile pyroclasts) included materials generated by phreatomagmatic explosive fragmentation—particularly sideromelane glass—as well as those likely resulting from magmatic fragmentation “escaped” from the direct magma and water interaction within the feeding dikes, such as tachylite glass and aphanitic to microlithic basaltic fragments. Accidental lithic pyroclasts were also analyzed to use them as a proxy to establish the excavation depth hence estimate the relative depth at which phreatomagmatic explosions occurred. The prevalence of sideromelane glass in lower stratigraphic layers suggests an initial dominant phase of phreatomagmatic activity, most likely driven by interactions between ascending magma and external water derived from late Miocene siliciclastic surface sediments. As the phreatomagmatic explosions continued, the karst system within deeper Mesozoic carbonates was briefly breached, which contributed to the elevated intensity of the explosions manifested as increased volume of accidental lithics from deep karstic aquifers in the resulting pyroclastic rocks. The combined aquifer system — comprising permeable siliciclastic sediments and fractured carbonate rocks —influenced phreatomagmatic activity throughout the eruption's progression. As the supply of external water decreased hence the system is more damped and “dry”, eruptions became more magmatic in character, with higher proportions of magmatic juvenile particles and reduced sideromelane content in the erupted pyroclasts. Once water sources were depleted, magmatic eruptions of the Hawaiian or Strombolian style eruptions replaced phreatomagmatism, though phreatomagmatic activity could resume if environmental conditions changed. This volcanic evolution model indicates that monogenetic phreatomagmatic volcanoes can change their eruption style during an eruptive event, a factor relevant for assessing volcanic hazards in active regions.

Corresponding author: hencz.matyas@epss.hun-ren.hu



Paläogeografische Einflüsse auf Veränderungen des Eruptionsstils in einem Maar-Diatrem aus dem Miozän: Analyse der Gesteinszusammensetzung und detaillierte Feldarbeit (Vulkanfeld Bakony-Balaton-Hochland, Ungarn)

Die Paläoumwelt hat einen erheblichen Einfluss auf die Entwicklung kleiner, monogenetischer Vulkane, indem sie deren Eruptionsstil (z. B. magmatisch versus phreatomagmatisch explosiv) beeinflusst, hauptsächlich durch die Verfügbarkeit, Menge und Nachspeisungsrate von externem Wasser in der Magma-Wasser-Wechselwirkungszone. Wenn an die Oberfläche gelangendes Magma auf dieses externe Wasser trifft, kann es explosive phreatomagmatische Eruptionen auslösen. Die Dauer und Variation der phreatomagmatischen Eruptionsphasen werden durch Umweltfaktoren beeinflusst, die durch die Analyse von pyroklastischen Gesteinen, die während der vulkanischen Aktivität entstanden sind, untersucht werden können. Diese Studie untersucht die vulkanische Entwicklung des Szent György-Hügels, der sich im monogenetischen basaltischen Bakony-Balaton-Hochland-Vulkangebiet (BBHVF) aus dem Miozän-Pleistozän im westlichen Pannonischen Becken in Mitteleuropa befindet. Der Szent György-Hügel ist ein stark erodierter monogenetischer Maar-Diatrem-Vulkan, der als Härtling auf der Westseite des BBHVF freigelegt ist. In dieser Studie wurden Oberflächenbildanalysen von Gesteinsplatten und Dünnschliffen pyroklastischer Gesteine durchgeführt, um die relativen Anteile juveniler und lithischer Komponenten in den Proben anhand ihrer stratigraphischen Positionen zu bewerten. Zu den primären gesteinsbildenden Komponenten (juvenile Pyroklasten) gehörten Materialien, die durch phreatomagmatische, explosive Fragmentierung entstanden sind – insbesondere Sideromelan-Glas – sowie solche, die wahrscheinlich aus magmatischer Fragmentierung stammen und aus der direkten Wechselwirkung von Magma und Wasser innerhalb der Zufuhrgänge „stammend“ sind, wie Tachylit-Glas und aphanitische bis mikrolithische Basaltfragmente. Vorhandene lithische Pyroklasten wurden ebenfalls analysiert, um sie als Proxy zur Bestimmung der Herkunftstiefe zu verwenden und so die relative Tiefe zu schätzen, in der phreatomagmatische Explosionen stattfanden. Das häufige Vorkommen von Sideromelan-Glas in den unteren stratigraphischen Schichten deutet auf eine anfänglich dominante Phase phreatomagmatischer Aktivität hin, die höchstwahrscheinlich durch Wechselwirkungen zwischen aufsteigendem Magma und externem Wasser aus spätmiozänen siliziklastischen Oberflächensedimenten verursacht wurde. Während die phreatomagmatischen Explosionen anhielten, kam es zu einem kurzzeitigen Durchbrechen des Karstsystems in tieferen mesozoischen Karbonaten, was zu einer erhöhten Intensität der Explosionen beitrug, die sich in einem erhöhten Volumen an vorhandenen lithischen Komponenten aus tiefen karstigen Grundwasserleitern in den entstandenen pyroklastischen Gesteinen manifestierte. Das kombinierte Grundwassersystem – bestehend aus durchlässigen siliziklastischen Sedimenten und zerklüfteten Karbonatgesteinen – beeinflusste die phreatomagmatische Aktivität während des gesamten Verlaufs der Eruption. Als die Zufuhr von externem Wasser abnahm und das System somit „trockener“ wurde, nahmen die Eruptionen einen magmatischeren Charakter an, mit einem höheren Anteil an magmatischen juvenilen Partikeln und einem geringeren Sideromelan-Gehalt in den ausgeworfenen Pyroklasten. Nachdem die Wasserzufuhr endete, ersetzten magmatische Eruptionen vom hawaiianischen oder strombolianischen Typ den

phreatomagmatischen Vulkanismus, obwohl die phreatomagmatische Aktivität bei einer Veränderung der Bedingungen wieder beginnen konnte. Dieses Modell der vulkanischen Entwicklung zeigt, dass monogenetische, phreatomagmatische Vulkane ihren Eruptionsstil während eines Eruptionseignisses ändern können, ein Faktor, der für die Bewertung vulkanischer Gefahren relevant ist. *

*Übersetzt mit DeepL.com



A clue to the origin of the Common Mantle Reservoir? Unaltered minerals from Teschenite Association Rocks provide a snapshot of Early Cretaceous mantle isotopic compositions beneath the northern margin of the Tethys

John M. Hora¹, Vladislav Rappich¹, Jakub Jirásek², Jitka Míková¹, Zuzana Čvančarová¹, Dalibor Matýsek³, Zsolt Benkó^{4,5}, Kata Molnár⁴

¹ Czech Geological Survey, Prague, Czech Republic

² Palacký University Olomouc, Czech Republic

³ VŠB-Technical University of Ostrava, Czech Republic

⁴ HUN-REN Institute for Nuclear Research, Debrecen, Hungary

⁵ Department of Mineralogy and Geology, University of Debrecen, Hungary

Cenozoic anorogenic (predominantly alkaline) igneous rocks throughout Europe and the broader circum-Mediterranean region display significant variability in Sr-Nd-Pb isotopic compositions, but appear to include a single, common mixing component ¹. Attributed to the asthenospheric mantle, this component has been variously called PREMA (PREvalent MAntle) ², Component A ³, LVC (Low Velocity Component) ⁴, EAR (European Asthenospheric Reservoir) ⁵, CEA (Central European Anomaly) ⁶ or CMR (Common Mantle Reservoir) ¹. In terms of mantle endmembers, it is similar to HIMU, but with somewhat less radiogenic Pb isotopic compositions, near the FOZO (FOcal ZONE) ⁷ or 'young HIMU' ⁸. This is interpreted to be a consequence of deep recycling of oceanic lithosphere over Earth's history, whereas 'true' HIMU compositions have had the longest mantle repose times since U-enrichment. In the context of the circum-Mediterranean region, the age and origin of this mantle signature (plume vs. non-plume) is the subject of ongoing debate.

Insight may come from an unlikely source: Early Cretaceous (ca. 120 Ma) alkaline intrusive and extrusive Teschenite Association Rocks (TAR) that were emplaced into sediments of small incipient oceanic rift basins formed along the northwest margin of the Tethys prior to their deformation in the Alpine-Carpathian Orogeny. Intense hydrothermal alteration and zeolitization – the defining characteristics of these rocks – unfortunately also compromise information gained from bulk rock and most mineral analyses. We find that the few surviving pristine primary mineral phases, however, reliably record underlying mantle isotopic composition during a period when major tectonic events were affecting the margins of Europe.

Prior to ca. 125 Ma, the incipient oceanic domains comprising the Alpine Tethys formed the plate boundary between Europe/Iberia and Africa/Adria/Apulia and was an along-strike extension to the already-opened Central Atlantic. After ca. 125 Ma, spreading stepped from the Alpine Tethys to the North Atlantic, which, along with onset of South Atlantic opening, resulted in counterclockwise rotation of Africa/Adria/Apulia relative to Europe and closure of the Alpine Tethys ⁹. The age and paleogeographic location of the TAR makes them ideal candidates for testing a hypothesis that the widely-distributed Common Mantle Reservoir originated when the Mediterranean region was located along the eastern end of the Central Atlantic Magmatic Province (CAMP).

Sr-Nd-Pb isotopic analyses of separated pyroxene, amphibole, and apatite fractions from Teschenite Association Rocks indicate that the mantle source had isotopic characteristics intermediate between FOZO and HIMU compositions. Tightly clustered, un-radiogenic Sr isotopic ratios in minerals are at odds with the broad spread in ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr seen in previous research on equivalent whole-rocks at both ends of the Alpine Tethys ^{10, 11, 12}, indicating those whole-rock analyses were indeed adversely affected by seawater alteration. Isotopic

compositions of the unaltered TAR minerals are comparable to both the CMR ¹ and the high-Ti group of CAMP basalts ¹³, as well as modern-day Canary Islands plume-derived magmas¹⁴. The lack of a trend away from the CMR composition in the newly-obtained data may indicate that TAR possibly capture a record of this isotopic endmember in a relatively pure form, without the added complications of elapsed time and presence of overlying lithosphere (comprising both subcontinental lithospheric mantle and continental crust).

This timing and location of TAR emplacement, along with their isotopic compositions suggest a mechanism whereby the asthenosphere underlying the broad region of the Mediterranean could have been contaminated by an isotopic component not unlike that sampled by some early Central Atlantic magmas and/or the present-day Canary Islands hotspot. Such a scenario could provide resolution to the incongruity of the presence of young HIMU/FOZO (plume-like) isotopic signatures – normally associated with large-volume, high-degree partial melts erupted rapidly over short periods of time – in relatively small-volume magmatic systems erupted incrementally over a period of tens of millions of years.

References

1. Lustrino M, Wilson M (2007). *Earth-Science Reviews*, **81**(1-2): 1-65.
2. Wörner G, Zindler A, Staudigel H, Schmincke HU (1986). *Earth and Planetary Science Letters*, **79**(1-2): 107-119.
3. Wilson M, Downes H (1991). *Journal of Petrology*, **32**(4): 811-849.
4. Hoernle K, Zhang YS, Graham D (1995). *Nature*, **374**(6517): 34-39.
5. Granet M, Wilson M, Achauer U (1995). *Earth and Planetary Science Letters*, **136**(3-4): 281-296.
6. Goes S, Spakman W, Bijwaard H (1999). *Science*, **286**(5446): 1928-1931.
7. Stracke A, Hofmann AW, Hart SR (2005). *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **6**.
8. Thirlwall MF (1997). *Chemical Geology*, **139**(1-4): 51-74.
9. Frasca G, Manatschal G, Chenin P (2024). *Int J Earth Sci*, **113**(5): 1053-1065.
10. Brunarska I, Anczkiewicz R (2019). *Geol Carpath*, **70**(3): 222-240.
11. Harangi S, Tonarini S, Vaselli O, Manetti P (2003). *Acta Geologica Hungarica*, **46**(1): 77-94.
12. Rossy M, Azambre B, Albarede F (1992). *Chemical Geology*, **97**(1-2): 33-46.
13. Deckart K, Bertrand H, Liégeois JP (2005). *Lithos*, **82**(3-4): 289-314.
14. Gurenko AA, Sobolev AV, Hoernle KA, Hauff F, Schmincke HU (2009). *Earth and Planetary Science Letters*, **277**(3-4): 514-524.

Corresponding author: john.hora@geology.cz

Ein Hinweis auf den Ursprung des gemeinsamen Mantelreservoirs? Unveränderte Mineralien aus Gesteinen der Teschenite Association liefern einen Einblick in die Isotopenzusammensetzung des Mantels im frühen Kreidezeitalter unterhalb des nördlichen Randes der Tethys.

Anorogene (vorwiegend alkalische) magmatische Gesteine aus dem Känozoikum in ganz Europa und dem weiteren Mittelmeerraum weisen erhebliche Unterschiede in ihrer Sr-Nd-Pb-Isotopenzusammensetzung auf, scheinen jedoch eine einzige gemeinsame Mischungskomponente zu enthalten [1]. Diese Komponente, die dem asthenosphärischen Mantel zugeschrieben wird, wurde unterschiedlich bezeichnet: PREMA (PREvalent Mantle) [2], Komponente A [3], LVC (Low Velocity Component) [4], EAR (European Asthenospheric Reservoir) [5], CEA (Central European Anomaly) [6] oder CMR (Common Mantle Reservoir) [1]. In Bezug auf die Endglieder des Mantels ähnelt sie HIMU, weist jedoch etwas weniger radiogene Pb-Isotopenzusammensetzungen auf, ähnlich wie FOZO (FOcal Zone) [7] oder „junges HIMU“ [8]. Dies wird als Folge tiefer Subduktion der ozeanischen Lithosphäre im Laufe der Erdgeschichte interpretiert, während „echte“ HIMU-Zusammensetzungen seit der U-Anreicherung die längste Verweildauer im Mantel hatten. In Bezug auf den Mittelmeerraum sind das Alter und der Ursprung dieser Mantelsignatur (Plume vs. Nicht-Plume) Gegenstand einer anhaltenden Diskussion.

Erkenntnisse könnten aus einer unerwarteten Quelle stammen: aus alkalischen, intrusiven und extrusiven Teschenite Association Rocks (TAR) aus der frühen Kreidezeit (ca. 120 Ma), die sich in Sedimenten kleiner, im Entstehen begriffener, ozeanischer Riftbecken entlang des nordwestlichen Randes der Tethys und vor ihrer Deformation im Zuge der alpinokarpatischen Orogenese abgelagert haben. Intensive hydrothermale Umwandlung und Zeolithisierung – die charakteristischen Merkmale dieser Gesteine – beeinträchtigen leider auch die Informationen, die aus Gesamtgesteins- und den meisten Mineralanalysen gewonnen werden. Wir stellen jedoch fest, dass die wenigen erhaltenen ursprünglichen, primäre Mineralphasen zuverlässig die Isotopenzusammensetzung des darunter liegenden Mantels während einer Zeit dokumentieren, in der große tektonische Ereignisse die Ränder Europas beeinflussten.

Vor ca. 125 Ma bildeten die entstehenden ozeanischen Gebiete, aus denen sich die alpine Tethys zusammensetzte, die Plattengrenze zwischen Europa/Iberien und Afrika/Adria/Apulien und waren eine, entlang des Streichens verlaufende, Erweiterung des bereits geöffneten Zentralatlantiks. Nach ca. 125 Ma breitete sich die Ausdehnung von der alpinen Tethys auf den Nordatlantik aus, was zusammen mit dem Beginn der Öffnung des Südatlantiks zu einer Drehung von Afrika/Adria/Apulien gegen den Uhrzeigersinn relativ zu Europa und zum Verschluss der alpinen Tethys führte [9]. Das Alter und die paläogeografische Lage der TAR machen sie zu idealen Vorkommen für die Überprüfung der Hypothese, dass das weit verbreitete gemeinsame Mantelreservoir entstand, als sich die Mittelmeerregion am östlichen Ende der Zentralatlantischen Magmatischen Provinz (CAMP) befand.

Sr-Nd-Pb-Isotopenanalysen von separierten Pyroxen-, Amphibol- und Apatitfraktionen aus Gesteinen der Teschenite Association zeigen, dass die Mantelquelle Isotopeneigenschaften aufwies, die zwischen den Zusammensetzungen von FOZO und HIMU lagen. Die eng gruppierten, nicht radiogenen Sr-Isotopenverhältnisse in Mineralien stehen im Widerspruch zu der breiten Streuung von $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, die in früheren Untersuchungen an äquivalenten Gesteinen an beiden Enden der alpinen Tethys [10, 11, 12] festgestellt wurde, was darauf hindeutet, dass diese Gesteinsanalysen tatsächlich von Umwandlung durch Meerwasser beeinflusst wurden. Die Isotopenzusammensetzungen der unveränderten TAR-Mineralien sind sowohl mit denen der CMR [1] - als auch der Ti-reichen Gruppe der CAMP-Basalte [13] sowie mit denen der heutigen, aus Plumes stammenden Magmen der Kanarischen Inseln [14] vergleichbar. Das Fehlen einer Abweichung von der CMR-Zusammensetzung in den

neu gewonnenen Daten könnte darauf hindeuten, dass TAR möglicherweise eine Aufzeichnung dieses Isotopen-Endglieds in relativ reiner Form beinhaltet, ohne die zusätzlichen Einflüsse der verstrichenen Zeit und der überlagernden Lithosphäre (bestehend aus subkontinentalem lithosphärischem Mantel und kontinentaler Kruste).

Der Zeitpunkt und Ort der TAR-Einlagerung sowie ihre Isotopenzusammensetzung lassen einen Mechanismus vermuten, durch den die Asthenosphäre unterhalb des gesamten Mittelmeerraums durch eine Isotopenkomponente kontaminiert worden sein könnte, die derjenigen ähnelt, die in einigen frühen Magmen des Zentralatlantiks und/oder dem heutigen Hotspot der Kanarischen Inseln nachgewiesen wurde. Ein solches Szenario könnte eine Erklärung für die Unstimmigkeit liefern, dass junge HIMU/FOZO-Isotopensignaturen (plume-ähnlich) – die normalerweise mit großvolumigen, hochgradig partiellen Schmelzen in Verbindung gebracht werden, die innerhalb kurzer Zeiträume schnell ausbrechen – in relativ kleinvolumigen magmatischen Systemen auftreten, die über einen Zeitraum von mehreren zehn Millionen Jahren schrittweise ausbrechen. *

*Übersetzt mit DeepL.com

Cooling rates of lunar orange glass beads

Hejiu Hui¹, Kai-Uwe Hess², Youxue Zhang³, Alexander R.L. Nichols⁴, Anne H. Peslier⁵, Rebecca A. Lange³, Donald B. Dingwell², Clive R. Neal⁶

¹ State Key Laboratory for Mineral Deposits Research & Lunar and Planetary Science Institute, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China

² Department of Earth and Environmental Sciences, LMU-University of Munich, Theresienstrasse 41/III, 80333 Munich, Germany

³ Department of Earth and Environmental Sciences, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA

⁴ Department of Geological Sciences, University of Canterbury, Christchurch 8140, New Zealand

⁵ Jacobs, NASA-Johnson Space Center, Mail Code X13, Houston, TX 77058, USA

⁶ Department of Civil and Environmental Engineering and Earth Sciences, University of Notre Dame, Notre Dame, IN 46556, USA

It is widely accepted that the Apollo 17 orange glass beads are of volcanic origin. The degree of degassing of the glass beads depends on their cooling rates, so the estimation of volatile contents in the parental magmas of these lunar pyroclastic glasses also depends on the cooling rates. The cooling rate can be estimated using the calorimetric properties of the glass across the glass transition. In this study, a series of heat capacity measurements were carried out on hand-picked lunar volcanic orange glass beads during several cycles of heating to temperatures above their glass transition using a differential scanning calorimeter. The cooling rate of orange glass beads (sample 74220,867) was calculated to be 101 K/min using the correlation between glass cooling rates and fictive temperatures estimated from their heat capacity–temperature paths. This cooling rate is close to the lower end of the range that best fits the diffusion profiles of several volatile species in the glass beads, and at the upper end of the cooling- rate range recorded in glasses quenched subaerially on Earth. The cooling rate is likely to be controlled by the cooling environment (cooling medium) such that the lunar volcanic glass beads could have been cooled in a gaseous medium released from volcanic eruptions on the Moon, but not during “free flight” in vacuum. The existence of a gas medium suggests, in turn, that there may have been at least a short-lived or episodic atmosphere on the early Moon at around 3.5 Ga.

Corresponding author: hess@lmu.de

Abkühlraten lunarer oranger Glasperlen

Es ist allgemein anerkannt, dass die orangen Glasperlen der Apollo-17-Mission vulkanischen Ursprungs sind. Der Grad der Entgasung der Glasperlen hängt von deren Abkühlrate ab, weshalb auch die Abschätzung des Gehalts flüchtiger Bestandteile in den ursprünglichen Magmen dieser lunaren pyroklastischen Gläser von den Abkühlraten abhängt. Die Abkühlrate kann über die kalorimetrischen Eigenschaften des Glases im Bereich des Glasübergangs abgeschätzt werden. In dieser Studie wurden eine Reihe von Wärmekapazitätsmessungen an handverlesenen orangen vulkanischen Glasperlen des Mondes während mehrerer Heizzyklen bis über den Glasübergang hinaus mit einem Differenz-Scanning-Kalorimeter durchgeführt.

Die Abkühlrate der orangen Glasperlen (Probe 74220,867) wurde unter Verwendung der

Korrelation zwischen Glasabkühlrate und der aus den Temperaturverläufen der Wärmekapazität abgeleiteten fiktiven Temperatur auf 101 K/min berechnet. Diese Abkühlrate liegt am unteren Ende des Bereichs, der am besten mit den Diffusionsprofilen verschiedener flüchtiger Bestandteile im Glas übereinstimmt, und am oberen Ende des Bereichs, der für Gläser bekannt ist, die auf der Erde subaerisch abgeschreckt wurden.

Die Abkühlrate wurde wahrscheinlich durch das Abkühlmedium bestimmt, sodass die lunaren vulkanischen Glasperlen in einem gasförmigen Medium abgekühlt sein könnten, das bei vulkanischen Ausbrüchen auf dem Mond freigesetzt wurde – jedoch nicht bei einem „freien Flug“ im Vakuum. Die Existenz eines Gasmediums deutet darauf hin, dass es auf dem frühen Mond vor etwa 3,5 Milliarden Jahren zumindest kurzzeitig oder episodisch eine Atmosphäre gegeben haben könnte.

Rare accessory minerals bound to the latest stage of the ijolite and turjaite (ex silico-carbonatite?) crystallization from the Cenozoic Podhorní vrch Hill volcano (Czechia)

Jakub Jirásek¹, Dalibor Matýsek² and Ondřej Pour^{1,3}

¹ Department of Geology, Faculty of Science, Palacký University Olomouc, 17. listopadu 1192/12, 771 46 Olomouc, Czech Republic

² Department of Geological Engineering, Faculty of Mining and Geology, VŠB-Technical University of Ostrava, 17. listopadu 15/2172, 708 00 Ostrava-Poruba, Czech Republic;

³ Czech Geological Survey, Klárov 3, 118 21 Praha, Czech Republic;

The Podhorní vrch Hill belongs to the small volcanoes in western Bohemia representing the Cenozoic alkaline magmatism of the Bohemian Massif. The alkaline volcanic rocks erupted mainly along the NE–SW trending Eger (Ohře) Rift, part of the European Cenozoic rift system (Ziegler, 1992).

The modern volcanologic mapping and description of the Podhorní vrch Hill volcano was published by Cajz (1992). Terrestrial volcanic structure is situated within the NNW-SSE stretching tectonic zone ca. 60 m wide, confirmed by the geophysical survey. Surrounding rocks belong to the Mariánské Lázně Complex, Cambro-Ordovician oceanic crust which underwent Late Devonian eclogite to granulite facies metamorphism (Crowley et al., 2002). According to Valenta et al. (2014), local volcanic activity probably started with a phreatomagmatic eruption of the Rájov maar situated on the tectonic line ca. 1.7 km NWN from the Podhorní vrch Hill. Subsequent activity in Strombolian style was described by Cajz (1992). K/Ar isotopic dating of the Podhorní vrch volcano yielded an age 15.3 ± 1.0 Ma (Kaiser and Pilot, 1986) or 17.0 Ma (Ulrych et al., 2003). Its Sr- and Nd-isotopic ratios are in accord with primitive mafic volcanites of the Cenozoic Volcanic Province of the Bohemian Massif and testify for a depleted mantle source (HIMU OIB) - Ulrych et al. (2000).

Mineralogy and petrology of the Podhorní vrch (Podhornberg or Podhorn in German) have been studied since the 19th century. Most interesting are the medium- to coarse-grained nepheline – clinopyroxene $\pm$ melilite pegmatitoid (doleritic) segregations, considered to be ijolites and turjaites. According to Ulrych et al. (2000), typical mineral assemblage include nepheline + clinopyroxene $\pm$ melilite/(rarely leucite + sanidine), Ti-rich magnetite, apatite, olivine, and sodalite.

During the recent study, we found an interesting mineral association present as the latest filling of spaces between rock-forming minerals. Such infills are typical by rather chaotic microstructure of crystals and their aggregates, presence of partially devitrified glass, and dendritic to skeletal development of crystal aggregates. The newly recognized minerals include andrémeyerite, aenigmatite, wilkinsonite, fluorcaphite, oxynatropyrochlore, and fayalite.

Such late stage mineral assemblage shows the result of fractional crystallization of silicate part of the magma. It is strongly enriched in alkali metals (Na, K), iron, and some incompatible elements (Ba, Sr). Based on the indirect but striking evidence we believe that phaneritic rock at the Podhorní vrch Hill was originally silico-carbonatite, but after the dissolution of natrocarbonate mineral(s) by the infiltrating water remained just the silicate part, classified as ijolite and turjaite.

Corresponding author: jakub.jirasek@upol.cz

References

- Cajz V. (1992) Volcanic history of Podhorní vrch Hill (Western Bohemia). *Časopis pro mineralogii a geologii*, 37(1), 63–64. (in Czech with English summary)
- Crowley Q.G., Floyd P.A., Štědrá V., Winchester J.A., Kachlík V. and Holland J.G. (2002) The Mariánské-Lázně Complex, NW Bohemian Massif: development and destruction of an early Palaeozoic seaway. *Geological Society of London Special Publications*, 201, 177–195.
- Kaiser G. and Pilot J. (1986) Weitere K-Ar-Datierungen an jungen Vulkaniten. *Zeitschrift für geologische Wissenschaften*, 14(1), 121–124. (in German with English abstract)
- Ulrych J., Pivec E., Lang M. and Lloyd F.E. (2000) Ijolitic segregations in melilit nephelinite of Podhorní vrch volcano, Western Bohemia. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen*, 175(3), 317–345.
- Ulrych J., Lloyd F.E. and Balogh K. (2003) Age relations and geochemical constraints of Cenozoic alkaline volcanic series in W Bohemia: a review. *Geolines*, 15, 168–180.
- Valenta J., Rappich V., Skácelová Z., Gaždová R. and Fojtíková L (2014) Newly discovered Neogene maar volcano near the Mariánské Lázně, Western Bohemia. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 11(2), 107–116.
- Ziegler P.A. (1992) European Cenozoic rift system. *Tectonophysics*, 208(1-3), 91–111.

Seltene Begleitminerale, die mit der letzten Phase der Kristallisation von Ijolith und Turjait (ex silico-carbonatit?) aus dem vulkanischen Podhorní vrch-Hügel (Tschechien) aus dem Känozoikum in Verbindung stehen

Der Podhorní vrch gehört zu den kleinen Vulkanen in Westböhmen, die den alkalischen Magmatismus des Böhmisches Massivs im Känozoikum repräsentieren. Die alkalischen Vulkangesteine brachen hauptsächlich entlang des nordöstlich-südwestlich verlaufenden Eger-Grabenbruchs (Ohře) aus, der Teil des europäischen Känozoikum-Grabenbruchs ist (Ziegler, 1992).

Die moderne vulkanologische Kartierung und Beschreibung des Vulkans Podhorní vrch wurde von Cajz (1992) veröffentlicht. Die terrestrische Vulkanstruktur befindet sich innerhalb einer ca. 60 m breiten, sich von NNW nach SSE erstreckenden tektonischen Zone, was durch geophysikalische Untersuchungen bestätigt wurde. Die umgebenden Gesteine gehören zum Mariánské Lázně-Komplex, einer ozeanischen Kruste aus dem Kambrium und Ordovizium, die im späten Devon einer Metamorphose von Eklogit- zu Granulit-Fazies unterzogen wurde (Crowley et al., 2002). Laut Valenta et al. (2014) begann die lokale vulkanische Aktivität wahrscheinlich mit einer phreatomagmatischen Eruption des Rájov-Maars, das sich auf der tektonischen Linie ca. 1,7 km NWN vom Podhorní vrch befindet. Die nachfolgende Aktivität im strombolianischen Stil wurde von Cajz (1992) beschrieben. Die K/Ar-Isotopen-Datierung des Vulkans Podhorní vrch ergab ein Alter von $15,3 \pm 1,0$ Ma (Kaiser und Pilot, 1986) bzw. 17,0 Ma (Ulrych et al., 2003). Seine Sr- und Nd-Isotopenverhältnisse stimmen mit primitiven mafischen Vulkaniten der vulkanischen Provinz des Böhmisches Massivs aus dem Känozoikum überein und zeugen von einer abgereicherten Mantelquelle (HIMU OIB) – Ulrych et al. (2000).

Die Mineralogie und Petrologie des Podhorní vrch (Podhornberg oder Podhorn auf Deutsch) werden seit dem 19. Jahrhundert bearbeitet. Am interessantesten sind die mittel- bis grobkörnigen Nephelin-Klinopyroxen-±Melilit-Pegmatitoid- (doleritischen) Entmischungen, die als Ijolite und Turjaite angesehen werden. Laut Ulrych et al. (2000) umfasst die typische Mineralzusammensetzung Nephelin + Klinopyroxen ± Melilit/ (selten Leucit + Sanidin), Ti-reichen Magnetit, Apatit, Olivin und Sodalith.

Während der aktuellen Studie fanden wir eine interessante Mineralassoziation, die als jüngste Füllung der Zwischenräume zwischen gesteinsbildenden Mineralien vorhanden ist.

Solche Füllungen sind typisch für eine eher chaotische Mikrostruktur der Kristalle und ihrer Aggregate, das Vorhandensein von teilweise entglastem Glas und die dendritische bis skelettartige Entwicklung der Kristallaggregate. Zu den neu identifizierten Mineralien gehören Andrémeierit, Aenigmatit, Wilkinsonit, Fluorcaphit, Oxynatropyrochlor und Fayalit.

Eine solche Mineralzusammensetzung der Spätphase ist das Ergebnis einer fraktionierten Kristallisation des Silikatanteils des Magmas. Sie ist stark angereichert mit Alkalimetallen (Na, K), Eisen und einigen inkompatiblen Elementen (Ba, Sr). Aufgrund der indirekten, aber eindrucksvollen Beweise glauben wir, dass das phaneritische Gestein am Podhorní vrch ursprünglich Silikokarbonatit war, aber nach der Auflösung der Natriumkarbonatminerale durch das eindringende Wasser nur der Silikatanteil übrig blieb, der als Ijolit und Turjait klassifiziert wurde. *

*Übersetzt mit DeepL.com

The Exploitation of Trachyandesite in Roman Times – Millstone Quarries at the Gleichenberger Kogel, Styria (Austria)

Stephan Karl

Dr.-Emperger-Weg 14, 8052 Graz, Austria

The archaeological investigations of the Roman millstone quarry zone discovered in 2022 at the southwestern foot of the Gleichenberger Kogel (Styria, Austria) yielded fundamental insights into ancient raw material extraction of volcanic rocks in the southeastern Alpine-Pannonian region. Following the selective documentation of quarry traces and roughouts of rotary querns in 2023, an in-depth investigation was carried out in 2024 involving an archaeological excavation and a detailed archaeological-topographical mapping covering an area of around 6.5 hectares. This provided clear evidence of the use of locally sourced trachyandesite for the production of rotary querns. Stratigraphic findings, ceramic finds and radiocarbon dating prove that the deposit was used in the middle to late Roman Empire (from the 2nd to the 1st half of the 4th century AD) and again in the Early Middle Ages (7th resp. 8th century AD). However, this use probably began as early as the 1st century AD, as evidenced by a trachyandesite grave stele found in Gleichenberg and dated accordingly. The documented quarry traces show different techniques of stone extraction: on the one hand, the direct carving of cylindrical roughouts from the rock, and on the other hand, block extraction using a trench technique followed by shaping into a roughout. The roughouts clearly show the stage of pre-processing that the raw products underwent in the quarry area. The final assembly with axle and handle must have been carried out in nearby workshops, which, however, have not yet been located. A total of 46 mining sites with associated spoil heaps were recorded, covering a total area of approximately 12,000 m² and indicating intensive use. Geological observations illustrate the influence of joints on the different mining strategies in the two mining fields of Alt-Gleichenberg und Hufnagl.

The Alt-Gleichenberg/Hufnagl millstone quarry zone is the first Roman millstone quarry in Austria to be secured in the field – a second millstone quarry zone was only identified in 2025 at Pauliberg (Burgenland, Austria), where vesicular basalt, a so-called slag basalt, was extracted. Due to its remote location, Alt-Gleichenberg/Hufnagl is one of the best-preserved examples in the Roman Empire. Products made from Gleichenberg trachyandesite were not only distributed in the municipal area of the Roman city *Flavia Solva* (located in Wagna near Leibnitz), but also exported to the neighbouring Pannonian region (e.g. to *Aelium Salla*, Zalaötvő, Hungary), underlining the economic importance of the quarry. Almost all Roman rotary querns, but also larger stones of power mills, found in the south-eastern Alpine region are made of Gleichenberg trachyandesite. Examples made of other rocks, such as garnet mica schist, coarse vesicular basalt or trachybasalt, are extremely rare. Overall, the results provide valuable insights into the technology, organisation and logistics of ancient mining and position the Gleichenberg mining district as a central production site for Roman rotary querns in the south-eastern Alpine-Pannonian region.

Corresponding author: stephan.karl@chello.at

Die Nutzung von Trachyandesit in der Römerzeit – Mühlsteinbrüche am Gleichenberger Kogel, Steiermark (Österreich)

Die archäologische Untersuchung des 2022 entdeckten römerzeitlichen Mühlsteinbruchreviers am südwestlichen Fuß des Gleichenberger Kogels (Steiermark, Österreich) erbrachte grundlegende Erkenntnisse zur antiken Rohstoffgewinnung von vulkanischen Gesteinen im südostalpin-pannonischen Raum. Nach der punktuellen Dokumentation von Abbauspuren und Mühlsteinrohlingen im Jahr 2023 erfolgte 2024 eine vertiefende Untersuchung durch eine archäologische Grabung und eine detaillierte archäologisch-topografische Kartierung auf rund 6,5 Hektar. Dabei konnte die Nutzung des lokal anstehenden Trachyandesits zur Herstellung von Handdrehmühlen zweifelsfrei nachgewiesen werden. Stratigrafische Befunde, Keramikfunde und Radiokarbondatierungen belegen eine Nutzung der Lagerstätte in der mittleren bis späten römischen Kaiserzeit (vom 2. Jahrhundert bis zur 1. Hälfte des 4. Jahrhunderts n. Chr.) sowie eine Wiederaufnahme im Frühmittelalter (7. bzw. 8. Jahrhundert n. Chr.). Der Beginn dieser Nutzung dürfte jedoch bereits im 1. Jahrhundert n. Chr. liegen, wie eine entsprechend datierte, in Gleichenberg gefundene Grabstele aus Trachyandesit belegt. Die dokumentierten Abbauspuren zeigen unterschiedliche Techniken der Steingewinnung: einerseits die direkte Herausarbeitung runder Rohlinge aus dem Fels, andererseits die Blockextraktion mittels Schrämentechnik mit anschließender Zurichtung zu einem Rohling. Die Rohlinge zeigen deutlich die Vorbearbeitung, der die Rohprodukte im Steinbruch unterzogen wurden. Die Endmontage mit Achse und Handhabe muss in nahegelegenen Werkstätten erfolgt sein, die jedoch noch nicht lokalisiert werden konnten. Insgesamt wurden 46 Abbaustellen mit zugehörigen Halden erfasst, die eine Gesamtfläche von etwa 12.000 m² prägen und eine intensive Nutzung belegen. Geologische Beobachtungen verdeutlichen den Einfluss von Klüften auf die unterschiedlichen Abbaustrategien in den beiden Abbaufeldern Alt-Gleichenberg und Hufnagl.

Das Mühlsteinbruchrevier Alt-Gleichenberg/Hufnagl stellt den ersten im Gelände gesicherten römerzeitlichen Mühlsteinbruch Österreichs dar – ein zweites Mühlsteinbruchrevier wurde erst im Jahr 2025 am Pauliberg (Burgenland, Österreich), identifiziert, wo ein vesikulärer Basalt, ein sogenannter Schlackenbasalt, gewonnen wurde. Alt-Gleichenberg/Hufnagl gehört aufgrund seiner entlegenen Lage zu den am besten erhaltenen Beispielen im Imperium Romanum. Die Produkte aus Gleichenberger Trachyandesit wurden nicht nur im Munizipalgebiet der römischen Stadt Flavia Solva (gelegen in Wagna bei Leibnitz) verbreitet, sondern auch in den angrenzenden pannonischen Raum exportiert (z. B. nach Aelium Salla, Zalaötvő, Ungarn), was die wirtschaftliche Bedeutung des Bruchs unterstreicht. Fast alle römerzeitlichen Handdrehmühlen, aber auch größere Steine von Kraftmühlen, die im Südostalpenraum bislang gefunden wurden, bestehen aus Gleichenberger Trachyandesit. Exemplare aus anderen Gesteinen, wie Granatglimmerschiefer, grober vesikulärer Basalt oder Trachybasalt, sind äußerst selten. Die Ergebnisse liefern insgesamt wertvolle Einblicke in Technik, Organisation und Logistik des antiken Bergbaus und positionieren das Gleichenberger Bergbaurevier als zentrale Produktionsstätte römischer Handdrehmühlen im südostalpin-pannonischen Raum.

Almost eroded but still there: Oldest diatreme volcanoes of pre-Quaternary age in the eastern Bohemian Massif, Czechia

Martin Kašing¹, Jakub Jirásek, Dalibor Matýsek, Jan Valenta, Petr Tábořík, Vladislav Rapprich, Tomáš Pek

Martin Kasing, VSB – 1 Technical University of Ostrava, 17. listopadu 2172/15, 70800 Ostrava-Poruba, Czechia

Maar-diatreme volcanoes represent specific volcanic forms, generally accepted to be formed by the explosive phreatomagmatic eruptions in a short time. In the Bruntál Volcanic Field (BVF) within the Nízký Jeseník Upland, Czechia, only two possible indications of maar-diatreme volcanoes have been previously documented (Šešulka et al. 2014; Rapprich and Skácelová 2022), both belonging to the Pleistocene period. Here, we identified two additional diatremes within the BVF, situated at the Biskupice site near Albrechtice Town. One was newly discovered during a comprehensive ground magnetic survey of nearby volcanic dikes. The second structure has been recognized since the 1960s as an unspecified volcanic feature; however, interpretation of our newly acquired data led us to interpret it as a diatreme. Since these volcanoes have no geomorphic expression, a combined geophysical survey was conducted to image their subsurface structure. Magnetic, gravity, and geoelectrical surveys (dipole electromagnetic profiling and electrical resistivity tomography), together with petrographic analysis of excavated material from auger wells and test pits, provided compelling evidence supporting the phreatomagmatic origin of the studied structures. Both circular-shaped bodies exhibit highly magnetic and conductive responses, accompanied by negative anomalies in gravity. The small diameter of the circular structures, coupled with minor negative gravity anomalies and the presence of excavated diatreme breccias, suggest a lower diatreme facies and imply exposure of a deep part of the diatremes at the current erosional surface. Despite unsuccessful attempts at Ar–Ar dating, the Neogene age assumed based on the deep erosional level of the volcanic vents makes them the oldest known maar-diatreme volcanoes in the eastern Bohemian Massif. This study provides very rare information about explosive volcanism in the area of northeastern margin of the Bohemian Massif and is the first-ever study on regional pre-Quaternary phreatomagmatism in the Bruntál Volcanic Field.

References

- Rapprich, V., Skácelová, Z. (2022): Evidences of interactions between Velký Roudný volcanic activity and its hydrous environments. *Geoscience Research Reports*, 55(1): 3–10. (in Czech with English summary) <http://dx.doi.org/10.3140/zpravy.geol.2022.01>
- Šešulka, V., Sedláková, I., Bábek, O., Přichystal, A. (2014): Identification of a buried Late Cenozoic maar-diatreme structure (North Moravia, Czech Republic). *Geologica Carpathica*, 65(6): 471–479. <http://dx.doi.org/10.1515/geoca-2015-0006>
- Corresponding author: martin.kasing@vsb.cz

Beinahe erodiert, aber noch vorhanden: Die ältesten Diatrem-Vulkane aus der Zeit vor dem Quartär im östlichen Böhmischem Massiv, Tschechien

Maar-Diatrem-Vulkane stellen spezifische Vulkanformen dar, von denen allgemein angenommen wird, dass sie durch explosive phreatomagmatische Eruptionen in kurzer Zeit entstanden sind. Im Vulkanfeld Bruntál (BVF) im Nížký Jeseník-Hochland in Tschechien wurden bisher nur zwei mögliche Hinweise auf Maar-Diatrem-Vulkane dokumentiert (Šešulka et al. 2014; Rapprich und Skácelová 2022), die beide aus dem Pleistozän stammen. Hier haben wir zwei weitere Diatreme innerhalb des BVF identifiziert, die sich am Standort Biskupice in der Nähe der Stadt Albrechtice befinden. Eines davon wurde kürzlich bei einer umfassenden magnetischen Bodenuntersuchung der nahegelegenen vulkanischen Dikes entdeckt. Die zweite Struktur ist seit den 1960er Jahren als nicht näher bezeichnete vulkanische Formation bekannt; die Auswertung unserer neu gewonnenen Daten führte uns jedoch zu der Interpretation, dass es sich um ein Diatrem handelt. Da diese Vulkane keine geomorphologischen Merkmale aufweisen, wurde eine kombinierte geophysikalische Untersuchung durchgeführt, um ihre unterirdische Struktur abzubilden. Magnetische, gravimetrische und geoelektrische Untersuchungen (dipolare elektromagnetische Profilaufnahme und elektrische Widerstandstomographie) sowie petrographische Analysen von Material aus Bohrungen und Schürfen lieferten überzeugende Beweise für den phreatomagmatischen Ursprung der untersuchten Strukturen. Beide kreisförmigen Körper weisen eine hohe magnetische und elektrische Leitfähigkeit auf, begleitet von negativen Anomalien in der Schwerkraft. Der kleine Durchmesser der kreisförmigen Strukturen in Verbindung mit geringfügigen negativen Schwerkraftanomalien und dem Vorhandensein von freigelegten Diatrem-Brekzien deutet auf eine untere Diatrem-Fazies hin und lässt auf eine Freilegung eines tiefen Teils der Diatreme an der aktuellen Erosionsfläche schließen. Trotz erfolgloser Versuche einer Ar-Ar-Datierung macht das aufgrund der tiefen Erosionsebene der Vulkanschlote angenommene Neogen-Alter sie zu den ältesten bekannten Maar-Diatrem-Vulkanen im östlichen Böhmischem Massiv. Diese Studie liefert sehr seltene Informationen über den explosiven Vulkanismus im Gebiet des nordöstlichen Randes des Böhmischem Massivs und ist die erste Studie überhaupt über den regionalen phreatomagmatischen Vulkanismus im Bruntál-Vulkanfeld vor dem Quartär. *

*Übersetzt mit DeepL.com

Contrasting lithium isotope signature during weathering of submarine ocean island basalts and mid-ocean ridge basalts

Tomáš Magna¹, Vladislav Rappich¹, Jakub Jirásek², Dalibor Matýšek³, Michaela Vašinová Galiová⁴, Julia Neukampf⁵

¹ Czech Geological Survey, Klárov 3, CZ-118 21 Prague, Czech Republic, tomas.magna@geology.cz

² Faculty of Science, Palacký University Olomouc, 17. listopadu 1192/11, CZ-771 46 Olomouc, Czech Republic

³ Faculty of Mining and Geology, VŠB-Technical University of Ostrava, 17. listopadu 15/2172, CZ-708 00 Ostrava-Poruba, Czech Republic

⁴ Faculty of Chemistry, Brno University of Technology, Purkyňova 118, CZ-612 00 Brno, Czech Republic

⁵ Department of Earth and Environmental Sciences, University of Manchester, Oxford Road, Manchester M13 9PL, United Kingdom

On the seafloor, alteration of mid-ocean ridge basalts (MORB) is primarily driven by pervasive low- to high-temperature hydrothermal activity, which modifies their mineralogy and produces secondary phases such as chlorite, smectite, and epidote. In addition, the formation of these secondary phases alters the major and trace element composition, and affects the radiogenic and stable isotope systematics of several elements, including lithium (Li). Given the large relative mass difference of ~17% between ⁶Li and ⁷Li, Li abundance and isotope systematics have become used extensively to quantify the extent of alteration of aging MORB and carrying uniformly high Li contents combined with high ⁷Li/⁶Li ratios (e.g., Chan1992) acquired via the exchange with isotopically heavy seawater. Contrary to MORB, ocean island basalts (OIB) can weather both sub-marine as well as sub-aerially. The effect of submarine weathering on Li elemental and isotope systematics has remained under-explored although the submarine exposure area of oceanic islands is substantially greater than the aerial part, promoting expeditious weathering. Given the different mineralogy of OIB and MORB, submarine alteration/weathering could result in distinctively different Li signature due to differing response of such mineral assemblages to low-T processes.

In this study, we investigated Li contents and isotope systematics (⁷Li/⁶Li) during submarine weathering of OIB-like magmas using a suite of 22 samples of the so-called Teschenite Association from N Moravia and Silesia, Czech Republic. In addition, four samples of regional sedimentary country rocks were analyzed to estimate potential contamination. The new data are used to (i) evaluate submarine vent-related alteration versus seafloor weathering, (ii) critical role of mineralogy on Li systematics, and (iii) potential implications for large-scale departure of ⁷Li/⁶Li ratios observed for much of the Bohemian Massif.

We acknowledge funding through Czech Science Foundation projects 21-30043S to JJ and 23-07625S to TM.

Corresponding author: tomas.magna@geology.cz

Unterschiedliche Lithium-Isotopensignatur bei der Verwitterung von Basalten untermeerischer Ozeaninseln und mittelozeanischen Rücken

Auf dem Meeresboden wird die Umwandlung von Basalten aus mittelozeanischen Rücken (MORB) in erster Linie durch weit verbreitete hydrothermale Aktivitäten bei niedrigen bis hohen Temperaturen gesteuert, die ihre Mineralogie verändern und sekundäre Phasen wie Chlorit, Smektit und Epidot entstehen lassen. Darüber hinaus verändert die Bildung dieser sekundären Phasen die Zusammensetzung der Haupt- und Spurenelemente und beeinflusst die radiogene und stabile Isotopensystematik mehrerer Elemente, darunter Lithium (Li). Angesichts des relativ großen Massenunterschieds von ~17 % zwischen 6Li und 7Li werden die Li-Häufigkeit und die Isotopensystematik häufig verwendet, um das Ausmaß der Veränderung von „alternden“ MORB zu quantifizieren, die einen gleichmäßig hohen Li-Gehalt in Kombination mit hohen $7\text{Li}/6\text{Li}$ -Verhältnissen aufweisen (z. B. Chan 1992), die durch den Austausch mit isotopisch schwerem Meerwasser erlangt wurden. Im Gegensatz zu MORB können Ozeanische Inselbasalte (OIB) sowohl unter Wasser als auch an der Luft verwittern. Die Auswirkungen der Unterwasserverwitterung auf die Element- und Isotopensystematik von Li sind noch wenig erforscht, obwohl die unter Wasser liegende Fläche von Ozeaninseln wesentlich größer ist als der über Wasser liegende Teil, was eine schnellere Verwitterung begünstigt. Angesichts der unterschiedlichen Mineralogie von OIB und MORB könnte die Unterwasserveränderung/-verwitterung zu deutlich unterschiedlichen Li-Signaturen führen, da solche Mineralzusammensetzungen unterschiedlich auf Prozesse bei niedrigen Temperaturen reagieren.

In dieser Studie untersuchten wir den Li-Gehalt und die Isotopensystematik ($7\text{Li}/6\text{Li}$) während der submarinen Verwitterung von OIB-ähnlichen Magmen anhand einer Reihe von 22 Proben der sogenannten Teschenite Association aus Nordmähren und Schlesien in der Tschechischen Republik. Zusätzlich wurden vier Proben regionaler sedimentärer Nebengesteine analysiert, um eine mögliche Kontamination abzuschätzen. Die neuen Daten werden verwendet, um (i) die hydrothermale Alteration im Vergleich zur Verwitterung am Meeresboden zu bewerten, (ii) die entscheidende Rolle der Mineralogie für die Li-Systematik zu untersuchen und (iii) mögliche Auswirkungen auf die großräumige Abweichung der $7\text{Li}/6\text{Li}$ -Verhältnisse zu ermitteln, die für einen Großteil des Böhmisches Massivs beobachtet wurde.

Wir danken der Czech Science Foundation für die Finanzierung der Projekte 21-30043S (JJ) und 23-07625S (TM). *

*Übersetzt mit DeepL.com

"The Regional rock box" - a networked school project in the Steirisches Vulkanland

Anna Knaus-Maurer¹ & Ingomar Fritz²

¹ Verein zur Förderung des Steirischen Vulkanlandes, Gniebing 148, 8330 Feldbach, Austria

² Geologie & Paläontologie, Universalmuseum Joanneum, Weinzöttlstrasse 16, 8045 Graz, Austria

"Rock boxes" are a good possibility to make geology understandable in school. Depending on the composition (rock and/or mineral selection), these have different educational objectives. Often, they are systematically selected (typical representatives of rock-groups) or regionally occurring rocks are used. The economic significance and use of rocks/minerals are also often addressed in the accompanying object descriptions.

The geological subsoil in the Steirisches Vulkanland consists of sedimentary rocks (clay, silt, sand, gravel, limestone) and volcanic rocks (trachyte, scoria basalt, tuff), as well as their corresponding variations. Some of the rocks listed have/had economic significance in the various communities and are/were also used. In addition to a few large quarries and clay pits, the region also had numerous small rock mining sites as well as sand and gravel pits, most of which are now overgrown.

As part of the transnational LEADER project "Erlebnis Geologie" a regional rock collection was developed jointly with several schools in the region. A total of 15 school classes from different communities were participating in the project. Based on the regional geology, characteristic rocks were assigned to the communities in advance. Each participating school class studied a rock type found in the school community.

After a school lesson introducing the project, a one-day field trip (excursion to collect rocks, describe the outcrop, and familiarize yourself with methodical work in the field) and a joint workshop (examination, description, etc.) were held. The students collected "their rocks" not only for themselves, but also for all planned rock boxes. The young people then conducted independent research on the rocks they had collected and learned about in their family and friends' environments. All information was then compiled and summarized. Each participating school class also jointly created a profile (rock name, synonyms, description, variations, special features, history of origin, occurrence, distribution, use/application) of the rock they studied.

The project concluded with an event where all school classes came together to present their work and results, as well as to "swap" the collected objects and the associated information. The students filled the prepared rock cases with the hand-carved specimens and profiles: Everyone contributed a piece – everyone got everything.

The dynamic geological history of the region in the rock case: supplemented with didactically prepared content (e.g., presentations, animations), these are now available as teaching materials in all participating schools – „Erlebnis Geologie“!

Corresponding author: knaus-maurer@vulkanland.at

"Die regionale Gesteinskiste" - ein vernetztes Schulprojekt im Steirischen Vulkanland

„Gesteinskoffer“ sind eine gute Möglichkeit, Geologie im Schulunterricht begreifbar zu machen. Je nach Zusammenstellung (Gesteins- und/oder Mineralienauswahl) haben diese unterschiedliche Ausbildungsziele. Oft handelt es sich dabei um eine systematische Auswahl (typische Vertreter der Gesteinsgruppen) oder es werden regional vorkommende Gesteine verwendet. Auch die wirtschaftliche Bedeutung und die Verwendung von Gesteinen / Mineralien werden häufig in den beiliegenden Objektbeschreibungen thematisiert.

Der geologische Untergrund im Steirischen Vulkanland besteht aus Sedimentgesteinen (Ton, Silt, Sand, Kies, Kalkstein) und Vulkaniten (Trachyt, [Schlacken-]Basalt, Tuff) sowie den entsprechenden Variationen. Manche der angeführten Gesteine haben/hatten in den verschiedenen Gemeinden eine wirtschaftliche Bedeutung und werden/wurden auch genutzt. Neben wenigen großen Steinbrüchen und Tongruben gab es in der Region eine Vielzahl von kleinen Steinentnahmestellen und Sand- Kiesgruben, die mittlerweile aber meist zugewachsen sind.

Im Rahmen des transnationalen LEADER Projektes „Erlebnis Geologie“ wurde eine regionale Gesteinskiste mit mehreren Schulen aus der Region gemeinsam entwickelt. Aus unterschiedlichen Gemeinden beteiligten sich insgesamt 15 Schulklassen an dem Vorhaben. Vorweg wurden den Gemeinden, basierend auf der regionalen Geologie, charakteristische Gesteine zugeordnet. Jede mitwirkende Schulklasse beschäftigte sich mit einer Gesteinsart, die in der Schulgemeinde vorkommt.

Nach einer Schulstunde mit Vorstellung des Projektes wurden ein 1-tägiger Lehrausgang (Exkursion zum Aufsammeln, Aufschlussbeschreibung - Kennenlernen methodischer Arbeit im Gelände) und ein gemeinsamer Workshop (untersuchen, beschreiben, ...) durchgeführt. Die Schülerinnen und Schüler sammelten „*ihr Gestein*“ nicht nur für sich auf, sondern auch für alle geplanten Gesteinskoffer. Nachfolgend haben die Jugendlichen selbständige Recherchen zu den aufgesammelten und erlernten Gesteinen in ihrem familiären/freundschaftlichen Umfeld durchgeführt. Danach wurden alle Informationen zusammengetragen und zusammengefasst. Gemeinsam wurde auch von jeder teilnehmenden Schulklasse ein Steckbrief (Gesteinsbezeichnung, Synonyma, Beschreibung, Variationen, Besonderheiten, Entstehungsgeschichte, Vorkommen, Verbreitung, Nutzung/Verwendung) zum bearbeiteten Gestein erstellt.

Den Projektabschluss bildete eine Veranstaltung, bei der alle Schulklassen zusammenkamen und Ihre Arbeiten/Ergebnisse präsentierten sowie die aufgesammelten Objekte mit den zugehörigen Informationen gegenseitig „tauschten“: die Jugendlichen befüllten die vorbereiteten Gesteinskoffer mit den Handstücken und Steckbriefen: *Jeder erledigte einen Teil – alle haben Alles.*

Die dynamische Erdgeschichte der Region in der Gesteinskiste: ergänzt mit didaktisch aufbereiteten Inhalten (z.B. Präsentationen, Animationen) sind diese nun als Unterrichtsmaterialien in allen teilnehmenden Schulen vorhanden – Erlebnis Geologie!

The role of geoheritage and geodiversity of Saudi Arabia in the light of sustainable development and natural resource management within geosystem services concept

Károly Németh^{1,2}, Mohammed Rashad Moufti¹, Turki Sehli¹

¹ Saudi Geological Survey, Jeddah, Kingdom of Saudi Arabia

² Institute of Earth Physics and Space Science, Sopron, Hungary

Over the past decade, there has been a marked increase in interest within the field of geoheritage. Geoheritage is now widely acknowledged as a critical aspect of Earth science education, fostering connections between people and the planet through its scientific, educational, and cultural significance. It provides essential insights into Earth's historical events and serves as a bridge linking natural phenomena with human comprehension of geological processes. The concept of geodiversity has been suggested as the "numerical density" of abiotic elements within a given area; paralleling frameworks used in biodiversity studies. However, applying this approach presents challenges: while biodiversity is tied to biotic parameters that can be quantitatively assessed, geological features are inherently more complex. Abiotic components manifest in diverse geoforms and are characterized by qualitative attributes such as rock types, mineral compositions, and structural architectures, whose relative abundance can be evaluated at global, regional, or local levels. As a result, geodiversity encapsulates both qualitative and quantitative aspects, creating implementation challenges. Geoconservation seeks to safeguard geoheritage—including geological specimens, documents, maps, objects, and sites—from degradation resulting from urban development, natural weathering, and other factors. Abandoned mine sites, which possess notable social, cultural, and scientific value, provide valuable insight into historic activities and facilitate opportunities for further study and exploration. Efforts to preserve monogenetic volcanic fields in Saudi Arabia exemplify the need to balance resource exploitation with conservation. Urbanization and economic demands pose significant risks to geoconservation, highlighting the necessity for sustainable management strategies. This highlights exploration and future mining sites in Saudi Arabia's mineral resource strategy. Key targets include scoria, alluvial sediments, and critical minerals like lithium, mainly located in large basins and volcanic systems such as Harrat (or volcanic fields) Al Rahat, Harrat Lunayyir, and maar volcanoes in Harrats Hutaymah and Kishb. For the conservation and tourism development site, it is advisable to formulate an economic model grounded in established reports on geoheritage values and the spatial distribution of geosites. While such development initiatives can increase the region's tourism potential, they may also compromise its natural integrity and thereby diminish its geoheritage value. Therefore, it is essential to strike a balance between these competing priorities during economic planning and to conduct thorough assessments of volcanic and seismic hazards to accurately determine the cost-benefit ratio of the proposed development project. Our research shows that developing vulnerable volcanic geosites in the Harrat Lunayyir area could significantly harm the region's geoheritage integrity and reduce geodiversity. The area includes ash-covered regions and well-preserved scoria cones that are especially fragile, and even controlled development could be damaging. Unlike Harrat Lunayyir, urban expansion in Harrat Rahat—particularly around Al Madinah—has already led to the loss or degradation of key volcanic geosites, diminishing their value for geoeducation and geotourism (Figures 1 & 2). A comprehensive geosystem conservation strategy can play a pivotal role in mitigating the loss of valuable geosites resulting from non-renewable resource exploitation. Accurate characterization and quantification of geodiversity are fundamental to ensuring sustainability. The application of scientifically reproducible methodologies for estimating geodiversity and selecting geosites supports complex economic evaluations, which must incorporate feasibility

studies, risk assessments, and impact modeling. For instance, open pit mining activities such as scoria extraction significantly alter the landscape yet provide essential geological data on volcanic processes—an important asset exemplified by Saudi Arabia's volcanic fields. This information is crucial for both public education and expert analyses pertinent to future volcanic events. In conclusion, implementing a cost-benefit matrix in accordance with the geosystem services framework allows for a balanced assessment of the economic advantages of resource extraction against potential landscape degradation. Although mining operations can facilitate access to significant geosites and enhance geohazard resilience education, this relationship is inherently non-linear. There exist critical thresholds beyond which continued extraction irreparably compromise landscape integrity, negating the benefits associated with increased geological exposure. Furthermore, unrehabilitated mining sites may result in permanent losses unless they are integrated into geoconservation and geodiversity initiatives. Therefore, it is recommended that geoheritage, geosystem services, and geodiversity considerations be embedded at the earliest stages of mineral resource exploration. Continuous monitoring of geoheritage values throughout exploitation, along with the adaptive repurposing of disused quarry sites for educational purposes—particularly within volcanic regions—should form an integral component of natural hazard resilience programs.

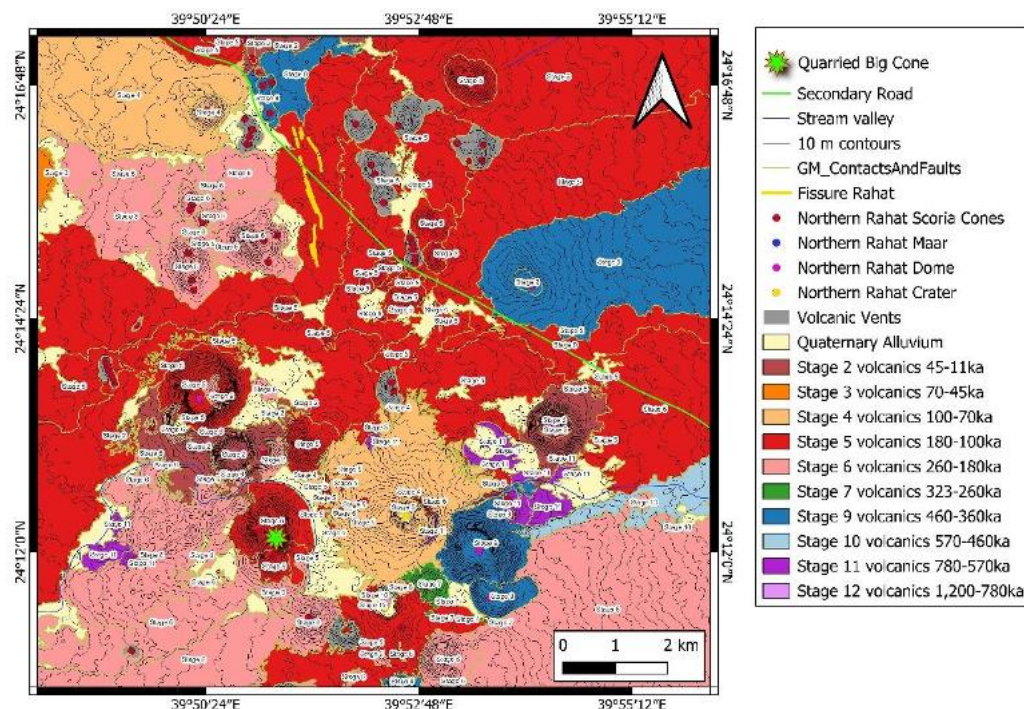


Fig. 1: High geodiversity region of the northern Harrat Rahat with various young monogenetic volcanoes. Scoria extraction removed a large part of one of the largest scoria cones of the region (green star). Geology data is from the USGS – SGS 1 to 75k scale Geology map of Northern Harrat Rahat.

Abb. 1: Region mit hoher geologischer Vielfalt im nördlichen Harrat Rahat mit verschiedenen jungen monogenetischen Vulkanen. Durch die Gewinnung von Schlacke wurde ein großer Teil eines der größten Schlackenkegel der Region (grüner Stern) abgetragen. Die geologischen Daten stammen aus der geologischen Karte des nördlichen Harrat Rahat im Maßstab 1:75.000 der USGS – SGS

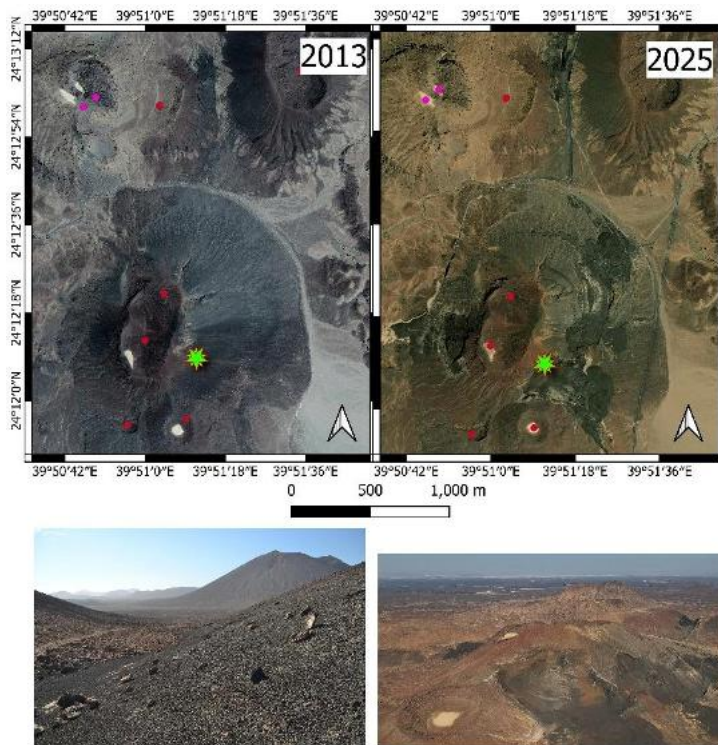


Fig. 2: Satellite imagery shows the impact of scoria extraction of one of the iconic large scoria cones near Al Madinah. The two images reflect 12-year difference. Below, the large cone shown from the ground (left bottom) and drone image (right bottom).

Abb. 2: Satellitenbilder zeigen die Auswirkungen der Schlackengewinnung an einem der berühmten großen Schlackenkegel in der Nähe von Al Madinah. Zwischen den beiden Bildern liegen 12 Jahre Zeit. Unten ist der große Kegel vom Boden aus (unten links) und als Drohnenbild (unten rechts) zu sehen.

Corresponding author: nemeth.k@sgs.gov.sa

Die Rolle des geologischen Erbes und der geologischen Vielfalt Saudi-Arabiens im Hinblick auf nachhaltige Entwicklung und Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen im Rahmen des Konzepts der Geosystemdienstleistungen

In den letzten zehn Jahren hat das Interesse am Thema Geerbe deutlich zugenommen. Geerbe wird heute weithin als wichtiger Aspekt der geowissenschaftlichen Bildung anerkannt, der durch seine wissenschaftliche, pädagogische und kulturelle Bedeutung Verbindungen zwischen Menschen und dem Planeten fördert. Es liefert wichtige Einblicke in die historischen Ereignisse der Erde und dient als Brücke zwischen Naturphänomenen und dem menschlichen Verständnis geologischer Prozesse. Das Konzept der Geodiversität wurde als „numerische Dichte“ abiotischer Elemente innerhalb eines bestimmten Gebiets vorgeschlagen, analog zu den in Biodiversitätsstudien verwendeten Rahmenwerken. Die Anwendung dieses Ansatzes birgt jedoch Herausforderungen: Während die Biodiversität an biotische Parameter gebunden ist, die quantitativ bewertet werden können, sind geologische Merkmale von Natur aus komplexer. Abiotische Komponenten manifestieren sich in vielfältigen Geoformen/Landformen und zeichnen sich durch qualitative Merkmale wie Gesteinsarten, Mineralzusammensetzungen und strukturelle Architekturen aus, deren relative Häufigkeit auf globaler, regionaler oder lokaler Ebene bewertet werden kann. Infolgedessen umfasst die Geodiversität sowohl qualitative als auch quantitative Aspekte, was zu Herausforderungen bei der Umsetzung führt. Geokonservierung zielt darauf ab, das geologische Erbe – darunter geologische Proben, Dokumente, Karten, Objekte und Stätten –

vor Zerstörung durch Stadtentwicklung, natürlicher Verwitterung und anderen Faktoren zu schützen. Verlassene Bergbaustätten, die einen bemerkenswerten sozialen, kulturellen und wissenschaftlichen Wert besitzen, bieten wertvolle Einblicke in historische Aktivitäten und eröffnen Möglichkeiten für weitere Studien und Erkundungen. Die Bemühungen zur Erhaltung monogenetischer Vulkanfelder in Saudi-Arabien veranschaulichen die Notwendigkeit, einen Ausgleich zwischen Ressourcennutzung und Naturschutz zu finden. Die Urbanisierung und wirtschaftliche Anforderungen stellen erhebliche Risiken für die Geokonservierung dar und unterstreichen die Notwendigkeit nachhaltiger Managementstrategien. Dies verdeutlicht die Bedeutung der Exploration und Mineralressourcenstrategie zukünftiger Abbaustätten Saudi-Arabiens. Zu den wichtigsten Zielen gehören Schlacken, alluviale Sedimente und kritische Mineralien wie Lithium, die hauptsächlich in großen Becken und Vulkansystemen wie Harrat (oder Vulkanfelder) Al Rahat, Harrat Lunayyir sowie Maar-Vulkane in Harrats Hutaymah und Kishb vorkommen. Im Sinne des Naturschutzes und der Tourismusentwicklung ist es ratsam, ein wirtschaftliches Modell zu entwickeln, das auf etablierten Berichten über den Wert des geologischen Erbes und der räumlichen Verteilung der Aufschlüsse basiert. Solche Entwicklungsinitiativen können zwar das touristische Potenzial der Region steigern, aber auch ihre natürliche Integrität beeinträchtigen und damit ihren Wert als geologisches Erbe mindern. Daher ist es unerlässlich, bei der Planung ein Gleichgewicht zwischen diesen konkurrierenden Prioritäten herzustellen und eine gründliche Bewertung der vulkanischen und seismischen Gefahren durchzuführen, um das Kosten-Nutzen-Verhältnis des vorgeschlagenen Entwicklungsprojekts genau zu bestimmen. Unsere Untersuchungen zeigen, dass die Erschließung gefährdeter vulkanischer Aufschlüsse im Gebiet Harrat Lunayyir die Integrität des geologischen Erbes der Region erheblich beeinträchtigen und die geologische Vielfalt verringern könnte. Das Gebiet umfasst aschebedeckte Regionen und gut erhaltene Schlackenkegel, die besonders empfindlich sind, sodass selbst eine kontrollierte Entwicklung Schäden verursachen könnte. Im Gegensatz zu Harrat Lunayyir hat die städtische Expansion in Harrat Rahat – insbesondere um Al Madinah – bereits zum Verlust oder zur Verschlechterung wichtiger vulkanischer Aufschlüsse geführt, wodurch deren Wert für die Geo-Bildung und den Geotourismus gemindert wurde (Abb. 5, Abb. 6). Eine umfassende Strategie zum Schutz des Geosystems kann eine entscheidende Rolle dabei spielen, den Verlust wertvoller Aufschlüsse infolge der Ausbeutung nicht erneuerbarer Ressourcen zu mindern. Eine genaue Charakterisierung und Quantifizierung der Geodiversität ist für die Gewährleistung der Nachhaltigkeit von grundlegender Bedeutung. Die Anwendung wissenschaftlich reproduzierbarer Methoden zur Abschätzung der Geodiversität und zur Auswahl von Aufschlüssen unterstützt komplexe wirtschaftliche Bewertungen, die Machbarkeitsstudien, Risikobewertungen und Wirkungsmodellierungen umfassen müssen. Beispielsweise verändern Tagebauaktivitäten, wie die Gewinnung von Schlacke die Landschaft erheblich, liefern jedoch wichtige geologische Daten über vulkanische Prozesse – ein wichtiger Vorteil, wie das Beispiel der Vulkanfelder in Saudi-Arabien zeigt. Diese Informationen sind sowohl für die öffentliche Bildung als auch für Expertenanalysen im Hinblick auf zukünftige vulkanische Ereignisse von entscheidender Bedeutung. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Anwendung einer Kosten-Nutzen-Matrix in Übereinstimmung mit dem Rahmenwerk für Geosystemdienstleistungen eine ausgewogene Bewertung der wirtschaftlichen Vorteile der Rohstoffgewinnung gegenüber einer möglichen Landschaftsverschlechterung ermöglicht. Obwohl Bergbauaktivitäten den Zugang zu bedeutenden Aufschlüssen erleichtern und zu einer Verbesserung im Bereich der Geogefahren-Resilienz führen kann, ist diese Beziehung von Natur aus nicht linear. Es gibt kritische Schwellenwerte, ab denen ein fortgesetzter Abbau die Integrität der Landschaft irreparabel beeinträchtigt und die mit einer erhöhten Geodiversität verbundenen Vorteile zunichtemacht. Darüber hinaus können nicht sanierte Bergbaustandorte zu dauerhaften Verlusten führen, wenn sie nicht in Initiativen zur Erhaltung und Aufklärung über die Geologie integriert werden. Daher wird empfohlen, Überlegungen zum geologischen Erbe, zu

geosystemischen Dienstleistungen und zur geologischen Vielfalt bereits in den frühesten Phasen der Exploration von Bodenschätzen zu berücksichtigen. Das kontinuierliche Monitoring der Werte des geologischen Erbes während des gesamten Abbaus sowie die adaptive Umnutzung stillgelegter Steinbrüche für Bildungszwecke – insbesondere in vulkanischen Regionen – sollten ein integraler Bestandteil von Resilienz-Programmen gegenüber Naturgefahren sein. *

*Übersetzt mit DeepL.com

Basalts of the harrats as heritage stone for Saudi Arabia

Károly Németh^{1,2,3,4}, Mohammed Rashad Moufti¹, Turki Sehli¹, Iyaed Zalmout¹, Yahya Mufarreh¹, and Abdulrahman Sowaigh¹

¹ Saudi Geological Survey, Jeddah, Kingdom of Saudi Arabia

² Institute of Earth Physics and Space Science, Sopron, Hungary

³ Massey University, Palmerston North, New Zealand

⁴ Geoconservation Trust Aotearoa New Zealand, Opotiki

Basalt is one of the most prevalent rock types on Earth. While the majority of basaltic rocks are associated with oceanic crust and remain concealed beneath the world's oceans, in rare cases they are positioned adjacent to continental lithospheric zones or emplaced onto land as part of collision belts, such as ophiolite complexes found in Cyprus, Oman, Iran, and New Zealand. These locations preserve significant mineralogical and geological records of basalt petrogenesis. Basalts also play a key role in major mantle plume events that have affected continental lithospheres throughout Earth's history, resulting in extensive flood basalt provinces—including the Deccan Traps (India), Columbia River Basalt Group (USA), Siberian Traps (Russia), Karoo (Southern Africa), Ethiopia–Yemen large igneous province, Parana-Etendeka (Brazil and Namibia), and the basaltic plateaus of Armenia within a continental collision context. Additionally, substantial basaltic oceanic plateaus, such as the Ontong-Java, Manihiki, Campbell, and Kermadec plateaus, have formed through voluminous basalt outpourings on oceanic crust and are now largely submerged beneath the Southwest Pacific Ocean. Basaltic magmas have generated hotspot tracks and oceanic island volcanoes, such as those in Hawaii and Samoa, significantly shaping the geocultural landscape of these regions where basalt serves as a foundational element for cultural practices. Furthermore, a wide array of basaltic volcanic regions is linked to continental rifting or purely intracontinental settings, ranging from expansive lava fields in Saudi Arabia, Jordan, Syria, and Mexico to dispersed monogenetic volcanic fields composed of numerous small-volume volcanoes, providing abundant local building materials for various cultures. Geologically significant volcanic sites are an irreplaceable resource with scientific, educational, cultural, and tourism value. These locations also have notable aesthetic, historical, ecological, and spiritual importance, making volcanic geodiversity vital for geotourism. Features like craters, domes, dome flows, and lava flows represent key aspects of this geomorphological-volcanological heritage.

The Heritage Stone Subcommittee, formed by the International Union of Geological Sciences (IUGS) in 2011 (<https://iugs-geoheritage.org/subcomission-on-stones/>), identifies stones with historical significance for inclusion in the Global Heritage Stone Resource (GHSR). To date, 55 stones have been designated (<https://iugs-geoheritage.org/designations-stones/>), with none currently from Saudi Arabia.

Saudi Arabia is home to distinctive rocks that have the potential to be designated as national heritage stones. A recent initiative spearheaded by Crown Prince Mohammed bin Salman resulted in the development of the Saudi Architecture Characters Map (<https://www.arabnews.com/node/2593817/saudi-arabia>), aimed at revitalizing cultural heritage within the built environment. This initiative underscores the significance of regional architectural styles, highlighting their geocultural context, functional application, and interaction with society. Additionally, it contributes to the preservation of traditional building materials for future use, thereby safeguarding Saudi Arabia's cultural legacy and reinforcing a sense of place and connection to the nation's landscape.

Rapid economic growth has led to a surge in foreign building materials, transforming both public and private architecture and altering Arabia's geocultural landscape. Identifying

national heritage stones is vital for preserving the country's original character and supporting tourism, education, and conservation.

A Global Heritage Stone Resource (GHSR), as defined by the IUGS Subcommittee on Heritage Stones, is a type of natural stone that has been widely used over an extended historical period and holds cultural recognition. This designation does not carry commercial value, but it provides information about the development of past civilizations. The subcommission records the geological characteristics of these stones for future reference and identifies monuments and historical quarries constructed from them.

The basalts of western Arabia's harrats, or lava fields, form the largest Neogene–Quaternary monogenetic volcanic province on Earth and have shaped the region's landscape and patterns of human movement since the Paleolithic era. Basalts are dense, strong, and dark materials used in construction, differing from other building resources found locally. The harrats are expansive areas of dark rock, known regionally as harrats, that characterize the terrain of western Arabia. Extending nearly 3,000 kilometers and reaching about 1,000 meters above sea level atop the Arabian Plate, they define a significant area in western Arabia. The relatively flat surfaces of the harrats may have enabled human migration since the Paleolithic period.

Basalt dominates this region, shaping both its landscape and cultural heritage. While not directly traded, these rocks influenced Arabian trade routes for centuries. The basaltic harrats provided elevated terrain, lava tubes for water flow, and fertile areas that supported vegetation and early human settlement.

Basalt has been used as foundation stones and facades in building construction throughout history. In the Early Islamic period, especially during the Ottoman Empire, basalt was commonly employed in the construction of mosques, railway stations, fortresses, and government buildings. Basalt is also considered a geo-educational resource for increasing awareness of volcanic hazards in Saudi society.

Corresponding author: nemeth.k@sgs.gov.sa

Basalte der Harrats als Denkmalstein Saudi-Arabiens

Basalt ist eine der häufigsten Gesteinsarten auf der Erde. Während die meisten Basaltgesteine in der ozeanischen Kruste unter den Weltmeeren verborgen bleiben, befinden sie sich in seltenen Fällen in der Nähe kontinentaler lithosphärischer Zonen oder sind als Teil von Kollisionsgürteln auf dem Land zu finden, wie beispielsweise die Ophiolithkomplexe in Zypern, Oman, Iran und Neuseeland. An diesen Orten sind wichtige mineralogische und geologische Aufzeichnungen über die Entstehung von Basalt erhalten geblieben. Basalte spielen auch eine Schlüsselrolle bei großen Mantelplume-Ereignissen, die im Laufe der Erdgeschichte die kontinentale Lithosphäre beeinflusst haben und zu ausgedehnten Flutbasaltprovinzen geführt haben – darunter die Deccan-Trapps (Indien), die Columbia-River-Basaltgruppe (USA), die Sibirischen Trapps (Russland), Karoo (südafrikanischer Kontinent), die große magmatische Provinz Äthiopien-Jemen, Parana-Etendeka (Brasilien und Namibia) und die Basaltplateaus Armeniens im Kontext einer kontinentalen Kollision. Darüber hinaus haben sich durch umfangreiche Basaltströme auf der ozeanischen Kruste bedeutende basaltische ozeanische Plateaus wie die Ontong-Java-, Manihiki-, Campbell- und Kermadec-Plateaus gebildet, die heute größtenteils unter dem Südwestpazifik liegen. Basaltisches Magma hat Hotspot-Spuren und ozeanische Inselvulkane wie die in Hawaii und Samoa hervorgebracht und damit die geokulturelle Landschaft dieser Regionen maßgeblich geprägt, in denen Basalt als grundlegendes Element für kulturelle Praktiken dient. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von basaltischen

Vulkanregionen, die mit kontinentalen Riftgebieten oder rein intrakontinentalen Umgebungen in Verbindung stehen, von ausgedehnten Lavafeldern in Saudi-Arabien, Jordanien, Syrien und Mexiko bis hin zu verstreuten monogenetischen Vulkanfeldern, die aus zahlreichen kleinen Vulkanen bestehen und reichlich lokale Baumaterialien für verschiedene Kulturen liefern. Geologisch bedeutende Vulkanstandorte sind eine unersetzliche Ressource mit wissenschaftlichem, pädagogischem, kulturellem und touristischem Wert. Diese Orte haben auch eine bemerkenswerte ästhetische, historische, ökologische und spirituelle Bedeutung, wodurch die vulkanische Geodiversität für den Geotourismus von entscheidender Bedeutung ist. Merkmale wie Krater, Kuppeln, Kuppelflüsse und Lavaströme stellen wichtige Aspekte dieses geomorphologisch-vulkanologischen Erbes dar.

Die Unterkommission für Kulturerbe-Gesteine, die 2011 von der Internationalen Union für Geologische Wissenschaften (IUGS) gegründet wurde (<https://iugs-geoheritage.org/subcomission-on-stones/>), identifiziert Gesteine von historischer Bedeutung für die Aufnahme in die Global Heritage Stone Resource (GHSR). Bis heute wurden 55 Steine ausgewiesen (<https://iugs-geoheritage.org/designations-stones/>), darunter derzeit keine aus Saudi-Arabien.

Saudi-Arabien beherbergt einzigartige Gesteine, die das Potenzial haben, als nationale Heritage Stones ausgewiesen zu werden. Eine kürzlich von Kronprinz Mohammed bin Salman ins Leben gerufene Initiative führte zur Entwicklung der Saudi Architecture Characters Map (<https://www.arabnews.com/node/2593817/saudi-arabia>), die darauf abzielt, das kulturelle Erbe innerhalb der bebauten Umwelt wiederzubeleben. Diese Initiative unterstreicht die Bedeutung regionaler Architekturstile und hebt deren geokulturellen Kontext, ihre funktionale Anwendung und ihre Interaktion mit der Gesellschaft hervor. Darüber hinaus trägt sie zur Erhaltung traditioneller Baumaterialien für die zukünftige Nutzung bei und schützt so das kulturelle Erbe Saudi-Arabiens und stärkt das Gefühl der Zugehörigkeit und Verbundenheit mit der Landschaft des Landes.

Das rasante Wirtschaftswachstum hat zu einem Anstieg ausländischer Baumaterialien geführt, wodurch sich sowohl die öffentliche als auch die private Architektur und die geokulturelle Landschaft Arabiens verändert hat. Die Identifizierung nationaler Kulturerbe-Stätten ist für die Erhaltung des ursprünglichen Charakters des Landes und die Förderung von Tourismus, Bildung und Naturschutz von entscheidender Bedeutung.

Ein „Steinvorkommen als Weltkulturerbe“ (GHSR) ist laut Definition der IUGS-Unterkommission für Denkmalsteine eine Art von Naturstein, der über einen langen historischen Zeitraum hinweg weit verbreitet war und kulturelle Anerkennung genießt. Diese Bezeichnung hat keinen kommerziellen Wert, liefert jedoch Informationen über die Entwicklung vergangener Zivilisationen. Die Unterkommission dokumentiert die geologischen Eigenschaften dieser Steine für zukünftige Referenzzwecke und identifiziert Denkmäler und historische Steinbrüche, die aus ihnen errichtet wurden.

Die Basalte der Harrats (Lavafelder) im Westen Arabiens bilden die größte monogenetische Vulkanprovinz des Neogens und Quartärs auf der Erde und prägen seit der Altsteinzeit die Landschaft und die Verbreitung der Menschen in dieser Region. Basalte sind dichte, feste und dunkle Materialien, die im Bauwesen verwendet werden und sich von anderen lokal vorkommenden Baumaterialien unterscheiden. Die Harrats sind ausgedehnte Gebiete mit dunklem Gestein, die in der Region als Harrats bekannt sind und das Gelände Westarabiens prägen. Sie erstrecken sich über fast 3.000 Kilometer und erreichen auf der Arabischen Platte eine Seehöhe von etwa 1.000 Metern. Sie bilden ein bedeutendes Gebiet in Westarabien. Die relativ flachen Oberflächen der Harrats haben möglicherweise seit der Altsteinzeit die Migration von Menschen ermöglicht.

Basalt dominiert diese Region und prägt sowohl ihre Landschaft als auch ihr kulturelles Erbe. Obwohl diese Gesteine nicht direkt gehandelt wurden, beeinflussten sie jahrhundertlang die arabischen Handelswege. Die basaltischen Harrats bildeten erhöhtes Gelände, Lavatunnel

für die Wasserwegigkeit und fruchtbare Gebiete, die Vegetation und frühe menschliche Besiedlung ermöglichten.

Basalt wurde im Laufe der Geschichte als Fundamentstein und Fassadenmaterial im Bauwesen verwendet. In der frühen islamischen Zeit, insbesondere während des Osmanischen Reiches, wurde Basalt häufig für den Bau von Moscheen, Bahnhöfen, Festungen und Regierungsgebäuden verwendet. Basalt gilt auch als geowissenschaftliche Ressource, um das Bewusstsein für vulkanische Gefahren in der saudischen Gesellschaft zu schärfen. *

*Übersetzt mit DeepL.com

Recurrent growth of maar-hosted pyroclastic cone – case of Pleistocene Bažina maar, Western Bohemia

Vladislav Rapprich¹, Zsolt Benkó², Jan Hošek¹, Tomáš Magna¹, Ondřej Pour¹, Zuzana Čvančarová¹, Stuart Thomson³, Pavla Hrubcová⁴, Tomáš Fischer⁵

¹ Czech Geological Survey, Klárov 3, 118 21 Prague, Czech Republic

² Institute for Nuclear Research, Bem tér 18/c, 4026 Debrecen, Hungary

³ Department of Geosciences, University of Arizona, 1040 E. 4th Street, AZ 85721 Tucson, USA

⁴ Institute of Geophysics, Czech Academy of Sciences, Boční II/1401, 141 00 Prague, Czech Republic

⁵ Faculty of Science, Charles University in Prague, Albertov 6, 128 00 Prague, Czech Republic

Maar-diatreme volcanoes are common volcanic features occurring in all tectonic settings, either within monogenetic volcanic fields or as parasitic craters associated with large composite volcanoes. They are generally accepted to be formed in a short time by the explosive phreatomagmatic eruptions, which result from violent expansion of magmatic gas or steam, or when groundwater comes into the contact with hot lava or magma. With persisted magma supply, subsequent volcanic activity may form a pyroclastic cone situated on the maar edge or within the maar crater. Current research has revealed complex eruptive and magmatic history of some maar-diatreme volcanoes, but maar-hosted pyroclastic cones remained beyond the main research focus. Our research is based on two boreholes drilled within the Cenozoic Bažina maar (Hrubcová et al. 2023) in Western Bohemia, accidentally penetrating a sequence of post-maar pyroclastic deposits with associated lavas. In contrast to well-preserved morphology suggesting a possible Pleistocene age of the volcanic structure, geochronological analyses revealed a Miocene age. Detailed interpretation of the morphology, combined with a study of the drill-cores, indicates successive emergence of pyroclastic cones within the maar crater. The drilling also revealed a layer of fossil weathering pointing to protracted interruption of volcanic activity. This temporal gap between two main eruptive periods is confirmed by K-Ar geochronology. Earlier cone formed at around 21 Ma, followed by volcanic quiescence and circulation of phosphate-rich fluids forming 19 Myr old apatite vein. The later eruptive activity occurred at around 15.5 Ma. Although Bažina maar lacks a recent crater lake, the pyroclastic sequence documents transition from hydromagmatic (Surtseyan) to magmatic (Strombolian) eruptive style during growth of each cone. Early-stage hydromagmatic eruptions result from interaction of erupting magma with lake water. As the pyroclastic cone emerged above the water level, the eruptive style shifted towards dry Strombolian style. Composition of all erupted magmas ranges from olivine nephelinite to melilite-bearing olivine nephelinite, irrespective to the eruptive stage. Bažina maar documents eruptive style of maar-hosted pyroclastic cones, controlled by the crater lake in its early stages. Though the volcano is small, detailed investigation reveals recurrent volcanic activity within this modest volcanic edifice spanning over 5 million years, indicating possible reactivation of feeding conduits of apparently extinct monogenetic volcanoes.

We acknowledge funding through Czech Science Foundation project 23-07490K and Czech Geological Survey project 311400.

References

Hrubcová, P., Fischer, T., Rapprich, V., et al. (2023). Earth and Space Science, 10,

Corresponding author: vladislav.rappich@geology.cz

Wiederkehrendes Wachstum eines pyroklastischen Kegels in einem Maar – Fallbeispiel: das pleistozäne Bažina-Maar in Westböhmen

Maar-Diatrem-Vulkane sind häufige vulkanische Ausprägungen, die in allen tektonischen Umgebungen vorkommen, entweder innerhalb monogenetischer Vulkanfelder oder als parasitäre Krater in Verbindung mit großen zusammengesetzten Vulkanen. Es wird allgemein akzeptiert, dass sie in kurzer Zeit durch explosive phreatomagmatische Eruptionen entstehen, die durch die heftige Ausdehnung von magmatischem Gas oder Dampf, oder durch den Kontakt von Grundwasser mit heißer Lava oder Magma, verursacht werden. Bei anhaltender Magmazufuhr kann die nachfolgende vulkanische Aktivität einen pyroklastischen Kegel am Rand des Maars oder innerhalb des Maar-Kraters bilden. Aktuelle Forschungen haben die komplexe Eruptions- und Magmageschichte einiger Maar-Diatrem-Vulkane aufgezeigt, aber die in Maaren entstandenen pyroklastischen Kegel blieben außerhalb des Hauptforschungsfokus. Unsere Forschung basiert auf zwei Bohrlöchern, die innerhalb des känozoischen Bažina-Maars (Hrubcová et al. 2023) in Westböhmen gebohrt wurden und zufällig eine Abfolge von Post-Maar-Pyroklastika-Ablagerungen mit zugehörigen Laven durchteuften. Im Gegensatz zu der gut erhaltenen Morphologie, die auf ein mögliches pleistozänes Alter der vulkanischen Struktur hindeutet, ergaben geochronologische Analysen ein miozänes Alter.

Eine detaillierte Interpretation der Morphologie in Verbindung mit einer Untersuchung der Bohrkerne deutet auf das kontinuierliche Entstehen pyroklastischer Kegel innerhalb des Maarkraters hin. Die Bohrungen brachten auch eine Schicht fossiler Verwitterung zum Vorschein, die auf eine längere Unterbrechung der vulkanischen Aktivität hindeutet. Diese zeitliche Lücke zwischen zwei Hauptausbruchperioden wird durch die K-Ar-Geochronologie bestätigt. Der frühere Kegel entstand vor etwa 21 Millionen Jahren, gefolgt von einer vulkanischen Ruhephase und der Zirkulation phosphatreicher Flüssigkeiten, die einen 19 Millionen Jahre alte Apatit-Gang bildeten. Die spätere eruptive Aktivität fand vor etwa 15,5 Millionen Jahren statt. Obwohl das Bažina-Maar keinen aktuellen Kratersee aufweist, dokumentiert die pyroklastische Abfolge den Übergang von einem hydromagmatischen (surtseyanischen) zu einem magmatischen (strombolianischen) Eruptionsstil während des Wachstums jedes Kegels. Hydromagmatische Eruptionen im Frühstadium resultieren aus der Wechselwirkung von ausbrechendem Magma mit Seewasser. Als der pyroklastische Kegel über den Wasserspiegel hinausragte, verlagerte sich der Eruptionsstil in Richtung eines trockenen strombolianischen Stils. Die Zusammensetzung aller eruptierten Magmen reicht von Olivin-Nephelinit bis zu Melilit-haltigem Olivin-Nephelinit, unabhängig vom Eruptionsstadium. Das Bažina-Maar belegt einen Eruptionsstil von pyroklastischen Kegeln in Maaren, der in seinen frühen Stadien durch den Kratersee gesteuert wird. Obwohl der Vulkan klein ist, zeigen detaillierte Untersuchungen wiederkehrende vulkanische Aktivitäten innerhalb dieses bescheidenen Vulkangebäudes, die sich über 5 Millionen Jahre erstrecken und auf eine mögliche Reaktivierung der Zufuhrkanäle von scheinbar erloschenen monogenetischen Vulkanen hindeuten.

Wir danken für die Finanzierung des Projektes 23-07490K durch die Czech Science Foundation und des Projektes 311400 durch den Tschechischen Geologischen Dienst.

*Übersetzt mit DeepL.com

Geophysical prospection of the Pliocene volcanic massif Königsberg-Klöch in Southeast Styria (Austria)

Robert Scholger¹, Ingomar Fritz², Otto Nell³

¹ Montanuniversität Leoben, Chair of Applied Geophysics, Peter-Tunner Str. 25, 8700 Leoben, Austria

² Universalmuseum Joanneum, Studienzentrum Naturkunde, Weinzöttlstr. 16, 8045 Graz, Austria

³ ALAS Klöch GmbH, Klöch 71, 8493 Klöch, Austria

Results from geomagnetic and geoelectric measurements in the Pliocene volcanic massif Königsberg-Klöch are presented, which were acquired since 2008 in the frame of geophysical boot camps with more than fifty students as well as three Bachelor-theses and a Master-thesis. The available data comprises more than twelve thousand ground magnetic observations and four electrical resistivity tomography profiles up to 1240m in length in and all around the active basalt quarry. Accompanying oriented sampling provided representative material for laboratory determinations of the relevant petrophysical parameters.

Total magnetic intensity measurements with GEM Systems proton-precession and Overhauser magnetometers yielded anomalies between -935nT and +886nT in 2m sensor height after reductions, while the vertical gradient of the total magnetic intensity was comparably low in accordance with a significant depth extend of the anomaly sources. Noticeably, the natural remanent magnetization (NRM) of the basalts deflected strongly from the present-day Earth's magnetic field, implying the need for careful consideration of the NRM in the magnetic modelling. Electrical tomography was measured with AGI Sting instruments in Wenner and dipole- dipole mode with up to 126 electrodes. The resulting models could be compared with borehole, seismic and outcrop data. Conveniently, due to the ongoing mining activities some geophysical profile positions of earlier investigation years coincided with rock faces in the quarry observed in later years.

The southern part of the area around the hill Seindl is dominated by well layered scoriaceous tuff breccia with small lava flows covering massive intrusive nepheline-basanites which also form small vents and dykes from south to north. From the north of the quarry to the south-east (castle of Klöch) and in the areas near Zaraberg and Jörgen, big vertical columns (1m diameter) indicate the formation of lava-lakes. Three volcanic centres are recognized in the southern area and one at the Königsberg in the north. The entire volcanic mass is underlain by ash-lapilli-tuffs with phreatomagmatic origin. The depression in the center on top of the volcanic massif is covered by lake sediments with peperites at the base, layers of ash-tuff with accretionary lapilli and bomb-sags of volcanic bombs. Shallow extensive basaltic layers between Königsberg and Seindl can be explained as lava flows. Geoelectrical and geomagnetic measurements provided good means to detect the basalt bodies. Problems only occurred with small-scaled structures and bodies located close to each other.

Corresponding author: scholger@unileoben.ac.at

Geophysikalische Prospektion des pliozänen Vulkanmassivs Königsberg-Klöch in der Südoststeiermark (Österreich)

Ergebnisse der geomagnetischen und geoelektrischen Messungen im pliozänen Vulkanmassiv Königsberg-Klöch werden vorgestellt, die seit 2008 im Rahmen von geophysikalischen Geländeübungen der Montanuniversität mit mehr als fünfzig Studierenden, sowie in drei Bachelorarbeiten und einer Masterarbeit akquiriert wurden. Die verfügbaren Daten umfassen mehr als zwölftausend magnetische Messungen und vier bis zu 1240 m lange elektrische Widerstandstomographie-Profile in und um den aktiven Basaltsteinbruch. Die begleitende orientierte Probenahme lieferte repräsentatives Material für die Laborbestimmung der relevanten gesteinsphysikalischen Parameter.

Messungen der magnetischen Totalintensität mit Protonenpräzessions- und Overhauser-Magnetometern von GEM Systems ergaben Anomalien zwischen -935 nT und +886 nT in einer Sensorhöhe von 2 m nach Reduktionen, während der vertikale Gradient der magnetischen Totalintensität in Übereinstimmung mit einer signifikanten Tiefenausdehnung der Störkörper vergleichsweise gering war. Bemerkenswert ist, dass die natürliche remanente Magnetisierung (NRM) der Basalte stark vom heutigen Erdmagnetfeld abweicht, was die Notwendigkeit einer sorgfältigen Berücksichtigung der NRM in der magnetischen Modellierung impliziert. Die elektrische Tomographie wurde mit AGI Sting-Instrumenten im Wenner- und Dipol-Dipol-Modus mit bis zu 126 Elektroden gemessen. Die resultierenden Modelle konnten mit Bohrloch-, seismischen und Aufschlussdaten verglichen werden. Praktischerweise stimmten aufgrund der laufenden Abbauaktivitäten einige geophysikalische Profilpositionen früherer Untersuchungsjahre mit den in späteren Jahren beobachteten Aufschlüssen im Steinbruch überein.

Der südliche Teil des Gebietes im Bereich Seindl wird von gut geschichteten Tuffbrekzien mit kleinen Lavaströmen dominiert, die massive Intrusiv-Nephelin-Basanite überziehen, die auch kleine Schlote und Deiche von Süden nach Norden bilden. Vom Norden des Steinbruchs nach Südosten (Burg Klöch) und in der Umgebung von Zaraberg und Jörgen deuten große vertikale Säulen (1m Durchmesser) auf die Entstehung von Lavaseen hin. Im Süden sind drei vulkanische Zentren und im Norden eines am Königsberg bekannt. Die gesamte vulkanische Masse ist von Asche-Lapilli-Tuffen phreatomagmatischen Ursprungs unterlagert. Die Vertiefung in der Mitte auf dem Gipfel des Vulkanmassivs ist von Seesedimenten mit Peperiten an der Basis, Schichten von Asche-Tuff mit akkretionären Lapilli und Bombendurchhängern von Vulkanbomben bedeckt. Flache, ausgedehnte Basaltschichten zwischen Königsberg und Seindl lassen sich als Lavaströme erklären. Geoelektrische und geomagnetische Messungen eigneten sich gut für die Detektion der Basaltkörpern. Probleme traten nur bei kleinräumigen Strukturen und Körpern auf, die nahe beieinander lagen.

Paleomagnetic results from Pliocene basalts in Styria (Austria) indicate intermediate field directions recorded during the Matuyama chron

Robert Scholger¹, Elisabeth Schnepf¹, Ingomar Fritz²

¹ Montanuniversität Leoben, Chair of Applied Geophysics, Peter-Tunner Str. 25, 8700 Leoben, Austria

² Universalmuseum Joanneum, Studienzentrum Naturkunde, Weinzöttlstr. 16, 8045 Graz, Austria

The volcanic rocks from the Pliocene in southeastern Austria have been studied paleomagnetically for more than forty years, and the directional results from six locations have already been published by Pohl & Soffel (1982). In our study, samples were taken from 28 locations spread across 8 volcanoes (sites) to investigate the paleodirection and paleointensity of the Earth's magnetic field.

Rock magnetic investigations revealed that the magnetic carriers are titanium-rich or titanium-poor titanomagnetites with predominantly pseudo-single domain grain sizes. Characteristic remanence magnetization directions were obtained from both alternating-field and thermal demagnetization. Four locations show reverse directions, which correspond to the direction expected based on secular variation. Four other locations in the Klösch-Königsberg volcanic complex and the Neuhaus volcano show reverse directions with shallow negative inclinations and declinations of about 240°, while the Steinberg basalt has a positive inclination of about 30° and a declination of 200°.

These divergent directions cannot be explained by local or regional tectonic movements. All positions of the virtual geomagnetic poles (VGP) are in the southern hemisphere. Four VGPs are close to the geographic pole, while all others are concentrated in a narrow sector of longitude off the coast of South America (310° to 355°) with VGP latitudes between -15° and -70°. The hypothesis that a transitional configuration of the Earth's magnetic field was recorded during the short volcanic activity at these five locations is supported by 9 paleointensity results and ³⁹Ar-⁴⁰Ar dating (Schnepf et al., 2021). These new ³⁹Ar-⁴⁰Ar ages of 2.51 ± 0.27 Ma for Klösch and 2.39 ± 0.03 Ma for Steinberg enable the correlation of the Styrian transitional directions with the cryptochron C2r.2r-1 of the geomagnetic polarity time scale. A cryptochron is a short geomagnetic event in which the Earth's magnetic field reverses polarity for a period of less than 10 to 30 kyr. Accordingly, at least three of the four Styrian volcanoes studied could have formed in a short time interval corresponding to the duration of a geomagnetic cryptochron.

References

Pohl, J. & Soffel, H.C. (1982): Paleomagnetism of tertiary volcanics of Styria (Austria). Geol. Jahrb., 52: 137-147.

Schnepf, E., Arneitz, P., Ganerød, M., Scholger, R., Fritz, I., Egli, R., & Leonhardt, R. (2021): Intermediate field directions recorded in Pliocene basalts in Styria (Austria): evidence for cryptochron C2r.2r-1. Earth Planets Space, 73, 182 (2021).

<https://doi.org/10.1186/s40623-021-01518-w>

Corresponding author: scholger@unileoben.ac.at

Paläomagnetische Ergebnisse von pliozänen Basalten in der Steiermark (Österreich): Intermediäre Magnetfeld-Richtung während des Matuyama-Chrons

Die Pliozänen Vulkanite im Südosten Österreichs werden seit mehr als vierzig Jahren paläomagnetisch untersucht, und die Richtungsergebnisse von sechs Standorten wurden bereits von Pohl & Soffel (1982) veröffentlicht. Für unsere Studie wurden Proben von 28 Standorten genommen, die über 8 Vulkane verteilt sind, um die Paläorichtung und Paläointensität des Erdmagnetfeldes zu untersuchen.

Gesteinsmagnetische Untersuchungen ergaben, dass es sich bei den magnetischen Trägermineralen um titanreiche oder titanarme Titanomagnetite mit überwiegend pseudo-Einzeldomänen Korngrößen handelt. Charakteristische remanente Magnetisierungsrichtungen wurden sowohl aus der Wechselfeld- als auch aus der thermischen Entmagnetisierung erhalten. Vier Standorte zeigen inverse Magnetisierungen, die Richtungen entsprechen, die auf der Grundlage der Säkularvariation erwartet werden können. Vier weitere Standorte im Vulkankomplex Klösch-Königsberg und im Vulkan Neuhaus zeigen inverse Magnetfeld-Richtungen mit flachen negativen Inklinationen und Deklinationen von etwa 240° , während der Steinberg-Basalt eine positive Inklination von etwa 30° und eine Deklination von 200° aufweist.

Diese divergierenden Richtungen lassen sich nicht durch lokale oder regionale tektonische Bewegungen erklären. Alle Positionen der virtuellen geomagnetischen Pole (VGP) liegen auf der Südhalbkugel. Vier VGPs befinden sich in der Nähe des geographischen Pols, während sich alle anderen in einem schmalen Sektor vor der Küste Südamerikas (310° bis 355°) mit VGP-Breitengraden zwischen -15° und -70° konzentrieren. Die Hypothese, dass während der kurzen vulkanischen Aktivität an diesen fünf Orten eine Übergangskonfiguration des Erdmagnetfeldes aufgezeichnet wurde, wird durch 9 Paläointensitätsergebnisse und ^{39}Ar - ^{40}Ar -Datierungen gestützt (Schnepp et al., 2021). Diese neuen Alter von $2,51 \pm 0,27$ Ma für Klösch und $2,39 \pm 0,03$ Ma für Steinberg ermöglichen die Korrelation der steirischen Übergangsrichtungen mit dem Kryptochron C2r.2r-1 der geomagnetischen Polaritätszeitskala. Ein Kryptochron ist ein kurzes geomagnetisches Ereignis, bei dem das Magnetfeld der Erde für einen Zeitraum von weniger als 10 bis 30.000 Jahren die Polarität umkehrt. Demnach könnten sich mindestens drei der vier untersuchten steirischen Vulkane in einem kurzen Zeitintervall gebildet haben, das der Dauer eines geomagnetischen Kryptochron entspricht.

Changing eruption styles of Pliocene Klösch monogenetic volcanic field in south eastern Austria, Styrian basin

Ingomar Fritz¹, Ioan Seghedi²

¹ Universalmuseum Joanneum, Studienzentrum Naturkunde Weinzöttlestrasse 16, 8045 Graz

² Institute of Geodynamics "Sabba S. Ștefănescu", Romanian Academy, 19-23 Jean-Luis Calderon St., Bucharest 37, Romania;

The Pliocene Klösch monogenetic volcanic field (KVF) covers 4.93 km² and is one of the youngest and largest monogenetic volcanic field in Styrian Basin and is located in the southwestern part of the Pannonian Basin. It consists of three close monogenetic volcanic centers, built on Sarmatian sedimentary deposits. K/Ar dating suggests ~2.5 Ma for its generation. At Seindl and Zaraberg, the first episode of volcanic activity started with phreatomagmatic activity generating two maars; the following activity continued with an explosive Strombolian/Hawaiian phase at Seindl that deposited welded spatter around along an approximately S-N running line of volcanic vents with massive-to-bedded less consolidated scoria and lapilli. The last phase generated lava lakes inside the two maar craters. The contact of lavas with marginal wet phreatomagmatic deposits developed peperite. In a second episode volcanism migrated 1.5 km northward to Königsberg volcano. This unusual volcano started with a tuff ring crater and a subplinian eruption followed by construction of a 900m in diameter strombolian/hawaiian cone that filled up the initial tuff ring /- cone. The activity ends with a radial dyke system converging to the center of Königsberg strombolian/hawaiian cone edifice. The erupted volumes diminished from the first to the second episode. The volcanological observations suggest that the minimum erosional rate since the beginning of the volcanic activity is at least 150 meters.

Corresponding author: seghedi@geodin.ro

Wechselnde Eruptionsstile im pliozänen monogenetischen Vulkanfeld Klösch im Südosten Österreichs, Steirisches Becken

Das pliozäne monogenetische Vulkanfeld Klösch (KVF) bedeckt 4,93 km² und ist eines der jüngsten und größten monogenetischen Vulkanfelder im Steirischen Becken. Es liegt im südwestlichen Teil des Pannonischen Beckens und besteht aus drei nahegelegenen monogenetischen Vulkanzentren, die in sarmatische Sedimente eingebettet sind. K/Ar-Datierung ergeben ein Alter von ca. 2,5 Millionen Jahren. Am Seindl und Zaraberg begann die vulkanische Aktivität mit phreatomagmatischen Eruptionen und es entstanden zwei Maare. Nachfolgend setzte am Seindl eine explosive strombolianisch/hawaiianische Phase ein und es entstanden an einer annähernd von S nach N verlaufenden Linie eine Reihe von Vulkanschloten. Neben teilweise verschmolzenen Lavafetzen wurden auch massive, vereinzelt geschichtete sowie weniger verfestigte Schlacken und Lapilli abgelagert. In der letzten Phase entstand innerhalb der beiden Maarkrater ein Lavasee. Durch den Kontakt von Lava mit feuchten phreatomagmatischen Randablagerungen kam es zur Bildung von Peperiten.

In einer zweiten Episode wanderte die vulkanische Aktivität ca. 1,5 km nach Norden zum Königsberg. Dieser „untypische“ Vulkan begann mit der Bildung eines Tuffringkraters und sub-plinianischen Eruptionen. Darin entstand ein durch strombolianisch-hawaiianische Förderungen aufgebauter Kegel mit 900 m Durchmesser, der den ursprünglichen Tuffring

auffüllte. Die Aktivität endete mit der Intrusion eines radialen Gangsystems, das zum Zentrum des Königsberger Kogels zusammenläuft.

Das Eruptionsvolumen nahm von der ersten zur zweiten Episode ab. Geologische Beobachtungen deuten darauf hin, dass die minimale Erosionsrate in den Randbereichen des Vulkanfeldes seit Beginn der vulkanischen Aktivität mindestens 150 Meter beträgt.

GeoSphere Maps and other public available geological data in the Vulkanland

Mathias Steinbichler, Isabella Bayer, Gerit Griesmeier, Viktoria Haide, Esther Hintersberger, Hans-Georg Krenmayr, Otto Kreuz, Martin Schiegl, Werner Stöckl

GeoSphere Austria, Neulinggasse 38, 1030 Wien, Austria

In 2023, the GeoSphere Austria was established through the merger of the Geologische Bundesanstalt (GBA, Geological Survey of Austria) and the Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG). As part of this reorganization, the online presence—including access to geological information—was completely redeveloped. In 2024, a major milestone was reached in the national geological mapping department: with the completion of the GeoFAST project, which focused on compiling geological maps at a scale of 1:50,000 based on archived data, it is now possible to provide geological information at this scale for the entire Austrian territory for the first time. Using the Vulkanland region as an example, the presentation demonstrates how this information can be accessed via the web GIS platform at <https://maps.geosphere.at>, and what additional functionalities the system offers (e.g., pseudo-3D views). Furthermore, it is shown how the online maps from <https://maps.geosphere.at> can be integrated as services (e.g., WMS) into the open-source desktop GIS application QGIS 3. The geological maps at a scale of 1:50,000 available in the web GIS are also published as citable data in the data repository <https://tethys.at>. Using the example of the GeoFAST sheet 192 Feldbach, the presentation illustrates how these data can be loaded into QGIS 3 and used for further queries. At <https://zenodo.org/communities/geosphere-geology>, the Geological mapping department provides tools for general use, including a geological symbol catalog with instructions (<https://zenodo.org/records/15462230>) for visualizing GeoFAST and GK50 data from <https://tethys.at> in QGIS 3. This functionality is also demonstrated using Sheet 192 Feldbach as an example.

The presentation concludes with a preview of the ongoing EAGLe project. Although geological information is now available for all of Austria, the data varies significantly in terms of scientific detail and geometric precision, making it highly heterogeneous. The first goal of the EAGLe project is to create a unified „general legend“ for all of Austria and to map all existing legend terms from previous geological maps onto it. The second goal is to compile a complete 1:50,000-scale dataset that integrates all geological geometries into a single nationwide dataset. The current status of the EAGLe project and its associated challenges will also be discussed in the presentation.

Corresponding author: mathias.steinbichler@geosphere.at

GeoSphere Maps und weitere öffentliche geologische Daten im Vulkanland

2023 wurde die GeoSphere Austria durch die Zusammenlegung der Geologischen Bundesanstalt (GBA) mit der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) gegründet und dadurch auch der Online-Auftritt inklusive Zugriff auf geologische Informationen neu entwickelt. 2024 wurde in der Geologischen Landesaufnahme ein wichtiger Meilenstein erreicht: Durch den Abschluss des Projekts GeoFAST, das die Kompilation von geologischen Karten im Maßstab 1:50.000 basierend auf Archivdaten verfolgte, können erstmals für den gesamten österreichischen Raum geologische Informationen im Maßstab 1:50.000 zur Verfügung gestellt werden. Am Beispiel des Vulkanlandes wird in dem Vortrag gezeigt, wie diese Informationen im Web-GIS <https://maps.geosphere.at> abrufbar sind und welche weitere Funktionalitäten das Web-GIS (z.B. Pseudo 3D Ansicht) bietet. In weiterer Folge wird vorgeführt, wie sich die Online-Karten aus <https://maps.geosphere.at> als Service (z.B. WMS) in das Open-Source Desktop GIS - QGIS 3 einbinden lassen. Die im Web-GIS verfügbaren geologischen Karten im Maßstab 1:50.000 werden auch als zitierbare Datenpublikation im Daten-Repositoryum <https://tethys.at/> veröffentlicht. Am Beispiel GeoFAST Blatt 192 Feldbach wird gezeigt, wie diese Daten in QGIS 3 geladen und für weitere Abfragen verwendet werden können. Unter <https://zenodo.org/communities/geosphere-geology> stellt die Geologische Landesaufnahme Tools zur allgemeinen Verwendung zur Verfügung, darunter auch ein geologischer Symbolkatalog inklusive Anleitung (<https://zenodo.org/records/15462230>), um die GeoFAST und GK50 Daten von <https://tethys.at/> in QGIS 3 symbolisieren zu können. Diese Funktionalität wird auch am Beispiel von Blatt 192 Feldbach demonstriert. Abschließend wird ein Ausblick auf das laufende Projekt EAGLe geworfen. Obwohl nun geologische Informationen für ganz Österreich verfügbar sind, sind diese von unterschiedlichster fachlicher und geometrischer Qualität und in sich als sehr heterogen einzustufen. Das Projekt EAGLe hat als erstes Ziel, eine Gesamtlegende über ganz Österreich zu erstellen und alle bisherigen Legendenbegriffe auf den geologischen Karten darauf zu mappen. Als zweites Ziel ist ein Gesamtdatensatz 1:50.000 angesetzt, in dem alle geologischen Geometrien im Maßstab 1:50.000 in einen österreichweiten Datensatz integriert werden. Im Vortrag wird der derzeitige Stand des Projektes EAGLe, als auch die damit einhergehenden Herausforderungen angesprochen.

Limits of imitation: volatile loss in lunar mare simulants and fresh volcanic analogues

Jennifer Sutherland^{1,2}, Kai-Uwe Hess¹, Thilo Bissbort¹, Simon Stapperfend³, Axel Müller⁴, Thomas C. Hansen², Alexander Rack⁵, Donald B. Dingwell¹

¹ Department of Earth and Environmental Sciences, Ludwig-Maximilians-Universität München, Theresienstraße 41, 80333 Munich, Germany

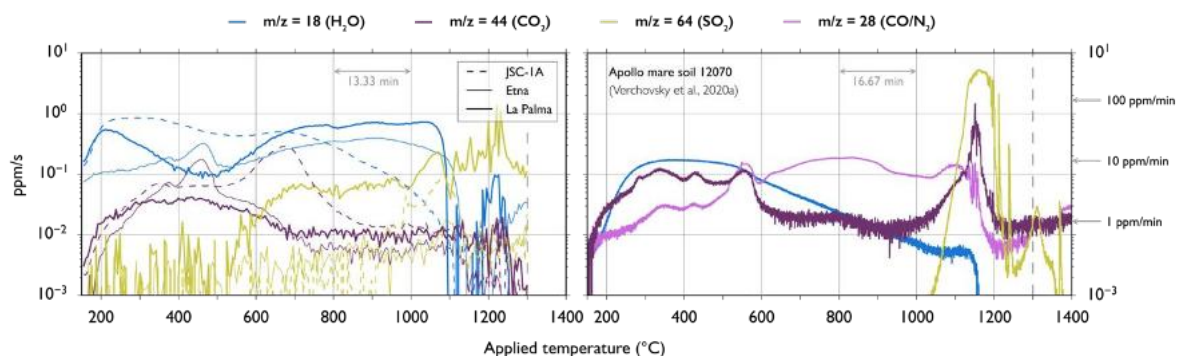
² Institut Laue-Langevin, 71 Avenue des Martyrs, CS 20156, 38042 Grenoble Cedex 9, France

³ Chair of Space Technology, Technische Universität Berlin, Marchstraße 12-14, 10587 Berlin, Germany

⁴ OHB System AG, Manfred-Fuchs-Straße 1, 82234 Weßling, Germany

⁵ European Synchrotron Radiation Facility, 71 Avenue des Martyrs, CS40220, 38043 Grenoble Cedex 9, France

Due to scarcity of returned lunar regolith samples, simulants are used for testing and validation of technologies destined for the Moon's surface. Deductions about thermal processing parameters (such as temperature ranges associated with sintering and melting) and material properties rely on close fidelity of the terrestrially-sourced material. To evaluate the effect of volatiles on melting behaviour and to enable the highlighting of pertinent differences to actual regolith, we compare profiles via simultaneous *differential scanning calorimetry (DSC)*, *thermogravimetric analysis (TGA)*, and evolved gas analysis (EGA) across a range of designated mare simulants, freshly recovered volcanic samples, and synthesised lunar-like glasses. Simulants generally exhibit higher mass loss (related to volatile release at sub-solidus temperatures) than fresh volcanic material, though overlap is observed with one simulant (JSC-1A). Of the fresh sources, Etna ash most closely limits the anticipated water loss difference to original lunar soils to within an order of magnitude. Results from complementary neutron powder diffraction (NPD) indicate that a lowering of the melting onset due to volatile fluxing persists ca. 200-300 °C beyond the major degassing range in samples of several grams. The possibility to reduce the simulant fidelity gap through critical source selection and their inherent limitations is discussed, and refined pre-treatment recommendations are made.



Corresponding author: hess@lmu.de

Grenzen der Imitation: volatiler Verlust in lunaren Mare-Simulanten und frischen vulkanischen Analoga

Aufgrund der Knappheit zurückgebrachter lunarer Regolithproben werden Simulanten für Tests und die Validierung von Technologien verwendet, die für den Einsatz auf der Mondoberfläche bestimmt sind. Rückschlüsse auf Parameter der thermischen Verarbeitung (wie Temperaturbereiche für Sintern und Schmelzen) sowie auf Materialeigenschaften beruhen auf der hohen Übereinstimmung der terrestrisch gewonnenen Materialien mit dem Original. Um den Einfluss flüchtiger Bestandteile auf das Schmelzverhalten zu bewerten und relevante Unterschiede zum tatsächlichen Regolith hervorzuheben, vergleichen wir Profile mittels simultaner Differenzkalorimetrie (DSC), Thermogravimetrischer Analyse (TGA) und Analyse freigesetzter Gase (EGA) für verschiedene Mare-Simulanten, frisch gewonnene vulkanische Proben und synthetisierte mondähnliche Gläser. Simulanten zeigen im Allgemeinen einen höheren Massenverlust (bedingt durch die Freisetzung flüchtiger Komponenten bei subsoliden Temperaturen) als frisches vulkanisches Material, wobei es eine Überschneidung mit einem Simulanten (JSC-1A) gibt. Von den frischen Proben grenzt Etna-Asche den erwarteten Wasserverlust im Vergleich zu ursprünglichem Mondboden am engsten ein – auf eine Größenordnung. Ergebnisse der ergänzenden Neutronen-Pulverdiffraktion (NPD) deuten darauf hin, dass eine Herabsetzung des Schmelzbeginns durch flüchtige Flussmittel etwa 200–300 °C über den Hauptentgasungsbereich hinaus in Proben von mehreren Gramm anhält. Die Möglichkeit, die Lücke in der Imitation durch gezielte Quellauswahl zu verringern, wird diskutiert, und verfeinerte Empfehlungen zur Vorbehandlung werden gegeben.

Submarine volcanism associated with incipient rifting on the Gondwanan periphery – Silurian volcanic rocks of the Prague Basin

Zuzana Tasáryová¹, Vladislav Rapprich¹, Tomáš Magna¹, Vojtěch Janoušek¹, Ondřej Pour¹

¹ Czech Geological Survey, Klárov 3, 118 21 Prague, Czech Republic

Ancient oceanic rifts provide a valuable opportunity to study volcanism associated with mid-ocean ridges, largely hidden from natural observations. A drilling survey conducted for the new railway connection between Prague and Beroun revealed volcanic successions that have not previously been exposed at outcrops in the Prague Basin. New data from these drill cores may thus improve our knowledge on Silurian volcanism of the Prague Basin (Tasáryová et al. 2018), but also on magmatic evolution of oceanic rifts during their early stages and multistage growth of volcanic seamounts that could potentially emerge as ocean islands. Most lavas and high-level intrusions span basanite–alkali basalt–trachybasalt chemistry. Basaltoids are associated with picritic rocks (up to 25 wt. % MgO: Tasáryová et al. 2018). More fractionated types, reported in literature, do not crop out anymore. However, some drill cores provided fresh samples of fractionated trachybasalt–basaltic trachyandesite–phonotephrite dykes with elevated contents of alkalis, P and incompatible trace elements. Chemistry of the studied rocks points to transition from within-plate alkaline to E-MORB-like basaltic rocks, consistent with an origin during incipient oceanic rifting. Volcaniclastic deposits documented by the drill cores comprise various genetic types. Lavas, frequently developed as pillow-lavas, are associated with in-situ to early redeposited hyaloclastites. Up to 100 m thick sequences of bedded, well-sorted, clast-supported layers represent submarine hydroclastic fall deposits documenting submarine explosive activity. Locally, in the uppermost parts, the increasing proportion of vesicles and microcrysts pointing to a rather subaerial eruption suggests possible intersection of the sea-level by emerging seamount. The hydroclastic deposits alternate with massive, poorly sorted, matrix-supported deposits containing sediment and fossil fragments, representing submarine slumps on the volcanic edifice slopes. The shales underlying the volcanic rocks locally display signs of load-cast deformations. The textural variations documented in the drill cores offer a unique insight into the growth of a volcanic seamount in an incipient oceanic rift setting and its interactions with substrata.

We acknowledge funding through Czech Science Foundation (GAČR) projects 23-07625S and 22-34175S, and Czech Geological Survey project 311400.

References

Tasáryová, Z., Janoušek, V., Frýda, J. (2018) International Journal of Earth Sciences 107: 1231–1266.

Corresponding author: vladislav.rapprich@geology.cz

Untermeerischer Vulkanismus im Zusammenhang mit beginnender Riftbildung am Rand von Gondwana – Silurische Vulkangesteine des Prager Beckens

Alte ozeanische Spaltenbildungen bieten eine gute Gelegenheit, den Vulkanismus im Zusammenhang mit mittelozeanischen Rücken zu untersuchen, der natürlichen Beobachtungen weitgehend verborgen bleibt. Eine Bohrung, die für die neue Eisenbahnverbindung zwischen Prag und Beroun durchgeführt wurde, brachte vulkanische Abfolgen zum Vorschein, die zuvor in den Aufschlüssen des Prager Beckens nicht freigelegt waren. Neue Daten aus diesen Bohrkernen können somit unser Wissen über den silurischen Vulkanismus im Prager Becken (Tasáryová et al. 2018) aber auch grundsätzlich über die magmatische Entwicklung ozeanischer Spaltenbildung in ihren frühen Stadien und das mehrstufige Wachstum vulkanischer Seeberge, die sich möglicherweise zu Ozeaninseln entwickeln könnten, erweitern. Die meisten Laven und hochgradigen Intrusionen weisen eine chemische Zusammensetzung aus Basanit, Alkalibasalt und Trachybasalt auf. Basaltoide sind mit pikritischen Gesteinen assoziiert (bis zu 25 Gew.-% MgO: Tasáryová et al. 2018). In der Literatur beschriebene stärker fraktionierte Typen treten nicht mehr zutage. Einige Bohrkern lieferten jedoch frische Proben von fraktionierten Trachybasalt-Basalt-Trachyandesit-Phonotephrit-Gängen mit erhöhten Gehalten an Alkalien, P und inkompatiblen Spurenelementen. Die chemische Zusammensetzung der untersuchten Gesteine deutet auf einen Übergang von alkalischen Gesteinen innerhalb der Platte zu E-MORB-ähnlichen Basaltgesteinen hin, was mit einer Bildung während der beginnenden ozeanischen Riftbildung übereinstimmt. Die durch die Bohrkern dokumentierten vulkanoklastischen Ablagerungen umfassen verschiedene genetische Typen. Laven, die häufig als Kissenlaven ausgebildet sind, stehen in Zusammenhang mit in situ bis frühzeitig umgelagerten Hyaloklastiten. Bis zu 100 m mächtige Abfolgen von geschichteten, gut sortierten, klastisch gestützten Schichten stellen submarine hydroklastische Fallablagerungen dar, die auf explosive Aktivitäten unter Wasser hinweisen. Lokal, in den obersten Teilen, deutet der zunehmende Anteil an Blasen und Mikrokristallen auf eine eher subaerale Eruption hin, was auf ein mögliches Erreichen des Meeresspiegels durch auftauchende Seeberge hindeutet. Die hydroklastischen Ablagerungen wechseln sich mit massiven, schlecht sortierten, matrixgestützten Ablagerungen ab, die Sediment- und Fossilfragmente enthalten und unterseeische Rutschungen an den Hängen des Vulkangebäudes anzeigen. Die unter den Vulkangesteinen liegenden Schiefer weisen lokal Anzeichen von Belastungsmarken auf. Die in den Bohrkernen dokumentierten texturalen Variationen bieten einen einzigartigen Einblick in das Wachstum eines vulkanischen Seebergs in einer beginnenden ozeanischen Riftzone und seine Wechselwirkungen mit dem Untergrund.

Wir danken der Czech Science Foundation (GAČR) für die Finanzierung der Projekte 23-07625S und 22-34175S sowie dem Tschechischen Geologischen Dienst für die Finanzierung des Projekts 311400. *

*Übersetzt mit DeepL.com

Pre-rift diatremes in the Lusatian volcanic field: Mapping of two complex volcanic structures provides first data on the Campanian-Maastrichtian paleogeography of the northern Bohemian Massif

Olaf Tietz¹, Jörg Büchner¹, Erik Wenger¹, Roland Nádaskay², Johannes Zieger³

¹ Senckenberg Museum of Natural History Görlitz, Germany

² Czech Geological Survey, Prague, Czech Republic

³ Senckenberg Natural History Collections Dresden, Germany

Two diatreme structures in the Lusatian Mountains (CZ) can be assigned to so-called pre-rift period of volcanism within the Bohemian Massif. Mafic magmatites of this age occur only in the Elbe Graben, where it intersects the Ohre Rift Zone. Most of the Bohemian-Saxonian-Silesian intracontinental magmatites, however, are significantly younger, at approximately 30 Ma, and are linked to the Ohre Rift (Fig. 3). This older age of the two study areas is confirmed by Ar-Ar dating of intrusive ultramafic melilite rocks in the diatremes of Dolní Falknov ($\leq 68.34 \pm 0.33$ Ma) and Stožec (68.80 ± 0.85 Ma). Detailed geological mapping of both volcanic structures enabled to clearly demonstrate typical diatreme breccia only in the Dolní Falknov diatreme. In contrast, mapping of the Stožec volcanic structure 5 km to the northeast only revealed an intense red-brown coloured diamictite deposit. This diamictite also occurs in the top of the Dolní Falknov diatreme fill as separated semiplastic blocks and is interpreted as a collapse breccia. The diamictite as well as the diatreme breccia contain numerous rounded pebbles of different lithologies with diameters of up to 0.5 m (Fig. 4). Some of these pebbles probably come from Permian rocks (Rotliegend) and indicate a multi-phase redeposition history. These could be erosion products from the Lausitz Block, which is located 2.5 and 5 km north of the two diatreme structures. The Permian sediments eroded here were later rounded off before being redeposited as terrestrial (red) sediments in the uppermost Upper Cretaceous (Campanian–Maastrichtian). These deposits have only been preserved due to their sheltered position within the pre-rift diatreme structures (Fig. 5).

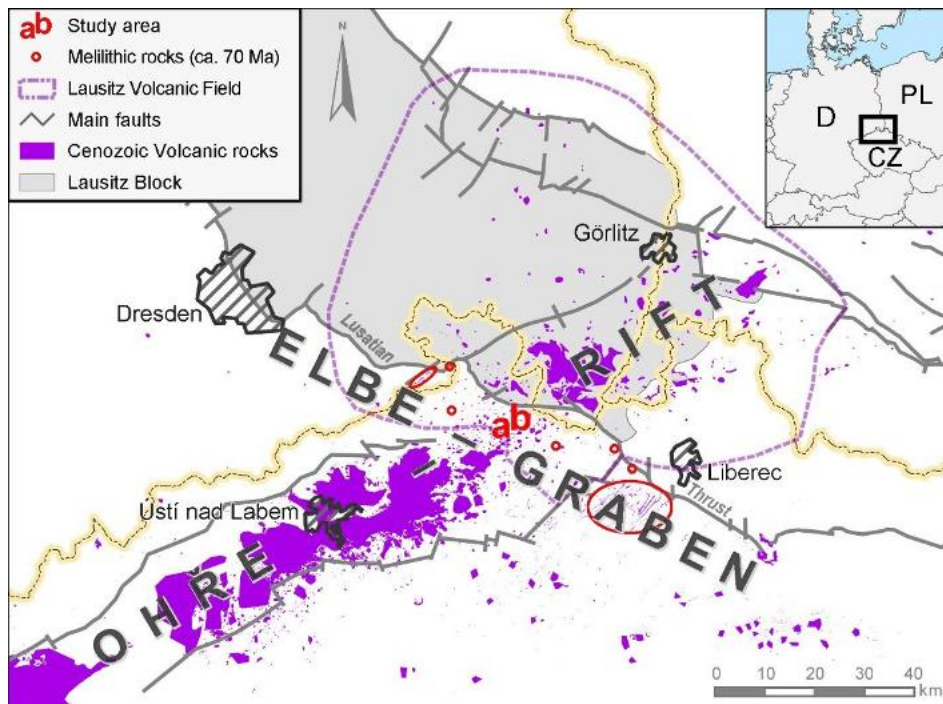


Fig. 3: Map of the Lausitz Volcanic Field including the study area: (a) – Dolní Falknov diatreme, (b) – Stožec diatreme. Modified from Büchner et al. (2015).

Abb. 3: Karte des Lausitzer Vulkanfeldes einschließlich des Untersuchungsgebiets: (a) – Diatrem Dolní Falknov, (b) – Diatrem Stožec. Modifiziert nach Büchner et al. (2015).



Fig. 4: Collapse breccia from the Stožec diatreme with crystalline rock pebbles in a red clay-silt-sand matrix. Drill core from 0.8 m depth with 10 cm diameter. Foto O. Tietz

Abb. 4: Kollapsbreckie aus dem Diatrem Stožec mit kristallinen Gesteinskörnern in einer Matrix aus rotem Ton-Schluff-Sand. Bohrkern aus 0,8 m Tiefe mit 10 cm Durchmesser. Foto: O. Tietz

SW

Lausitz Block
with Permian deposits

NE

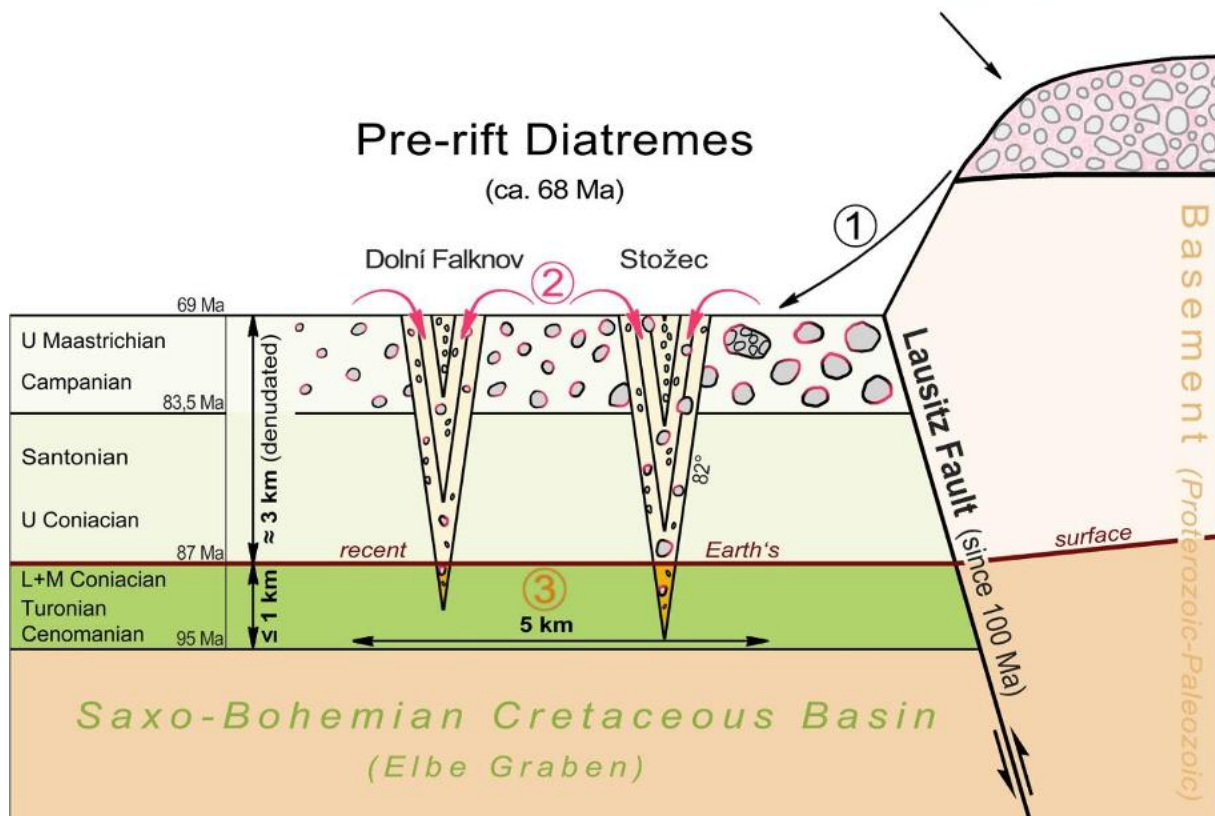


Fig. 5: Model sketch for the origin of the pre-rift diatremes of Dolní Falknov and Stožec.

(1) Redeposition of Permian sediments into the Saxo-Bohemian Cretaceous Basin ca. 80–70 Ma, including rounding of crystalline components near the coast (multi-stage sedimentary cycle). (2) 68 Ma diatremes incorporate the youngest Late Cretaceous sediments into red facies as collapse breccia. (3) After the erosion of the uppermost Late Cretaceous (erosion amount according to Tietz et al. 2018), these sediments are only preserved in the pre-rift diatreme structures.

Abb. 5: Modellskizze zur Entstehung der Prä-Rift-Diatreme von Dolní Falknov und Stožec. (1) Umlagerung von Sedimenten aus dem Perm in das sächsisch-böhmische Kreidebecken vor ca. 80–70 Millionen Jahren, einschließlich der Abrundung kristalliner Bestandteile in Küstennähe (mehrstufiger Sedimentationszyklus). (2) Diatreme aus dem Alter von 68 Ma integrieren die jüngsten Sedimente der späten Kreidezeit als Kollapsbrekzien in die rote Fazies. (3) Nach der Erosion der obersten Schichten der späten Kreidezeit (Erosionsmenge gemäß Tietz et al. 2018) sind diese Sedimente nur noch in den Diatremen vor der Riftbildung erhalten.

References

- Büchner J., Tietz O., Viereck L., Suhr P. and Abratis M., 2015. Volcanology, geochemistry and age of the Lausitz Volcanic Field. *International Journal of Earth Sciences*, 104: 2057-2083
- Tietz, O., Lange, W., Volkmann N., Gerschel H., Wenger E., Wilmsen M., Svobodová M. and Büchner J., 2018. Steinkohle in den Oberkreide-Sandsteinen von Waltersdorf im Zittauer Gebirge, Sachsen. *Berichte der Naturforschenden Gesellschaft der Oberlausitz*, 26: 77-105

Corresponding author: olaf.tietz@senckenberg.de

Vor der Spaltung entstandene Diatreme im Lausitzer Vulkanfeld: Die Kartierung zweier komplexer vulkanischer Strukturen liefert erste Daten zur Paläogeographie des nördlichen Böhmisches Massivs im Campanium und Maastrichtium.

Zwei Diatrem-Strukturen im Lausitzer Gebirge (CZ) lassen sich der sogenannten Prä-Rift-Periode des Vulkanismus innerhalb des Böhmisches Massivs zuordnen. Magmatische Gesteine dieses Alters kommen nur im Elbegraben vor, wo dieser die Ohre-Riftzone schneidet. Die meisten intrakontinentalen Magmatite des Böhmisches-Sächsisch-Schlesischen Massivs sind jedoch mit einem Alter von etwa 30 Ma deutlich jünger und stehen in Zusammenhang mit dem Ohre-Graben (Abb. 3). Dieses höhere Alter der beiden Untersuchungsgebiete wird durch Ar-Ar-Datierungen von intrusiven ultramafischen Melilitgesteinen in den Diatremen von Dolní Falknov ($\leq 68,34 \pm 0,33$ Ma) und Stožec ($68,80 \pm 0,85$ Ma) bestätigt. Eine detaillierte geologische Kartierung beider vulkanischer Strukturen ermöglichte es, typische Diatrem-Brekzien nur im Diatrem von Dolní Falknov eindeutig nachzuweisen. Im Gegensatz dazu ergab die Kartierung der 5 km nordöstlich gelegenen vulkanischen Struktur von Stožec lediglich eine intensiv rotbraune Diamiktitablagerung. Dieser Diamiktit kommt auch in der oberen Schicht der Diatrem-Füllung von Dolní Falknov als separate halbplastische Blöcke vor und wird als Kollapsbrekzie interpretiert. Sowohl die Diamiktite als auch die Diatrem-Brekzie enthalten zahlreiche abgerundete Kieselsteine unterschiedlicher Lithologie mit Durchmessern von bis zu 0,5 m (Abb. 4). Einige dieser Kieselsteine stammen wahrscheinlich aus Gesteinen des Perms (Rotliegend) und weisen auf eine mehrphasige Umlagerungsgeschichte hin. Es könnte sich um Erosionsprodukte aus dem Lausitzer Block handeln, der sich 2,5 und 5 km nördlich der beiden Diatrem-Strukturen befindet. Die hier erodierten Sedimente aus dem Perm wurden später abgerundet, bevor sie als terrestrische (rote) Sedimente in der obersten Oberkreide (Campanium–Maastrichtium) wieder abgelagert wurden. Diese Ablagerungen sind nur aufgrund ihrer geschützten Lage innerhalb der Diatrem-Strukturen aus der Zeit vor der Riftbildung erhalten geblieben (Abb. 5).

*Übersetzt mit DeepL.com

Magmatic processes in distributed basalt volcanism at the young intraplate Harrat volcanoes, Saudi Arabia

Froukje M. van der Zwan, S. Beatrice Jägerup, Evelyn R. Garcia Paredes, Om P. Pandey, Jörg Follmann, Murtadha Y. Al Malallah, Konstaninos Thomaidis, Ivana Zivadinovic, Valentin R. Troll, Thor H. Hansteen

King Abdullah University of Science and Technology (KAUST), Mangrove Street I-5604, 23955-6900, Thuwal, Saudi Arabia

Basaltic distributed or “monogenetic” volcanic fields are often thought to be formed by small magma batches that have limited residence time and interaction with the crust. Worldwide, one of the largest intraplate settings of such a volcanic province extends between Jordan and Yemen via the western side of Saudi Arabia. The Saudi Arabian “Harrats” (lavafields) consists of more than 13 volcanic fields, covering a total area of ~90,000 km² [1]. Magmatic activity in the region began around 30 million years ago, coinciding with the onset of Red Sea rifting, and has continued into historical times [2, 3]. The most recent eruption took place in Harrat Rahat in 1256 CE, near the city of Medinah, which today has a population exceeding one million and which receives more than 18 million visitors annually [4, 5]. Still ongoing magmatic activity is indicated by dyke intrusions in 1999 and 2009 in Harrat Rahat and Harrat Lunayyir, respectively [6, 7]. The origin of volcanism in the Harrats is debated to result from either upwelling of hot asthenospheric mantle from the Afar plume [8, 9], or from decompression melting caused by Red Sea extension and thinning of the lithosphere [10, 11]. Nevertheless the excellent preservation of the fields make the Harrats an ideal location to study the influence of different processes in distributed basaltic volcanism.

The distributed volcanism of the Harrats displays significant variation in age, eruptive style, and composition. The majority of the volcanism is basaltic, but ranging to felsic (rhyolite and phonolite) compositions as well. Older lavas display mostly tholeiitic, and younger lavas have mostly alkaline chemical signatures [2]. The eruptions are generally considered monogenetic, involving little to no crustal storage or interaction particularly for the basaltic magmas. However, limited research has focussed on detailed work to determine magma storage processes that shape the eruptive products. We will present whole-rock and glass major and trace element data, along with mineral analyses from volcanic samples and their xenolithic and xenocrystic fragments, to investigate the magmatic processes influencing the basaltic Harrat volcanism. Additionally, by analyzing samples from eruptive units of different ages, we can assess temporal changes in magma evolution across this intraplate volcanic province. These data show the action of various magmatic processes acting on the lavas, such as fractional crystallisation, magma mixing and mantle and crustal assimilation, but with different relevance over time showing a change in the architecture of the magma storage system with the evolution of the volcanic fields.

References

- [1] Coleman et al., 1983, USGS Publications
- [2] Camp & Roobol, 1992, Journal of Geophysical Research
- [3] Bosworth & Stockli, 2016, Canadian Journal of Earth Sciences
- [4] Kereszturi et al., 2016, Journal of Volcanology and Geothermal Research
- [5] Dietterich et al., 2018, Bulletin of Volcanology Downs et al., 2018, Geosphere
- [6] Pallister et al., 2010, Nature Geoscience
- [7] Abdelwahed et al., 2016, Journal of Asian Earth Sciences
- [8] Bertrand et al., 2003, Chemical Geology

- [0] Lim et al., 2020, Journal of Geophysical Research: SolidEarth
[10] Konrad et al., 2016, Lithos
[11] Sanfilippo et al., 2021, Frontiers in Earth Science

Corresponding author: froukje.vanderzwan@kaust.edu.sa

Magmatische Prozesse im verbreiteten Basaltvulkanismus bei den jungen Intraplatten-Vulkanen von Harrat, Saudi-Arabien

Verbreitete Basalte oder „monogenetische“ Vulkanfelder entstehen häufig durch kleine Magmazufuhren, die nur begrenzt mit der Erdkruste interagieren und deren Verweildauer dort limitiert ist. Weltweit erstreckt sich eines der größten Intraplatten-Gebiete einer solchen Vulkanprovinz zwischen Jordanien und dem Jemen über den westlichen Teil Saudi-Arabiens. Die saudi-arabischen „Harrats“ (Lavafelder) bestehen aus mehr als 13 Vulkanfeldern mit einer Gesamtfläche von ~90.000 km² [1]. Die magmatische Aktivität in der Region begann vor etwa 30 Millionen Jahren, zeitgleich mit dem Beginn der Riftbildung im Roten Meer, und hat sich bis in historische Zeiten fortgesetzt [2, 3]. Der jüngste Ausbruch ereignete sich 1256 n. Chr. in Harrat Rahat in der Nähe der Stadt Medina, die heute mehr als eine Million Einwohner hat und jährlich mehr als 18 Millionen Besucher empfängt [4, 5]. Die noch immer andauernde magmatische Aktivität wird durch Dyke-Intrusionen in den Jahren 1999 und 2009 in Harrat Rahat bzw. Harrat Lunayyir belegt [6, 7]. Über den Ursprung des Vulkanismus in den Harrats wird diskutiert, ob er entweder auf das Aufsteigen von heißem asthenosphärischem Mantel aus dem Afar-Plume [8, 9] oder auf Dekompressionsschmelzen zurückzuführen ist, das durch die Ausdehnung des Roten Meeres und die Ausdünnung der Lithosphäre verursacht wird [10, 11]. Nichtsdestotrotz machen die hervorragend erhaltenen Felder die Harrats zu einem idealen Ort, um den Einfluss verschiedener Prozesse im verbreiteten basaltischen Vulkanismus zu untersuchen.

Der verbreitete Vulkanismus der Harrats weist erhebliche Unterschiede hinsichtlich Alter, Eruptionsart und Zusammensetzung auf. Der Großteil des Vulkanismus ist basaltisch, reicht jedoch auch bis zu felsischen (Rhyolith und Phonolith) Zusammensetzungen. Ältere Laven weisen meist tholeitische, jüngere Laven meist alkalische chemische Signaturen auf [2]. Die Eruptionen werden im Allgemeinen als monogenetisch angesehen, mit wenig bis gar keiner Verweildauer in oder Interaktion mit der Kruste - insbesondere bei basaltischen Magmen. Allerdings gibt es nur wenige detaillierte Untersuchungen zur Bestimmung der Magmaspeicherungsprozesse, die die Eruptionsprodukte bilden. Wir werden Daten zu Haupt- und Spurenelementen aus Gesteins- und Glasproben sowie Mineralanalysen von Vulkanproben und deren xenolithischen und xenokristallinen Fragmenten vorstellen, um die magmatischen Prozesse zu ermitteln, die den basaltischen Harrat-Vulkanismus beeinflussen. Darüber hinaus können wir durch die Analyse von Proben aus Eruptionseinheiten unterschiedlichen Alters zeitliche Veränderungen in der Magmaentwicklung in dieser intraplattentektonischen Vulkanprovinz bewerten. Diese Daten zeigen den Einfluss verschiedener magmatischer Prozesse, die auf die Laven einwirken, wie fraktionierte Kristallisation, Magmamischung und Assimilation von Mantel und Kruste, jedoch mit unterschiedlicher Relevanz im Laufe der Zeit, was eine Veränderung in der Architektur des Magmaspeichersystems mit der Entwicklung der Vulkanfelder zeigt. *

*Übersetzt mit DeepL.com

Excursions to the volcanic remnants in the Styrian Basin

The Neogene basin fill in the Styrian Basin is accompanied by two main volcanic phases. Eruptions of acidic to intermediate volcanism occurred in the Gnas Subbasin during the Karpatian until the end of the Early Badenian and built up huge shield volcanoes.

Besides the Southern Slovakia Alkali Basalt Volcanic Field, the Little Hungarian Plain Volcanic Field and the Bacony-Balaton Highland Volcanic Field there are several volcanic remnants with similar genetic development in the Styrian Basin within the Pliocene lasting until the Early Pleistocene. Phreatomagmatic explosions delivered pyroclastic rocks and formed diatremes, which became filled with fine-clastic maar lake deposits. At some locations we can see lava extrusions and intrusions.



Fig. 6: Riegersburg (view from the north).

1819 gave Leopold von Buch a lecture for the „königlichen Preussischen Akademie der Wissenschaften“ („Royal Prussian Academy of Science“) on the subject of "Über einige Berge der Trapp-Formation bey Grätz" („About some mountains of the Trapp-Formation near Graz“). He presented results of a study-tour to East-Styria in 1818. This report was also printed in the „Steiermärkischen Zeitschrift“ („Styrian Journal“) in 1821 and is the first published report about volcanic rocks in Styria:

„Es ist daher wohl zu vermuthen, daß jeder dieser basaltischen Konglomeratberge in seinem Inneren einen festen Kern, einen Gang von Basalt enthalte; und es ist aus den vielen umwickelten Granitstücken recht wahrscheinlich, daß Granit hier unter dem Gerölle anstehen und durchbrochen sein möge.“

“... it is to suppose, that each of this basaltic conglomerate – mountains contains a hard core, a dike of basalt, in it's center; because of the surrounded granite - pieces it is quite likely, that granite is the penetrated bedrock below this coarse gravel.”

The Styrian Basin – Regional geological setting

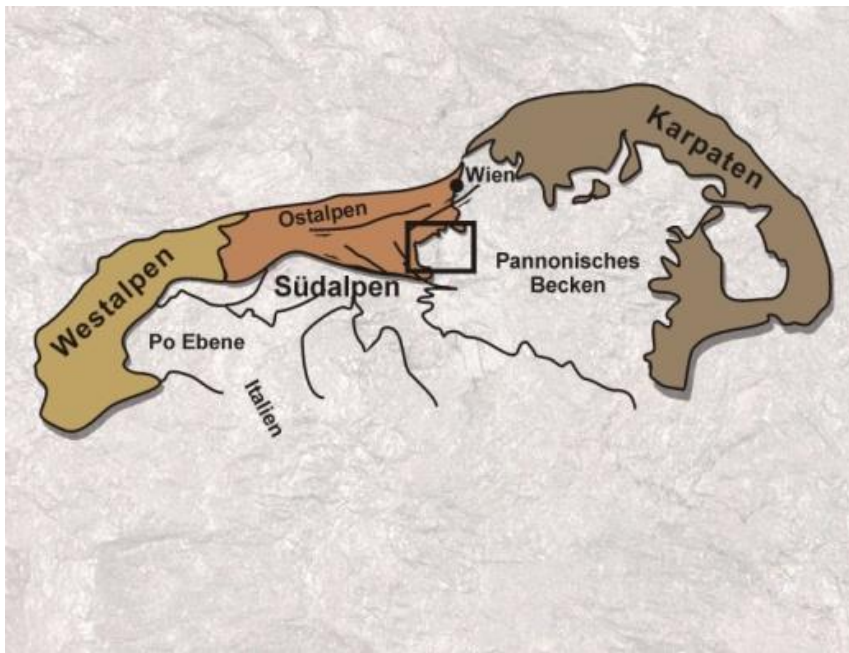


Fig. 7: Geographic position of the Styrian Basin.

The Styrian Basin is located at the south-eastern margin of the Alps. In the north, west and southwest it is encircled by crystalline Austroalpine units and the Graz Paleozoic. The north-eastern boundary is built by the Güns Mountains (Penninic unit). Extensive ranges of hills are characteristic for the basin landscape interrupted by valleys of generally southeast draining rivers. Exposures of the basement (e. g., Sausal Mountains) and volcanic “cones” (e. g., Gleichenberg, Kapfenstein, Riegersburg) highlight the scenery (Fig. 6).

Geological investigations date back into the early 19th century and are intimately connected with Arthur Winkler-Hermaden, who summarized the standard of knowledge in his “Geologisches Kräftespiel” [Geological dynamics] in 1957 (Winkler-Hermaden 1957; Winkler 1913, 1927a).

Results of intensive explorations of the Rohöl-Aufsuchungs AG [Crude oil mining company] in the middle of the 20th century were published by Kurt Kollmann. The detailed paper “Jungtertiär im Steirischen Becken” [Younger Tertiary of the Styrian Basin] (Kollmann 1965) is still a standard work for this area. Geophysical data on the pre-Neogene basement (Kröll et al. 1988), deep boreholes, studies of coalification gradients and new geodynamic models were combined to the “Entwicklungsgeschichte des Steirischen Tertiärbeckens” [Developmental history of the Styrian Tertiary Basin] by Fritz Ebner and Reinhard F. Sachsenhofer (Ebner & Sachsenhofer 1991, 1995; Sachsenhofer et al. 1997).

More detailed overviews offer the excursion-guides of Winkler-Hermaden (1939), Flügel et al. (1964), Flügel & Heritsch (1968), Flügel (1972), Holzer (1994), Sachsenhofer (1996), Stingl (1997), Gross (2000), and Gross et al. (2005).

The approximately 100 km long, 60 km wide and up to 4 km deep Styrian Basin belongs to the Pannonian Basin System, which is surrounded by the Alps, Dinarids and Carpathians (Fig. 7). It is detached by the NE–SW striking South Burgenland Swell from the Western Pannonian Basin and internally divided by the Middle Styrian Swell into a Western and an Eastern Styrian Basin. Basement spurs and subordinate swells cause further differentiation in bays and subbasins (Kröll et al. 1988).

Initiation of basin formation is connected to continental escape tectonics of alpidic crustal

wedges at the final collision stage (Late Oligocene to Miocene) of the Adriatic with the European plate (Neubauer & Genser 1990; Ratschbacher et al. 1991). The tectonic evolution in the Carpathian-Pannonian region is accompanied by the generation of a wide variety of magmas. The Miocene development of the Carpathian chain and the Pannonian Basin System is discussed to be controlled by retreating subduction in front of the orogene and with back-arc extension associated with the diapiric upraise of asthenosphere (Kovac et al. 2000; Konecny et al. 2002). Calc-alkaline and alkaline magmatism was closely related to subduction, rollback, collision and extension (Seghedi et al. 2004).

Lateral escape happened along large, E–W trending strike-slip faults generating small pull-apart basins (Noric Line). Simultaneously, isostatic uplift of thickened continental crust is associated with gravitative sliding of higher parts of the lithosphere along flat downthrown faults and led to the exposure of deeper units (Penninic). Downthrown faults are regarded responsible for horizontal block tilting, which caused asymmetric, N–S-striking extensional structures like the Styrian Basin (Neubauer & Genser 1990; Neubauer et al. 1995). More information - including palaeomagnetic data and geochemical analyses of magmatic rocks - to the geodynamics of the Alpine/Carpathian/Pannonian region provide, e. g., Kovac et al. (2000) or Seghedi et al. (2004).

Palaeogeographically, the Styrian Basin is part of the Central Paratethys. The Paratethys was born after the vanishing of the Tethys Ocean because of the collision of Eurasia, India and Africa around the Eocene/Oligocene boundary. South of the rising Alpine orogene, the (Proto-)Mediterranean developed, to the north the Paratethys. The Central Paratethys comprises the region from the Bavarian Molasse zone in the west, to the Carpathian arc in the east. Due to a different palaeobiological and palaeogeographical evolution regional chronostratigraphic stages were established. Discussions about correlations with the adjacent Mediterranean and the Eastern Paratethys are still ongoing (e. g., Rögl & Daxner-Höck 1996; Rögl 1998, 1999; Harzhauser et al. 2002; Popov et al. 2004).

The subsequent overview attempts to explain the history of the basin fill interrelated with geodynamics and sea level fluctuations and the resulting lithological and palaeobiological changes.

The pre-Neogene basement

According to the classical work of Kollmann (1965) the Styrian Basin is subdivided into three depocenters (Western Styrian Basin, Gnas Basin and Fürstenfeld Basin). The differences in elevation of the relief amounting to over 3000 m were obviously developed independent from the structure and composition of the basement itself and its pre-Neogene erosion (Flügel 1988). The knowledge of the geological underground relies on approximately 35 drillings, which reached the subsurface, geophysical data, as well as isolated exposures. The underground upraises are linked to two distinctive swells, which also sedimentologically affected the depocenters considerably: the “Middle Styrian Swell” [Mittelsteirische Schwelle] (i. e., the upraises of Remschnigg and Poßruck, Sausal, Seggauberg and Kreuzkogel;) and the “Southern Burgenland Swell” [Südburgenländische Schwelle] with its upraises at St. Anna am Aigen, Rotterberg/Stadelberg (southern Burgenland and northern Slovenia) and Kohfidisch, Hannersdorf and Hohensteinmaisberg (Kirchfidisch). Outcrops on upraises would permit a direct view on the lithological composition of the underground, regrettably this is however impossible for various reasons. In the meagre surface outcrops complete successions are not known (Heritsch 1963); this makes the affiliation of individual occurrences very difficult. Furthermore these isolated occurrences are tectonically cut and internally intensively fractured and folded. The monotonous, fossil-poor rocks suffered at least from green schist metamorphosis. Therefore the comparison with successions of areas known from the northern and/or northwestern edge of the basin is pretty difficult. Following the conceptions of Kröll et al. (1988), the underground can be subdivided into three large tectonic units: (A) Penninic Units, (B) Austroalpine Crystalline Units and (C) Upper-Austroalpine Units.

The Penninic successions, which upraise in the Rechnitz Window, might occur only in the subsurface of western Burgenland, however not in eastern Styria. The Austroalpine Crystalline successions capture an obviously large portion of the underground. They essentially represent the continuation of units cropping out in the northern and western margins of the basin. The allocation of phyllitic, volcanoclastic and carbonatic successions, which are known from outcrops along the “Middle Styrian Swell” becomes difficult. They orographically represent the continuation of the Plabutsch-Buchkogel-Range of the Graz Paleozoic, but have however lithologically only few similarities in common.

In the Sausal area acidic volcanites (in analogy to the Greywacke Zone they are interpreted as Upper Ordovician), sandy to clayey slates with occasionally interbedded green schists and diabases (carbonate rocks are very subordinate) probably may have a Silurian to Devonian age. At Burgstall-Grillkogel flaser-limestones and crinoidal limestones of Lochkovian to Pragian age are tectonically overlaying (Schlamberger 1987).

In the Remschnigg and Poßruck areas at the Austrian border to Slovenia, although extremely bad excavated, a lithologically very variable sequence is known. Stratigraphically oldest rocks are volcanic tuffs, green schists, and diabases (south of Oberhaag). They are overlain by argillaceous shales and schists, which are interbedded by platy limestones, flaser-limestones and crinoidal limestones. Conodonts indicate ages of the Llandoveryan/Wenlockian transition as well as Emsian and Frasnian. Micaceous shales and sandstones, as well as red conglomerates and sandstones are developed above argillaceous shales and phyllitic schists, which might belong to the upper Paleozoic. Exclusively from completely isolated locations, which lack contacts to other rocks, quartzitic sandstones and argillaceous shales, marls and platy limestones with remains of *Cidaris* are known. The former rocks are interpreted as possibly equivalent to the Werfen Formation (Lower Triassic) of the Northern Calcareous Alps; the latter are similar to the sediments deposited during the “Raibl level” (Karnian). The succeeding dolomites and cellular dolomites (reaching a maximum thickness of about 100 metres) possibly represent the Norian “Hauptdolomit”. The

succession is terminated by Upper Cretaceous brecciated limestones, containing rudists and marls with coccoliths (Ebner 1975; Flügel 1984). Probably the eastern continuation of this succession was found resting on Paleozoic phyllitic schists in the drilling core at Radkersburg (Flügel 1988). In the vicinity of St. Anna am Aigen (Southern Styria) and Rotterberg/Stadelberg (Southern Burgenland, Slovenia) phyllitic successions (quartzitic phyllites and carbonatic phyllites; Leinergraben), metatuffs (quarry Sotina) and pyrite-rich “banded limestones” (abandoned quarry at Kalch) occur in some isolated small outcrops. Winkler (1927a) already mentioned that these associations of rocks can impossibly be integrated into a stratigraphical sedimentary sequence due to the lack of coherent profiles. Possibly, the little less metamorphically over-printed rocks at Hohensteinmaisberg near Kirchfidisch (southern Burgenland) represent a comparable succession. Two main lithological complexes have been distinguished there (Pollak 1962; Schönlaub 2000; Suttner & Lukeneder 2004): a dolomite-limestone complex and a phyllite-limestone shale-complex.

The Neogene of the Styrian Basin

A comprehensive compilation of the lithostratigraphic units of the Styrian Basin appeared in *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt* (Gross 2022). A summary of Martin Groß's lecture "The Styrian Basin" can be found on page 12 in the conference proceedings.

Gross M. (2022): Styrian Basin. – In: Piller W.E. (Ed.): *The lithostratigraphic units of Austria: Cenozoic Era(them)*. – *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*, 76: 187-240.

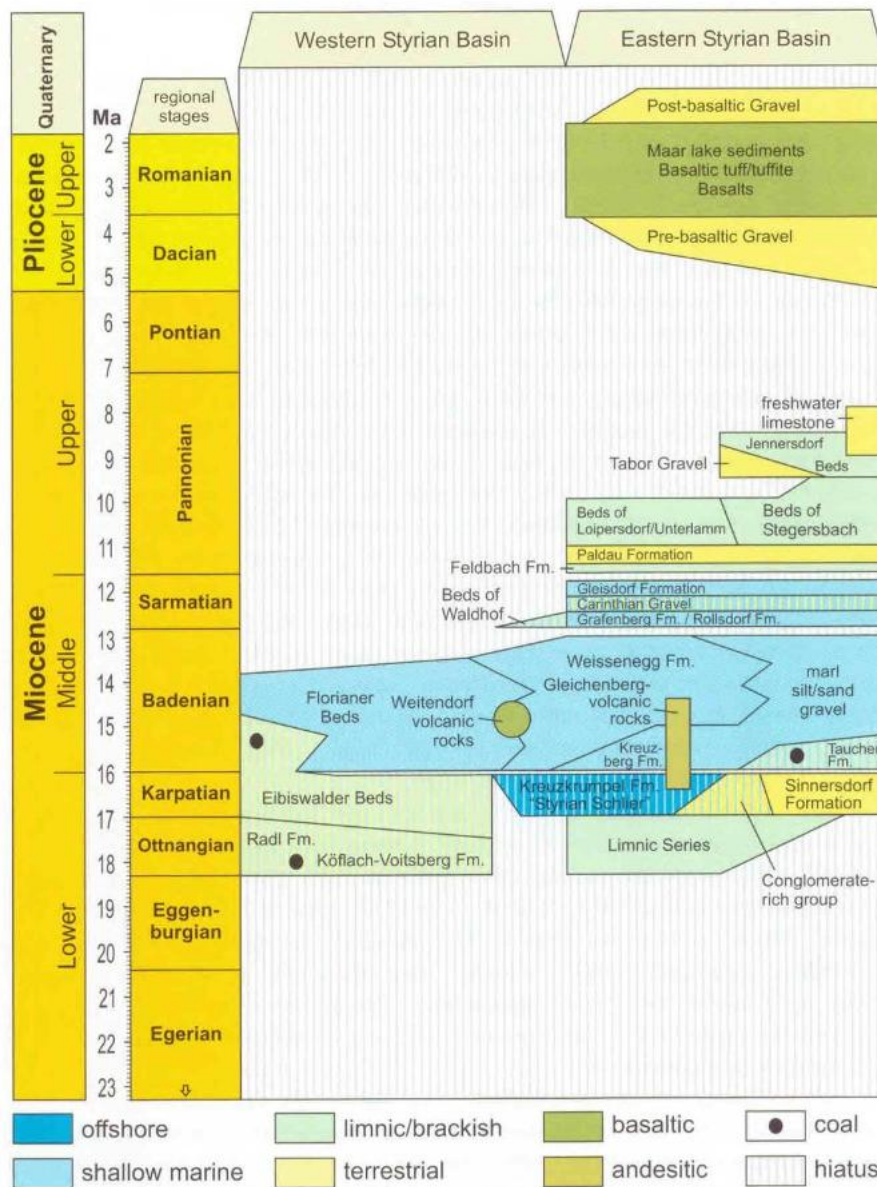


Fig. 8: Stratigraphic chart of the Neogene basin fill of the Styrian Basin (Gross et al. 2007).

https://opac.geologie.ac.at/wwwopacx/wwwopac.ashx?command=getcontent&server=images&value=Abh_0076_001.pdf

Visualizations of landscape changes in the Miocene of the Styrian Basin

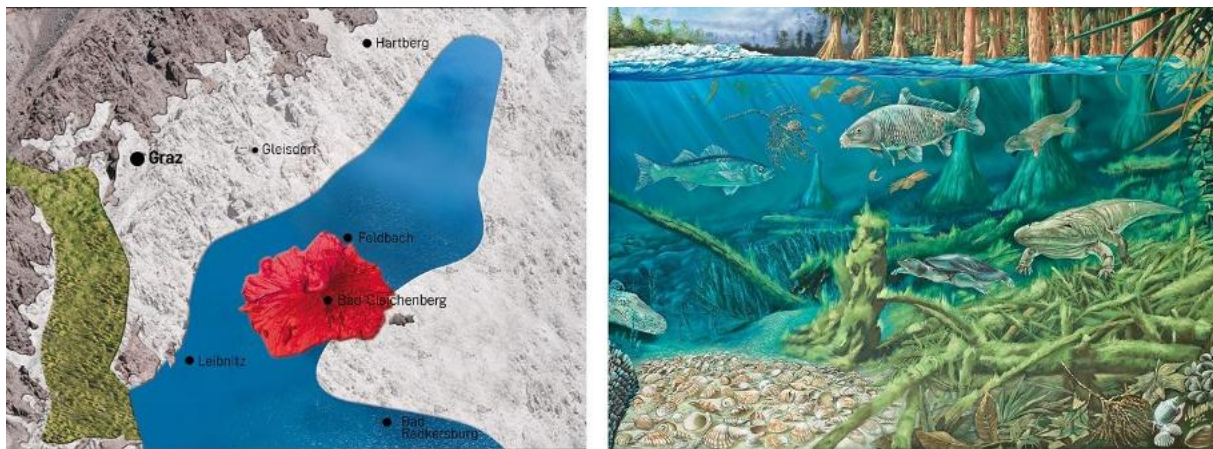


Fig. 9: Simplified palaeogeographic map of the Styrian basin for the Karpatian and excision of "Styrian earth history in pictures", Fritz Messner 2012.

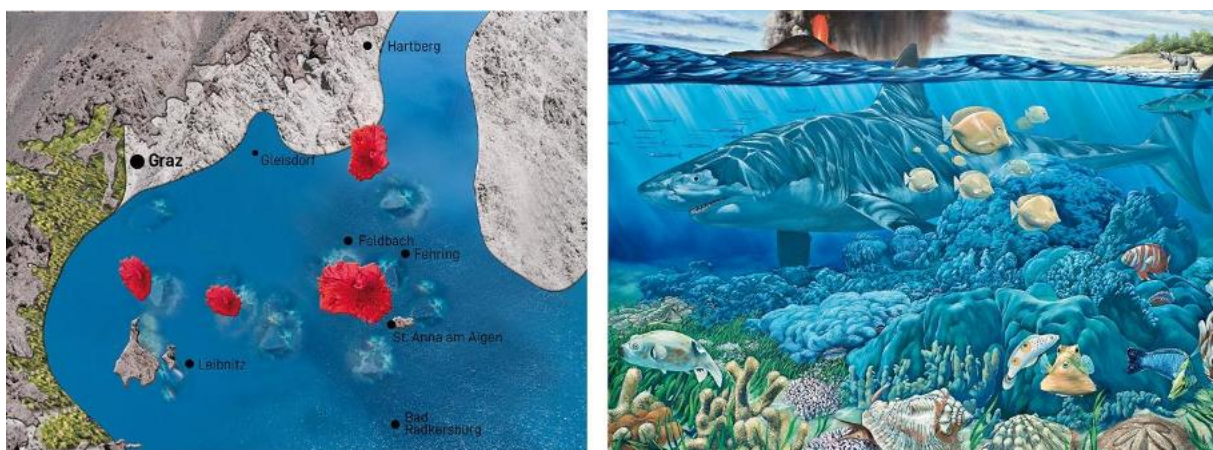


Fig. 10: Simplified palaeogeographic map of the Styrian basin for the Badenian and excision of "Styrian earth history in pictures", Fritz Messner 2012.

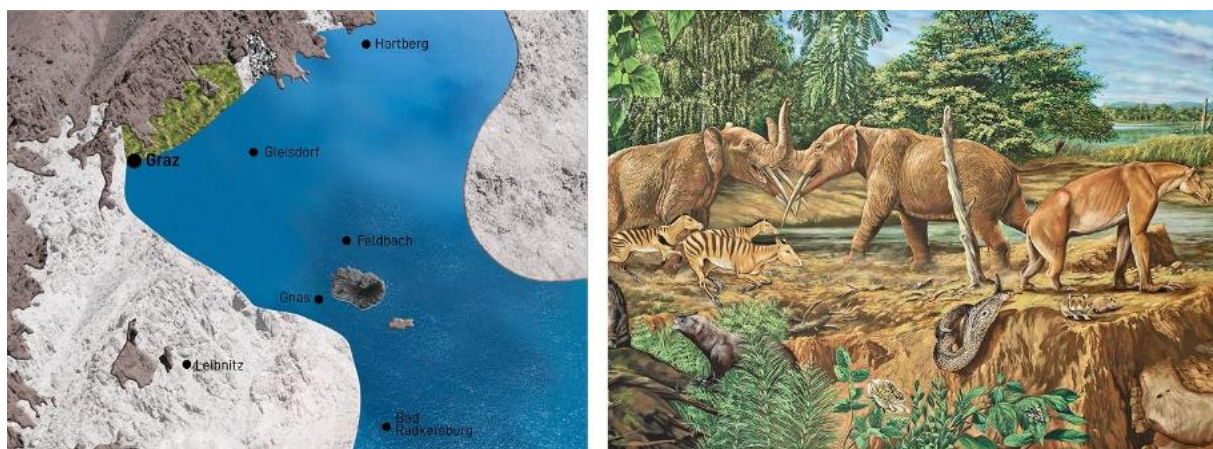


Fig. 11: Simplified palaeogeographic map of the Styrian basin for the Sarmatian and excision of "Styrian earth history in pictures", Fritz Messner 2012.

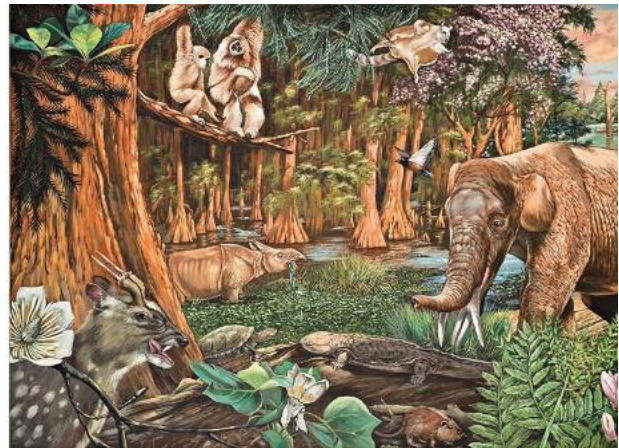


Fig. 12: Simplified palaeogeographic map of the Styrian Basin for the Pannonian and excision of "Styrian earth history in pictures", Fritz Messner 2012.



Fig. 13: Simplified palaeogeographic map of the Styrian Basin for the Pliocene and excision of "Styrian earth history in pictures", Fritz Messner 2012.

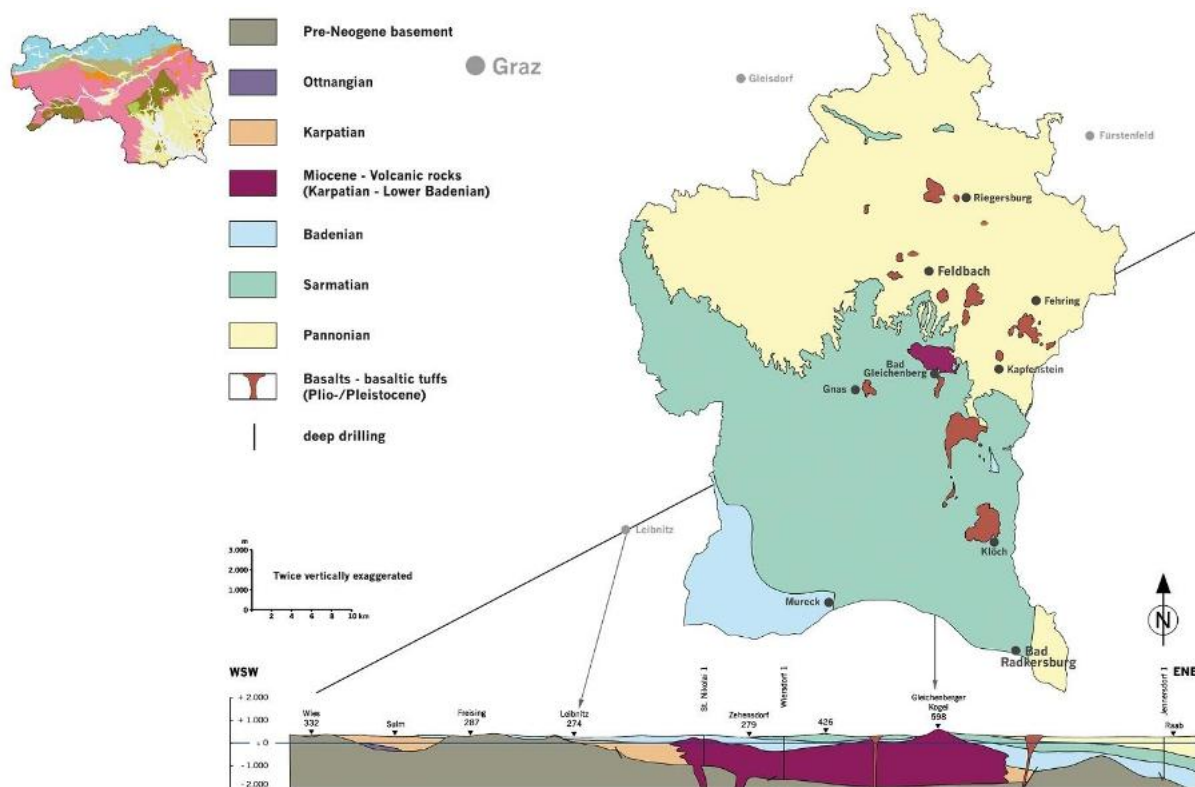


Fig. 14: Geological sketch of the "Steirisches Vulkanland".

Volcanic remnants in the “Steirisches Vulkanland”

Alkali basaltic volcanism was widespread in the Carpathian-Pannonian region from the early Late Miocene up to Middle Pleistocene times (11.5–0.2 Ma), leading to the formation of distinct volcanic fields (KONECNY et al. 2004). Besides the Southern Slovakia Alkali Basalt Volcanic Field (SSABVF; LEXA & KONECNY 1998), the Little Hungarian Plain Volcanic Field (LHPVF; MARTIN & NEMETH 2004) and the Bacony–Balaton Highland Volcanic Field (BBHVF; MARTIN & NEMETH 2004), there are several volcanic remnants with similar genetic development in the Styrian Basin (FRITZ 1996). The Pliocene–Pleistocene alkali basaltic volcanism seems to be related to an up-welled, then cooled asthenospheric dome (SZABO et al. 1992), formed during the post-orogenic phase. Data from “Styrian” xenoliths suggest that their source was at a depth of 50–80 km within subcrustal lithosphere (KURAT et al. 1980).

Within the Pliocene a basaltic phase of volcanism started in the Styrian Basin, which lasted until the Early Pleistocene (BALOGH et al. 1994, SEGHEDEI et al. 2004, BOJAR et al. 2013, SCHNEPP et al. 2021). Lava flows are partly underlain by “Pre-basaltic Gravels” (WINKLER-HERMADEN 1957). Beside lava extrusions and intrusions (Steinberg – Stop 3, 11; Stradner Kogel – Stop 6; Klöch/Tieschen - Stop 7,8,9), phreatomagmatic explosions delivered pyroclastic rocks and formed diatremes and maar lakes in which fine-grained sediments were deposited (Kapfenstein – Stop 1; Riegersburg – Stop 4,5; Burgfeld – Stop 12). Fluvial gravels (“Post-basaltic Gravels”) and residual soils partly cover these volcanic rocks and are interpreted as preglacial deposits. In Quaternary times erosion, terraces, alluvial cones and landslides formed the manifold landscape of today (WINKLER-HERMADEN 1957; FLÜGEL & NEUBAUER 1984; EBNER & SACHSENHOFER 1991).

Many volcanic deposits in the “Steirisches Vulkanland” show signs of phreatomagmatic eruptions (Pöschl 1991, Fritz 1996, Gross et al. 2007). The eruptions were determined by a changing availability of ground and/or surface water and the rising magma. Bomb-sag-structures and low-angle-cross-stratification, the existence of accretionary and armored lapilli are indications for phreatomagmatic eruptions and can be seen in several volcanic remnants in the Steirisches Vulkanland (e.g. Zaraberg / Klöch and Burgfeld / Fehring). Even the basaltic massives (Klöch, Stradner Kogel, Steinberg / Feldbach) have an initial phreatomagmatic phase which is documented by layered ash/lapilli tuffs.

Because of their greater resistance to weathering, compared to the predominantly non-solid clastic sediments, the volcaniclastics, which were probably first deposited in a hollow area, differ, in morphological terms, from their surroundings (e. g. Riegersburg, Kapfensteiner Kogel).

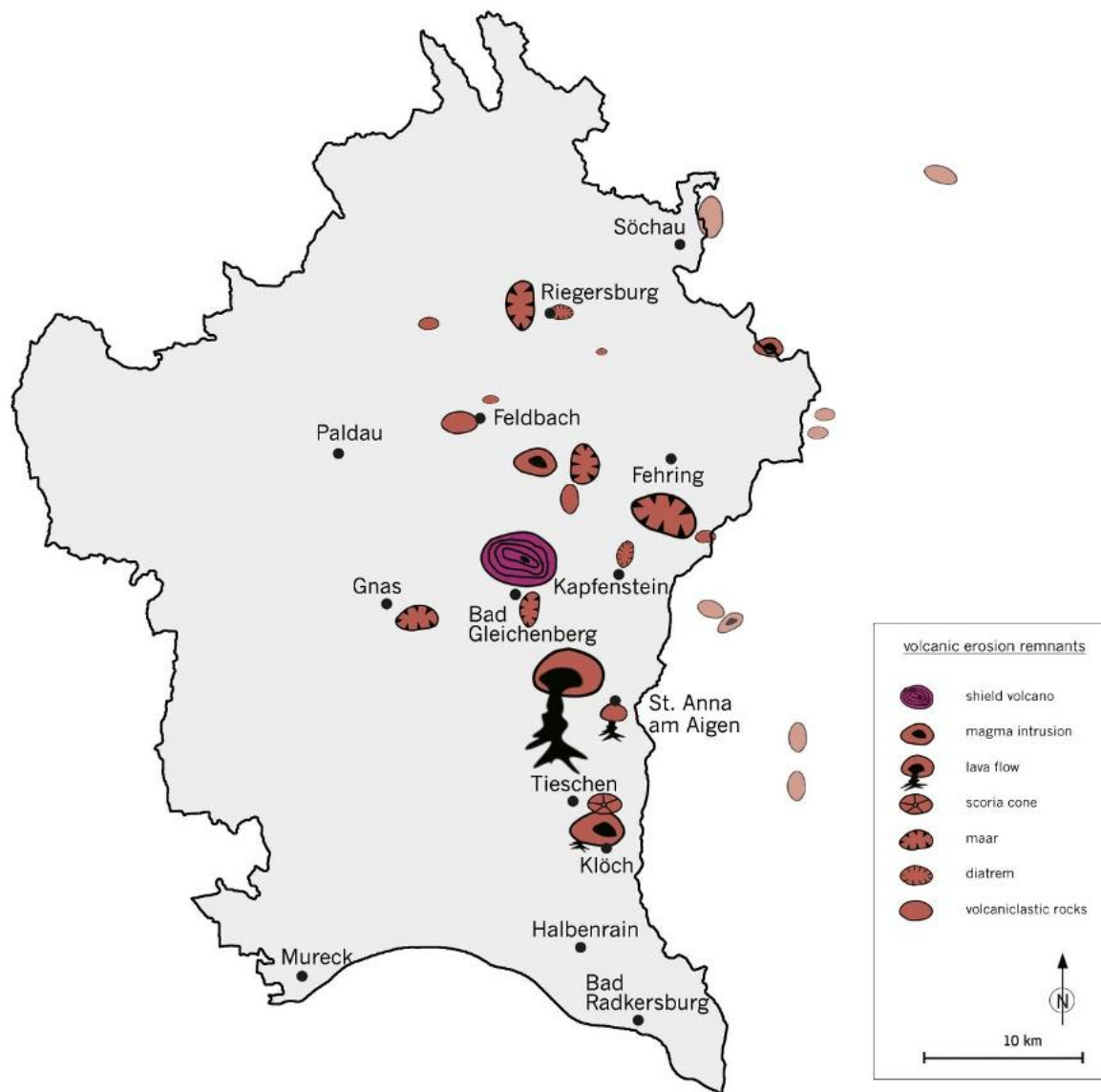


Fig. 15: Volcanic remnants in the "Steirisches Vulkanland".

Excursion stops

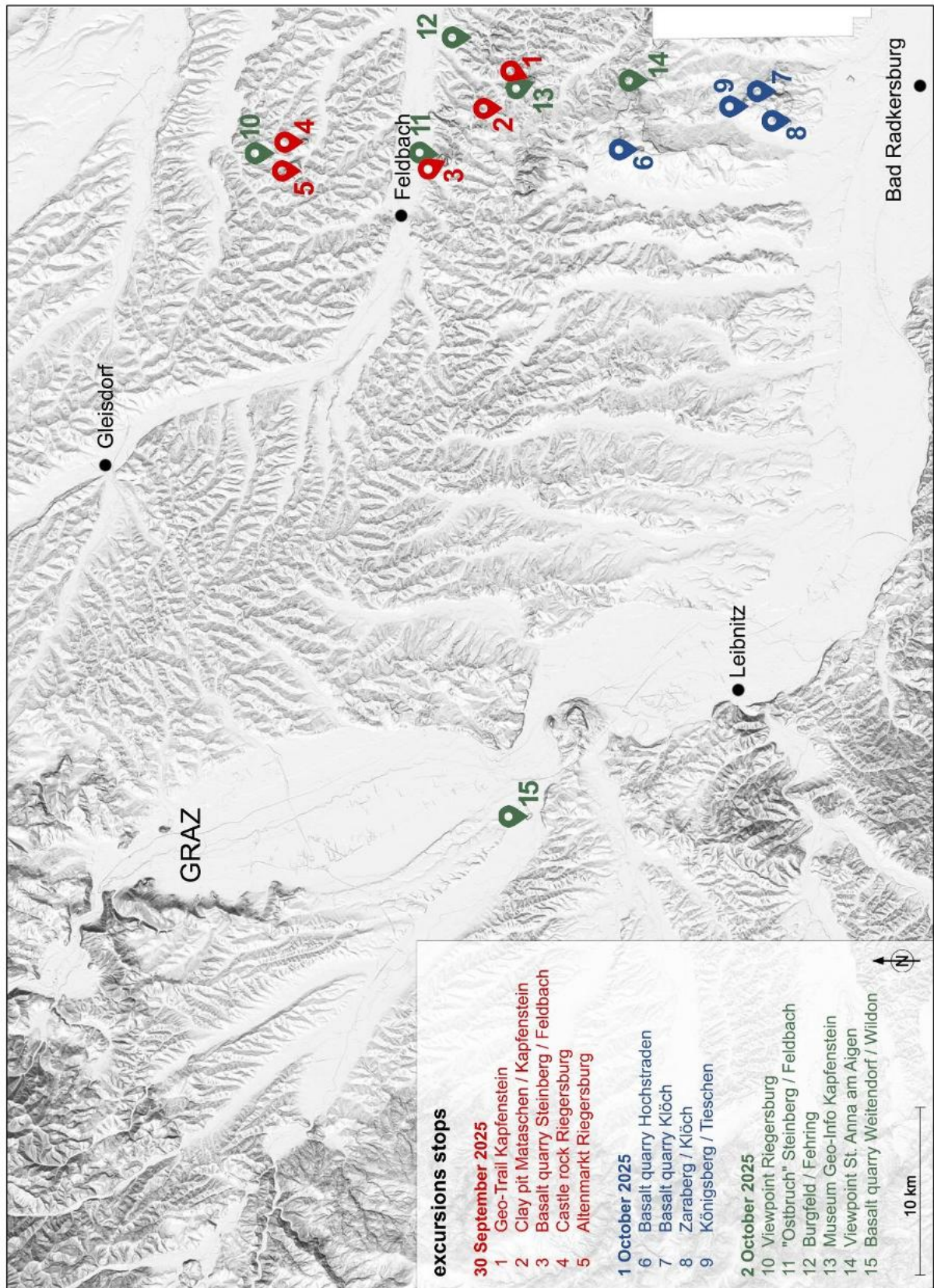


Fig. 16: excursions stops

Stop 1 – Geotrail Kapfenstein

Topic: Diatrem, pyroclastic rocks, xenoliths (“Olivinbomben”), geotourism.

Locality: Kapfensteiner Kogel, GK M34 [EPSG 31256] RW: -27081,46 HW: 194521,64 SH: 421 (Fig. 17, Fig. 44, Fig. 46).

Lithostratigraphy: „Basalt and Tuff/Tuffite“ (Gross 2022).

Chronostratigraphy: Pliocene to Lower Pleistocene (Balogh et al. 1994).

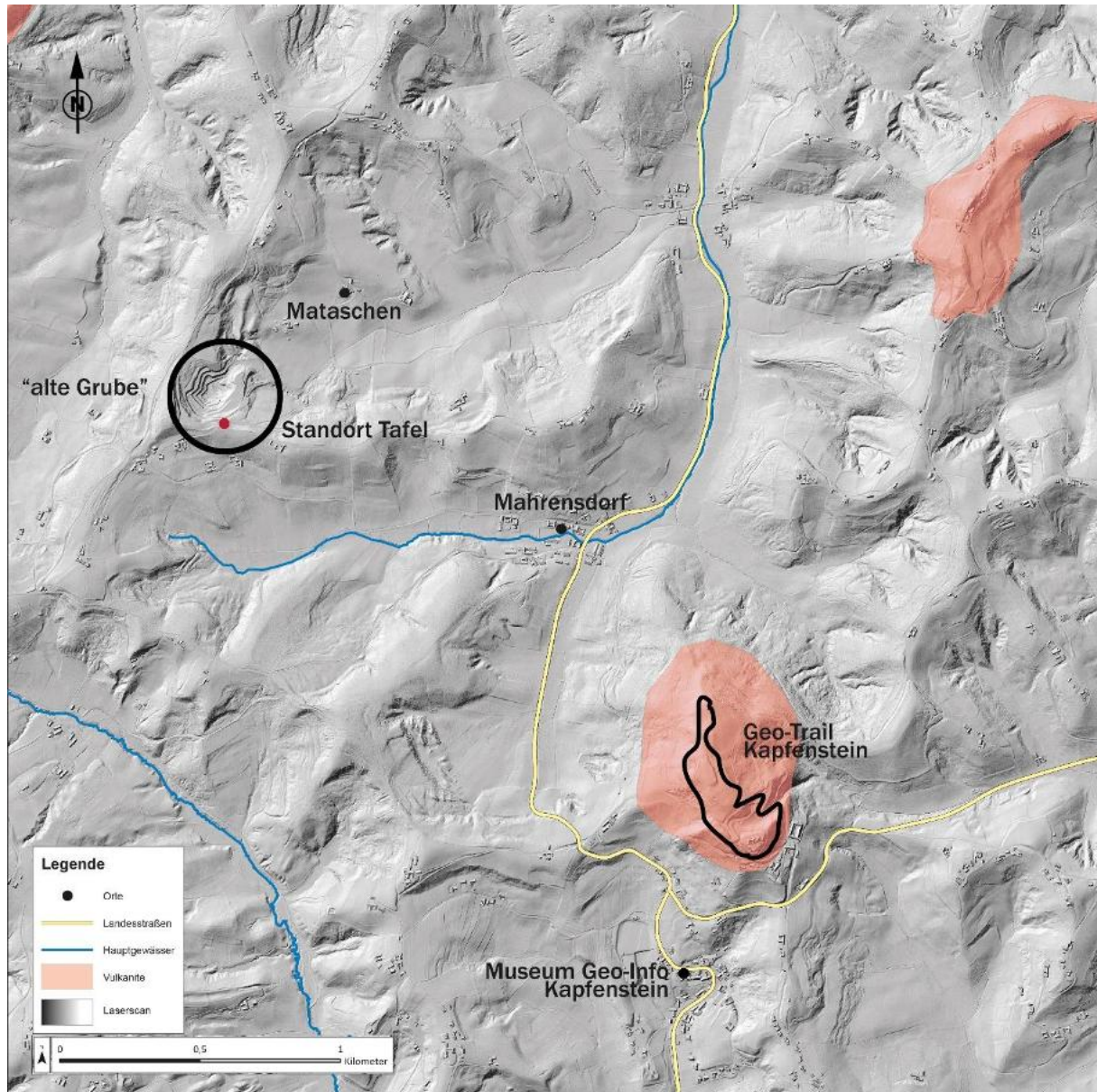


Fig. 17: Laserscan with volcanic rocks in the region of Kapfenstein (GIS-Steiermark).

Description: The pyroclastic Kapfensteiner Kogel reaches 461 m in elevation, is formed by inward to the centre dipping pyroclastic beds and surrounded by Pannonian sediments. Chaotic, unsorted pyroclastic rocks with a high content of Neogene sediments form the basis of the southern flank of the hill. Going up the way on the southern side (beneath the castle) the matrix supported rocks become layered and increase gradually in pyroclasts and xenocrysts, embedded in a fine-grained matrix. The pyroclastic succession in the centre of the hill shows well-layered ash tuffs and lapilli tuffs, locally enriched with Iherzolite xenoliths

(“Olivinbomben”). From an outcrop on top of the hill chaotic sedimentation with a high content of re-deposited pyroclastic rocks and gravel are described. The Kapfensteiner Kogel and the surrounding volcanic remnants in the area south of Fehring are famous for the occurrence of Ihercolite xenolithes (“Olivinbomben”) from the upper mantle (Kurat et al. 1980; Dobosi et al. 1999; Falus et al. 2000). The prominent hill of Kapfenstein, adorned with yet another castle, is famous for a wide variety of xenoliths of both crustal and upper mantle origin (Mogessi et al. 2005). The various features of the volcano-sedimentary environment are described and are visible in exposures along the “Geotrail”. Mantle xenoliths can be found at a few locations along the trail and in exposures immediately beneath the castle. Several outcrops around the flanks of the hill are like windows into the architecture of the volcano and are integrated in a geotrail. Eleven stations inform about volcanism in the Styrian Basin and the volcanic genesis of the Kapfensteiner Kogel (Messner & Loitzenbauer 2001).

Interpretation: In comparison with the volcanic succession of Riegersburg (Fritz 1996) and similar volcanic remnants in the Southern Slovakia (e. g., Hajnacka, Surice; Konecny et al. 2004) and the Bakony–Balaton Highland in Hungary (e. g., Var-hegy; Martin & Nemeth 2004), the pyroclastic succession of the Kapfensteiner Kogel seems to be an exposed diatrem. The high content of Neogene sedimentary rock fragments in a fine-grained, tuffaceous matrix, represents the initial, phreatomagmatic stage of a maar development. Well-stratified, palagonite tuffs with a changing percentage of basaltic fragments, synvolcanic deformations, alternating surge and pyroclastic fall deposits with impact structures, imply variable mechanisms of eruption in the development stage. The uppermost succession documents a predominantly sedimentary development influenced by erosive processes at the end of the volcanic activity.

The community Kapfenstein, situated in the “Steirisches Vulkanland”, has a great historical connection to earth sciences because of the famous geologist Winkler-Hermaden, who was the owner of Kapfenstein castle. In 2001 a geotrail was installed and visitors have the possibility to get information about volcanism in the Styrian Basin (Messner & Loitzenbauer 2001). Several projects with geo-scientific content (e. g., info-centre to the regional geology, based on the rock-collection of Winkler-Hermaden) are supported by the community Kapfenstein. The name “Steirisches Vulkanland” is used for the region and created by the organisation, which is the backbone of the economic and cultural development of this region.

Important references: Heritsch (1915), Winkler-Hermaden (1957, cum lit.), Messner & Loitzenbauer (2001).



Fig. 18: Geotrail at Kapfenstein.

Stop 2 – Claypit Matschen

Topic: Pannonian sediments, landscape in change, projects with schools, preservation of a “prehistoric giant”.

Locality: Claypit Mataschen/Kapfenstein, GK M34 [EPSG 31256] RW: -28984,05 HW: 196212,36; SH: 342 (Fig. 17, Fig. 19).

Lithostratigraphy: Feldbach Formation (Gross 2022).

Chronostratigraphy: Early Pannonium.

Description: From 1998 to 2005, the Mataschen clay pit hosted several school excursions under the title "Fossil Excavation." Over 2,500 students searched for fossils together with scientists, thus contributing to the geological exploration of the region. The newly acquired scientific findings were compiled in the form of a monograph on the Mataschen clay pit (Gross 2004). Painted reconstructions by Fritz Messner illustrate the findings of the scientific work (Fig. 20, Fig. 21). The recovery of a tree trunk almost 5 meters long was another exciting project in 2006 (Fig. 22).



Fig. 19: The clay pit Mataschen in the municipality of Kapfenstein in summer 2020, photo I. Fritz

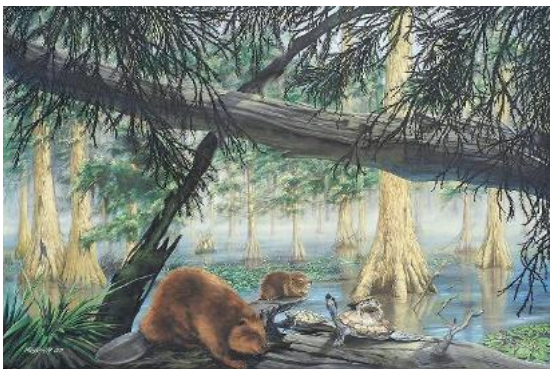


Fig. 20: "Swamp forest with beaver and turtle" – Mud flats in Kapfenstein 11.5 million years ago, oil on canvas, F. Messner 2003, UMJ Geology & Paleontology

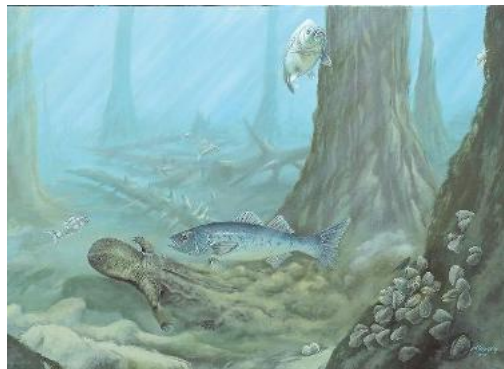


Fig. 21: "Flooded swamp forest with sea bass and giant salamander" – Mud flats in Kapfenstein 11.5 million years ago, oil on canvas, F. Messner 2003, UMJ Geology & Paleontology



Fig. 22: Salvage and conservation of a giant tree, C. Kant

Stop 3 – Quarry Steinberg

Topic: Phreatomagmatic eruptions, scoria, lavalake, mining.

Locality: Basalt quarry Steinberg/Feldbach, „Quarry Mühldorf“, GK M34 [EPSG 31256] RW: - 31530,4 HW: 199402,51; SH: 464 (Fig. 23, Fig. 24).

Lithostratigraphy: Pliocene to Lower Pleistocene (Gross 2022).

Chronostratigraphy: Pliocene to Lower Pleistocene.

Description: An active quarry is open for volcanogeological reworking!

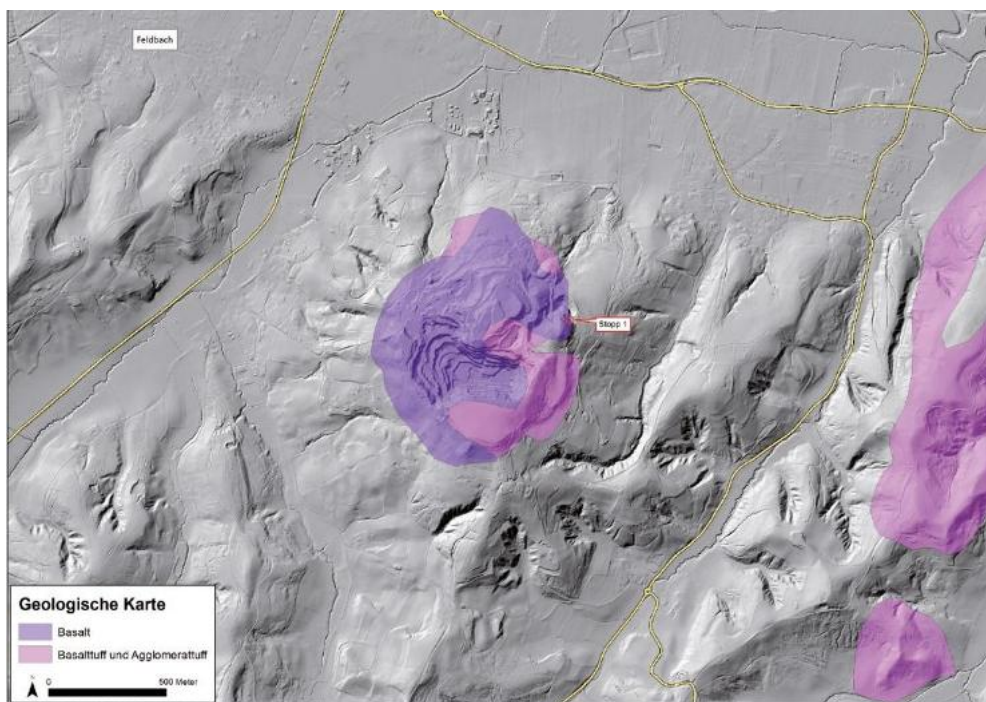


Fig. 23: Laserscan with volcanic rocks and the Basalt quarries of Steinberg/Feldbach (GIS-Steiermark).

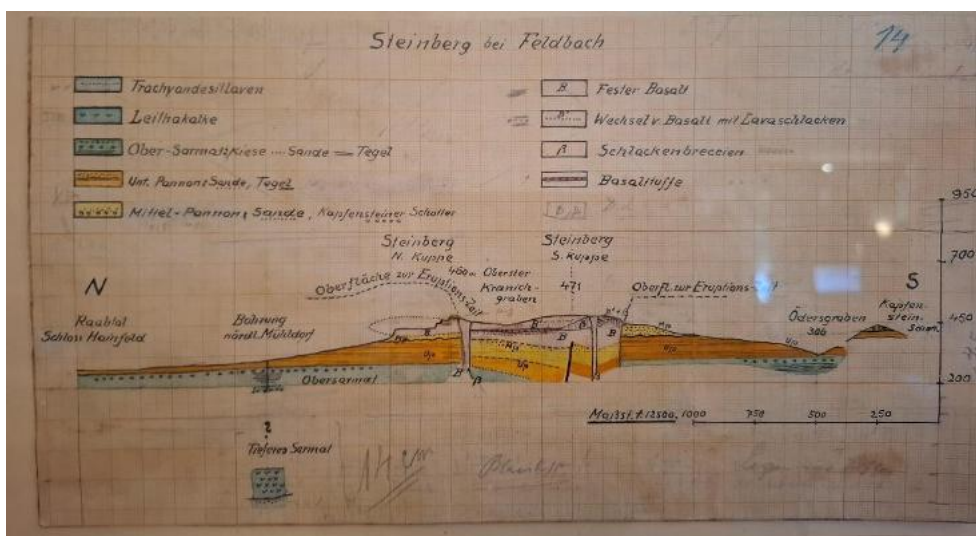


Fig. 24: N-S profile section through the Steinberg (Winkler-Hermaden, date unknown)



Fig. 25: Basalt quarry Steinberg

Stop 4 – Riegersburg

Topic: Point of view, diatreme, maar lake sediments, pyroclastic rocks, xenolithes.

Locality: Riegersburg “diatrem”, GK M34 [EPSG 31256] RW: -30264,13 HW: 207149,14; SH: 450 (Fig. 26, Fig. 30, Fig. 31).

Lithostratigraphy: „Basalt and Tuff/Tuffite“ (GROSS 2022).

Chronostratigraphy: Pliocene to Lower Pleistocene (Balogh et al. 1994).



Fig. 26: The Riegerburg on a diatreme



Fig. 27: Panorama view from Riegersburg to the south

Description: The rock is the erosion residue of a diatreme and, due to its height, is “THE” viewpoint in the “Steirisches Vulkanland” (Fig. 27). A general dipping inward of pyroclastic beds to the center can be observed. The rocks show many signs of a phreatomagmatic eruption mechanism. The low vesicularity of the juvenile components, the high frequency and great number of eruptions are just as characteristic of phreatomagmatic eruptions as the low-angle cross-stratification which can be detected in some places. The mantle xenoliths embedded in the host basalt of this area are usually rather small (up to a few centimetres), some of them nicely preserved in the building stones used for the pavements, walls and doorways of the castle. In some cases gabbroid inclusions in basaltic bombs are documented. However, most of the xenoliths found in this locality are blocks of Neogen sediments and blocks of layered ash/lapilli tuffs, very prominently exposed along the footpath up to the Riegersburg. The memorial site (near the Lichteneggertor) is underlain by almost horizontal layers, which provide evidence of sedimentary formation processes at the beginning of the lake stage (e.g., slip folds of sedimentary slabs, (Fig. 28).



Fig. 28: Slip folds in the base sediments at the beginning of the maar lake stage in Riegersburg

Important references: Fritz (1996).

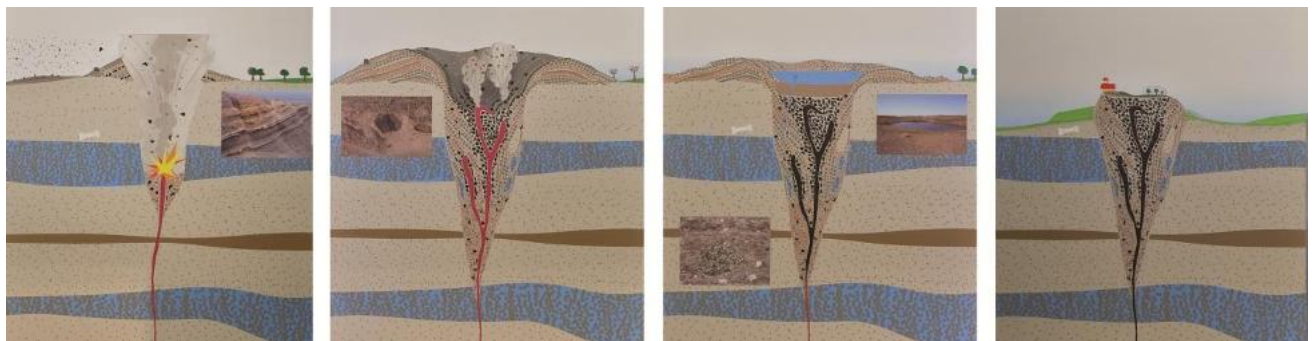


Fig. 29: Maar-diatrem volcano Riegersburg: 4 stages of development: initial – growth – sedimentation – erosion (modified after Lorenz 1986).

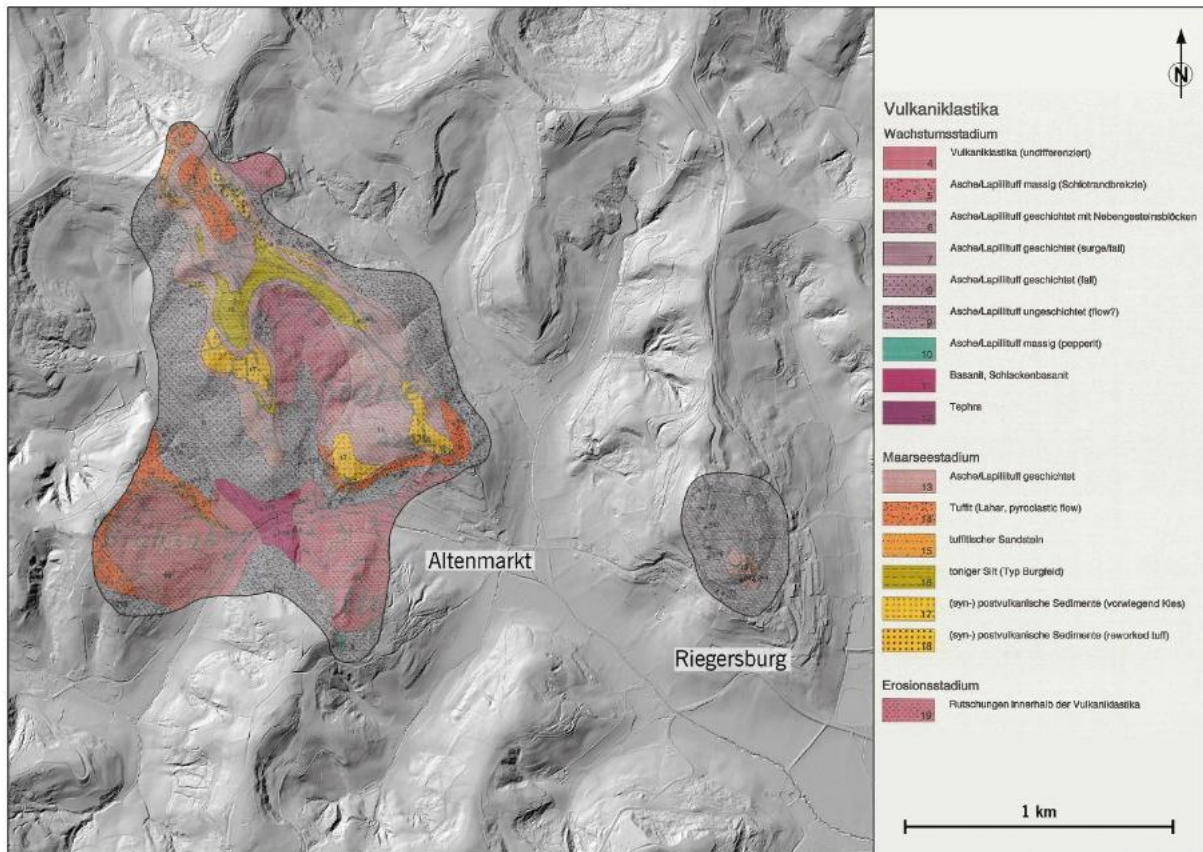


Fig. 30: Laserscan with volcanic rocks in the area Altenmarkt - Riegersburg. (GIS-Steiermark).



Fig. 31: Eruption of the Riegersburg volcano (in front the maar lake Altenmarkt), 3,71 million years (F. Messner, 2024)

Stop 5 – Altenmarkt / Riegersburg

Topic: Maar, typus – location for “Altenmarkt - Formation” (not yet defined) , pyroclastic rocks, maar lake sediments, geophysics.

Locality: Altenmarkt - Grazbachtal, GK M34 [EPSG 31256] RW: -31799,41 HW: 207396,68; SH: 311 (Fig. 30, Fig. 32).

Lithostratigraphy: „Basalt and Tuff/Tuffite“ (GROSS 2022).

Chronostratigraphy: Pliocene to Lower Pleistocene (Balogh et al. 1994).

Description: In the area of the Altenmarkt valley junction, volcanic tuff was mined at several locations. One quarrying site was located directly behind the house "Maberl", before the fork in the road. A disconformity (Fig. 32) is clearly visible on the west side of the quarry wall. Evidently, the previously deposited, layered ash-lapillite layers were pierced by a new explosive volcanic eruption. Pyroclastic rocks were deposited unconformably along the inner rim of the resulting explosion crater. Beginning with a sequence of host-rock-rich ash-lapillite tuffs, the process soon led to the production of predominantly juvenile clasts, blocks, and vesicle-rich volcanic bombs, which also left bomb sag structures (Fig. 33). Well layered fine grained sediments provide evidence of the presence of a maar lake at the end of the volcanic activities in Altenmarkt.

Important references: Fritz (1996).

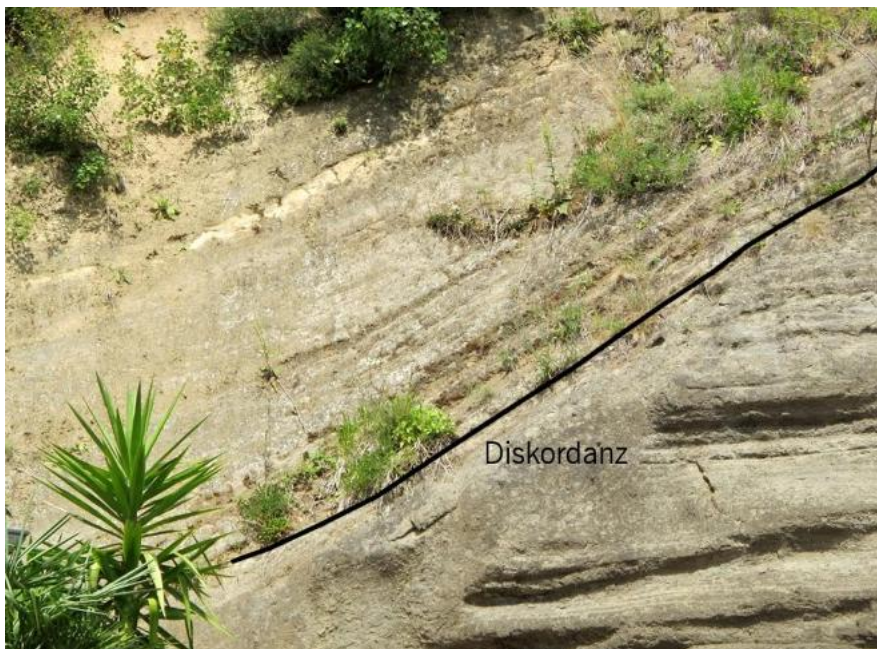


Fig. 32: Diskordanz in layered ash-/lapilli tuff; house "Maberl", Altenmarkt - Riegersburg.



Fig. 33: Layered ash-lapilli tuff with bomb sag structures; change of eruption style; house Maberl, Altenmarkt - Riegersburg.

Stop 6 – Quarry Hochstraden

Topic: Lava flow, former valley level, inversion of the landscape.

Locality: Basalt quarry Hochstraden, “Quarry Wilhelmsdorf”, GK M34 [EPSG 31256] RW: - 31088,23 HW: 188990,11; SH: 496 (Fig. 34, Fig. 35).

Lithostratigraphy: „Basalt and Tuff/Tuffite“ (GROSS 2022).

Chronostratigraphy: Pliocene to Lower Pleistocene (BALOGH et al. 1994).

Description: The youngest volcano in the Styrian Vulkanland awaits a volcanogeological re-examination!



Fig. 34: Basalt quarry Hochstraden, view to the north (Fritz, I. 2025)



Fig. 35: Eruption of the Stradnerkogel volcano, 1,7 million years (F. Messner, 2024)



Fig. 36: Base of the lava flow at the Stradner Kogel

Stop 7 – Quarry Klöch

Topic: Basalt, scoria, various eruption styles, minerals.

Locality: Quarry Klöch (owned by the ALAS Klöch GmbH), Klöcher Klause; GK M34 [EPSG 31256] RW: -28034,25 HW: 181263,17; SH: 281 (Fig. 37, Fig. 38, Fig. 39, Fig. 40)

Lithostratigraphy: „Basalt and Tuff/Tuffite“ (GROSS 2022).

Chronostratigraphy: Pliocene to Lower Pleistocene (BALOGH et al. 1994, Schnepf et al. 2021).

The Klöch quarry opens a window into the southernmost volcanic field of the „Steirisches Vulkanland“. Like a cross-section of a cake, it allows a direct view into the interior of a complex volcanic edifice. Upon closer examination, a series of nested scoria cones can be identified, along with their associated former vents, in which the last ascending magmas solidified. Occasionally, the quarrying activity also reveals magmatic dikes that cut through the entire volcanic structure.

Occasionally the dark, typically dense basalt contains cavities and inclusions that, under magnification or to a trained eye, reveal a fascinating microcosm of minerals.

Winkler (1913) gave a comprehensive description of the “Basaltmassiv von Klöch”. He supposed a caldera, filled up with tuff, basanite and scoria. Winkler described a fluctuating development with explosive volcanism at the beginning.

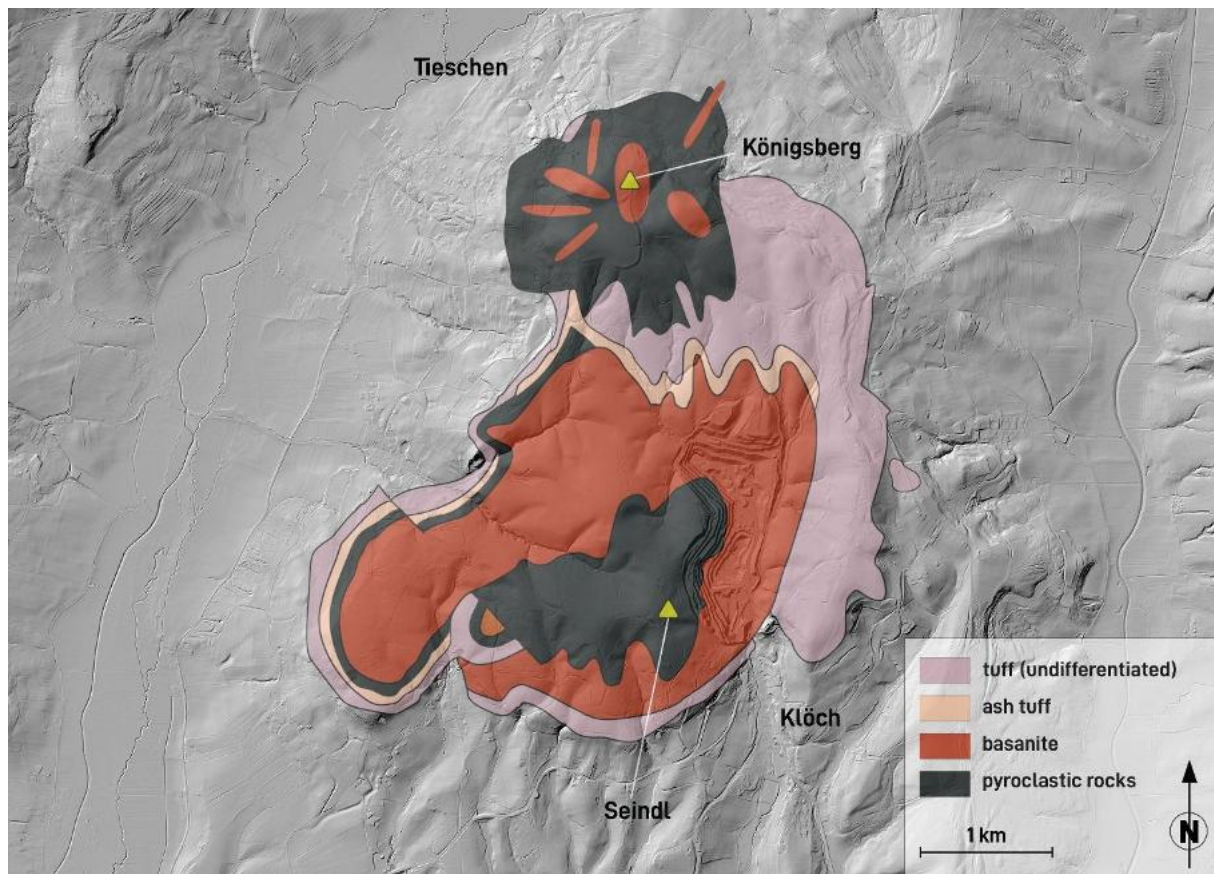


Fig. 37: Laserscan with volcanic rocks from the "Königsberg-Klöch volcanic field" (GIS-Steiermark).

Well-bedded tuff-layers (ash-, lapilli tuffs) form the basis of the volcanic succession and are in discordant contact to Sarmatian sediments. Pyroclastic rocks and intrusive nepheline-basanites are exposed in the quarry. The intrusions are voluminous at the basis, sometimes form columnar joints, and reduce to the top. Some dikes have a sharp but irregular contact zone to the scoria. At the upper part of the quarry red, weakly bedded scoriaceous tuff breccia with small lava flows crop out and form the top of the volcanic succession.

A depression between Seindl and Königsberg (Kindsberg in some maps) shows approximately horizontal-layered fine sediments with a great variety of colours. This succession is commonly truncated by large impact sags caused by ballistically emplaced basaltic blocks. The distinctive morphological elevation of Königsberg is build up by pyroclastic rocks like tuff breccias with small dikes.

The quarry Klöch is the largest still active basalt quarry in Austria. Intensive quarrying, which began in the 1930s, has removed a significant part of the eastern edge of the Seindl. The several 10's of metres thick gobble, a pyroclastic breccia with highly vesicular basanitic lava clasts, is relocated to the already exhausted northern part of the quarry.



Fig. 38: Basalt quarry Klösch (white lines: layered scoria; orange lines: basalt / scoria borderline (vents, dikes))

Taucher et al. (1989) publish a monograph about this quarry, listing more than 80 mineral species. This book also contains a lot of photographs and crystal-drawings. Taucher & Hollerer (2001) give a very detailed mineralogical overview including all the references known up to the publishing year. In the meantime, far more than 100 mineral-species are known from this locality – a very high number compared to the actual number of more than 550 mineral-species for the whole of the country of Styria. New mineral species from Klösch can be added almost every second year. New and interesting samples are very often found by highly specialized private-collectors and through sampling and investigations by the Joanneum-scientists.

Interpretation: About 2,5 Ma years ago (K/Ar age for the basalt of Klösch; Schnepf et al. 2021) ascending magma interacted with water in the area of Klösch. The palaeogeographic situation at that time is uncertain. Beside sediments from the Sarmatian, like gravel, sand and silt, Winkler (1913) described a pre-volcanic gravel cover. Initial phreatomagmatic eruptions produced pyroclastic rocks like ash tuffs and lapilli tuffs rich in siliciclastic clasts, which are inferred to have been derived from the Neogene succession. A big crater (maar) was formed in this first stage of volcanic succession (initial stage sensu Lorenz 1986).

After the external water supply had exhausted, magma reached the surface and magmatic explosive and effusive volcanic activity started. Several feeder dikes produced small lava flows, welded and unconsolidated spatter rich deposits.

In the northern area of the quarry blocky jointing basanites are covered from a fine-grained, and well-layered succession. This reddish, brown, yellowish and grey development is locally interrupted by a lava flow, which started with an explosive phase documented by bomb sag structures and fallout lapilli.

A accompanying volcano geological documentation and a monitoring in the mining region, supported by the quarrying, will help us to understand the volcanic succession in this area and to get a 3D-model from the inner architecture of the intrusive/effusive basanite and agglutinated scoria capped mesa.

There is a great demand on the exploit basanite. Because of the high quality of the material it is used as superficial layer on roads and aero landing runways.

Maria Nievoll finished her studies in this area 2014 with a master thesis: Geophysical studies at the Pli-/Pleistocene volcanomassiv of Königsberg – Klösch. The investigation was focused on the structures of the basaltic rocks. Geoelectrical and geomagnetic measurements were performed around the basalt quarry. Geoelectrical and geomagnetic measurements provide an acceptable tool to detect basalt bodies. The results of a new volcanogeological study will be presented by Ioan Seghedi at the conference: “Changing eruption styles of Pliocene Klösch monogenetic volcanic field in South Eastern Austria, Styrian basin” (page 53).

Important references: Nievoll (2014), Taucher et al. (1989), Winkler (1913, 1927a), Winkler-Hermaden (1939).



Fig. 39: Eruption of the “Königsberg-Klöch volcanic field”, 2,51 million years (F. Messner, 2024)

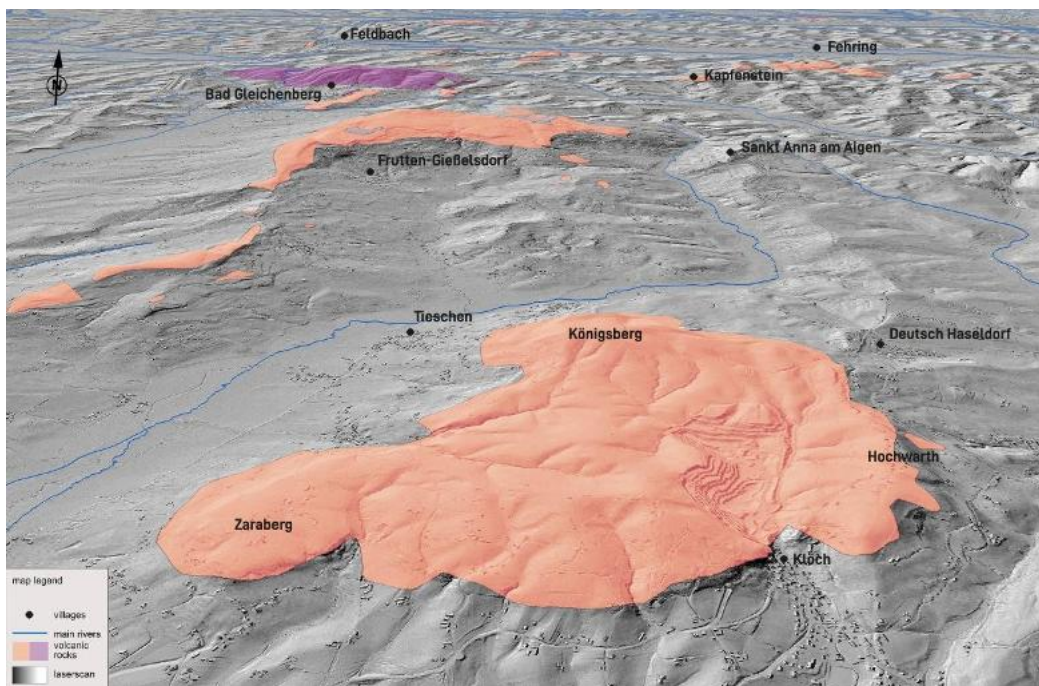


Fig. 40: Laserscan with volcanic rocks in the southern part of the “Steirisches Vulkanland” (GIS-Steiermark).

Stop 8 – Zaraberg

Topic: Phreatomagmatic eruptions, accretionary lapilli, lava lake.

Locality: Old quarry at the southern flank of the Zaraberg, about 600 m north of the mainstreet, GK M34 [EPSG 31256] RW: -29677,96 HW: 180511,56; SH: 338 (Fig. 37, Fig. 39, Fig. 40).

Lithostratigraphy: „Basalt and Tuff/Tuffite“ (GROSS 2022).

Chronostratigraphy: Pliocene to Lower Pleistocene (BALOGH et al. 1994, Schnepf et al. 2021).

Description: The outcrop of an old small quarry on the southern flank of the Zaraberg shows well-layered tuffs, covered by a basanitic lava flow. The succession is built up by alternating ash tuff and lapilli tuff of phreatomagmatic origin with accretionary lapilli rich units and dunes. The upper part of the tuffs is reddish coloured. The tuff development is overlain by partly agglutinated scoria passing vertically into a lava flow.

Interpretation: The pyroclastic succession, with finely bedded accretionary lapilli tuffs, indicates phreatomagmatic eruptions and were formed in the initial stage of the volcanic development. Palagonitization indicates wet conditions. Moderately dipping pyroclastic beds, probably surge and fall deposits, dip inward to the centre of the hill. When the lava flow covered this succession, the top was fritted.

Important reference: Winkler (1913)

Stop 9 – Königsberg / Tieschen

Topic: Phreatomagmatic eruptions, scoria, dike.

Locality: Small old quarry at the western flank of the Königsberg, GK M34 [EPSG 31256] RW -28880,44 HW: 182797,35; SH: 368 (Fig. 37, Fig. 39, Fig. 40).

Lithostratigraphy: „Basalt and Tuff/Tuffite“ (GROSS 2022).

Chronostratigraphy: Pliocene to Lower Pleistocene (BALOGH et al. 1994, Schnepf et al. 2021).

Description and Interpretation: The Königsberg, occasionally also called Kindsberg, is the remaining remnant of a volcano whose morphology looks like a "typical" volcano. In fact, its development began explosively (phreatomagmatic eruptions) with the formation of a depression within which a cinder cone subsequently developed. A special feature are the "radial fissures" that cut through the cinder cone. These are magmatic veins that rose and solidified within the volcano. Traces of human activity can be found in many places: building stones were extracted from numerous quarries, and fascinating artifacts testify to a settlement history dating back several thousand years.

Stop 10 – Riegersburg (Winery Eibel at Starzenberg)

Topic: Viewpoint.

Locality: Top of the hill, 1,5 kkm north of Riegersburg; GK M34 [EPSG 31256] RW -30925,27 HW: 208809,9; SH: 414.

Content: Introduction to the geological development of the region - "From hole to mountain" - Can you see time in space?

Stop 11 – “Ostbruch” Steinberg / Feldbach

Topic: Phreatomagmatic eruptions, discordance, basaltintrusion.

Locality: Former quarry at the northeastern flank of Steinberg, GK M34 [EPSG 31256] RW: - 31119,68 HW: 199750,39; SH: 390 (Fig. 41).

Lithostratigraphy: „Basalt and Tuff/Tuffite“ (GROSS 2022).

Chronostratigraphy: Pliocene to Lower Pleistocene (BALOGH et al. 1994, Schnepf et al. 2021).

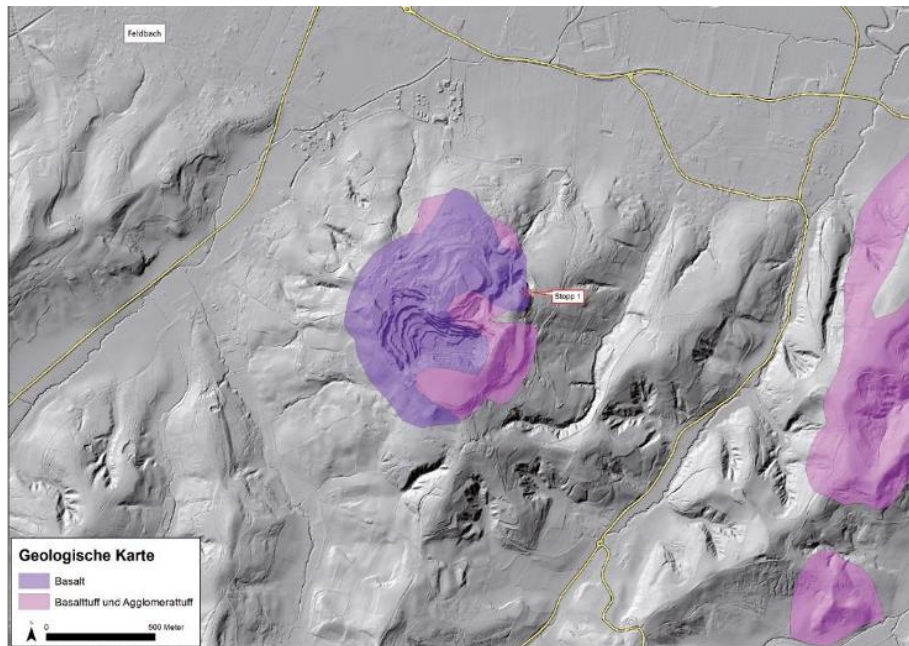


Fig. 41: Laserscan with volcanic rocks and the Basalt quarries of Steinberg/Feldbach (GIS-Steiermark).

Description: Basalt was mined on the northeastern edge of the volcano on the Steinberg near Feldbach until 2005 (Ostbruch quarry). Most of this quarry has been refilled, but a small window remains, providing insight into a dynamic history of development. Sands, volcanic tuffs, and basalts are visible side by side. This former quarry (Fig. 42) is a textbook example for training geological reasoning, but also for logical thinking in general. Based on the exposed rocks and their deposition, geological processes can be sequenced chronologically. The different lithologies (layered sands from the Pannonian, layered volcanic ash-lapilli tuffs with a high proportion of sediment (epiclasts), basalt, and their contact surfaces "tell" about their formation history. With some geological knowledge, numerous other observations regarding the genesis of the situation can be recognized.

When hot magma cools, basalt columns can form. These "grow" at right angles to the cooling surfaces: vertical columns therefore form when it was cold above and/or below. In the area of contact with magma, the heat often causes the surrounding rock to frit.



Quarry „Ostbruch“ 2004 visible today (Bild 1, 2 3)



Bild 1
section of image quarry „Ostbruch“ -
about 2,4 mio. years



Bild 2
section of image quarry - shortly thereafter



Bild 3
section of image
quarry - today



fritted sand in contact
with horizontal basalt
columns (section of Bild 3)

Fig. 42: “in order” - stages of development.

Interpretation (Geopoint *information board*): What we see here was formed around 2.4 million years ago, approximately 100 m below the surface of the land at that time – but let's take it one step at a time: around 11 million years ago, sand and gravel were deposited here, as in large parts of the Styrian volcanic region. (Image/Bild 1, left side of image) - Around 2.4 million years ago, magma rose from the Earth's mantle and came into contact with groundwater, causing violent explosions and ejecting a mixture of sand, gravel, and torn magma (basalt fragments) along with large amounts of water vapor (Image 1/Bild1, right side of image). The resulting explosion craters were immediately filled in again and layered tuffs were also deposited. (Image/Bild 2, right-hand side of image). - Hot magma rose to the top of the explosion crater and partly to its edge (Image 2, left-hand side of image). The existing sand in the contact area was “naturally fired” (sintered) by the heat, and the slowly cooling magma formed columns (Figure 3, left part of the image). - The originally flat-sloping volcanic layers were steeply displaced by subsequent movements (Figure 3, right part of the image).

Important reference: Winkler (1913).

Stop 12 – Burgfeld

Topic: Maar lake sediments, pyroclastic rocks, geophysics, geopoint.

Locality: Clay pit Burgfeld (owned by the Lias Österreich GesmbH), 2 km S Fehring, GK M34 [EPSG 31256] RW: -24724,12 HW: 198001,78; SH: 367 (Fig. 43, Fig. 44, Fig. 46)

Lithostratigraphy: „Basalt and Tuff/Tuffite“ (GROSS 2022).

Chronostratigraphy: Pliocene to Lower Pleistocene (BALOGH et al. 1994)

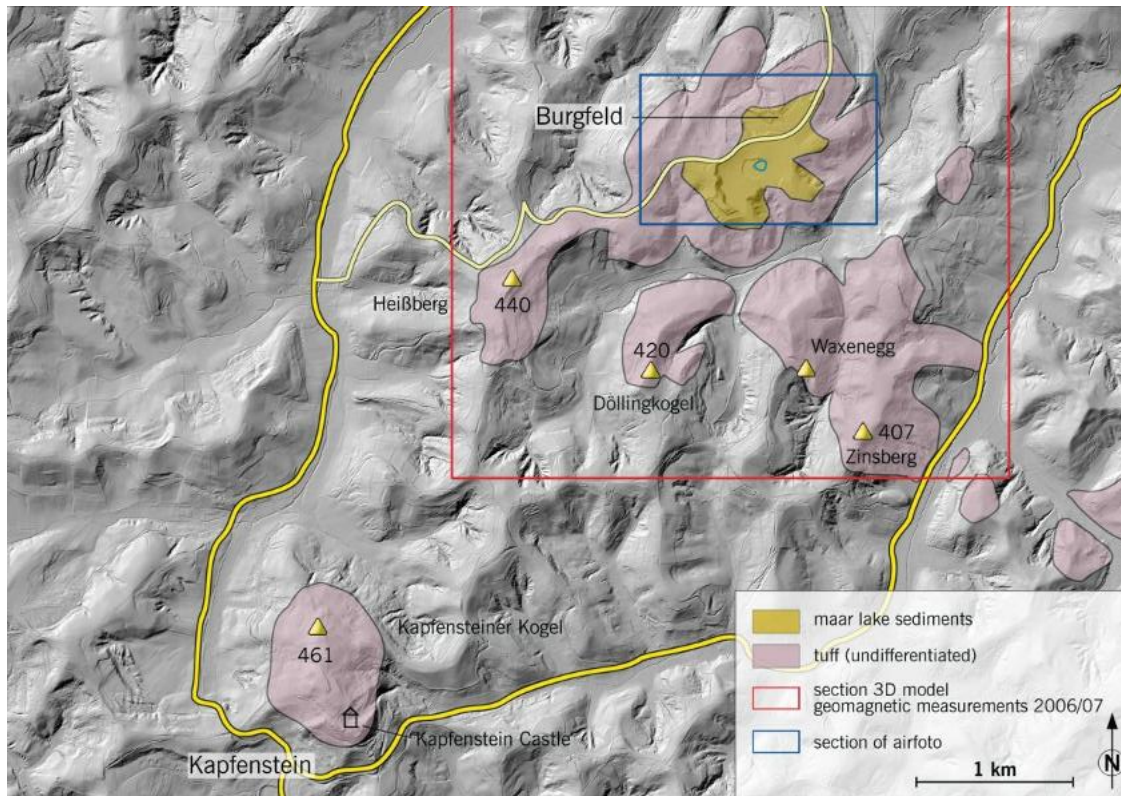


Fig. 43: Laserscan with volcanic rocks in the volcanic field of Kapfenstein and Fehring (GIS-Steiermark).

Description: There are erosive remnants of a complex maar volcano south of Fehring, which has a diameter of at least 3 km. The volcanic succession passes discordantly the Neogene sediments. Although the maar lake sediments (laminated pelites) have been mined since 1961, there is no detailed geological map available. Vincenz (1988) described a general profile for the lake sediments in the clay pit, based on exploration drillings and Pöschl (1991) created a model for the volcanoclastic succession at Beistein (at the eastern side of the volcanic area).



Fig. 44: Eruption of the Kapfenstein volcano (in front the maar lake Burgfeld), 4,86 million years (F. Messner, 2024)

Several small outcrops, where “tuff-stones” have been quarried for building houses, show ash tuff, lapilli tuff and massive pyroclastic flow deposits. A big abandoned quarry (“Quarry chapel” A1; Fig. 45 a) with at least 100 m extension, is located on the north side of the clay pit. Well-layered ash/ lapilli tuffs show ripple marks (Fig. 45 b), cross-stratification and are locally cut by channels (Fig. 45 d). Small layers with fine-grained sediments (pelites) are intercalated at the hanging of this quarry. Rounded sedimentary blocks, up to 50 cm in diameter, embedded in ash/lapilli tuff, can be seen sporadically (Fig. 45 c).



Fig. 45: Outcrop A1 ("Quarry chapel"). a) Overview. b) Ripple marks. c) Sedimentary block, embedded in ash/lapilli tuff. d) Channel.

In 1992 the Geological Survey of Austria performed aerogeophysical measurements in the region of Bad Gleichenberg to verify the mineral resources and to assist regional mapping (Seiberl & Lobitzer 1992). Electromagnetic, magnetic and radiometric methods were applied along profiles with 200 m distance. Anomalies with high resistivity values correlate with the Plio-/Pleistocene volcanic remnants and there is a significant maximum especially in Burgfeld (Fig. 46). Electromagnetic measurements seem to be better suitable to discriminate between volcanoclastic rocks and the pre-volcanic sediments than magnetic measurements.

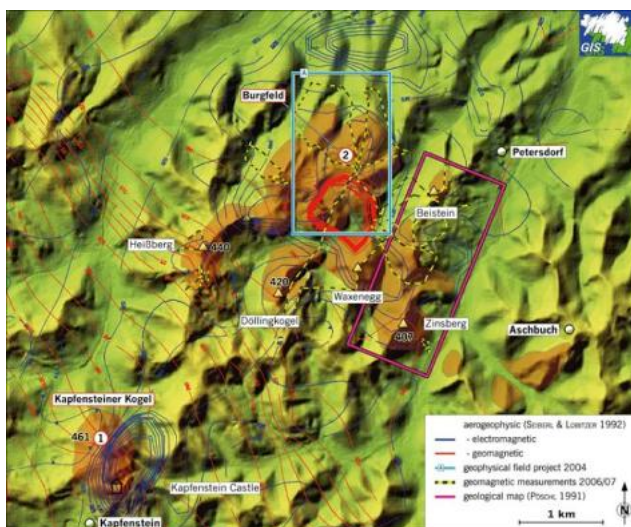


Fig. 46: Overview from geophysical measurements in the area of Burgfeld (Gross et al. 2007)

Based on the successful geomagnetic measurements in the volcanic area of Altenmarkt near Riegersburg with a similar maar volcano structure (Fritz 1996) the deployment of ground geophysics in the volcanic area south of Fehring was discussed. A geological mapping of the volcanic area of Fehring started with geophysical investigations. The joint geophysical field project 2004 of the universities MU Leoben and TU Clausthal yielded first ground-geophysical data including gravimetric, magnetic, multi-electrode geo-electrical and IP measurements, georadar and refraction seismics of the Burgfeld area (

Fig. 46). The investigations aimed at getting new information about the total extension of this geological structure, the position of its centre, and the thickness of the lake sediments.

Interpretation: The clay pit Burgfeld represents the remnants of maar lake sediments (Winkler 1927a). The laminated pelites are underlain by several metres thick, gravelly, coarse sands with lherzolite xenoliths. Horizontal bedding of the laminated pelites with great extension documents a continuous, quiet development. The massive bed, which can be observed in a great area, too, might be deposited by a pyroclastic surge. Rough edged quartz pebbles, some of them are brittle, angular lapilli tuff fragments as clasts, "fresh", angular lherzolite xenoliths and irregular formed blocks of Neogene sediment indicate dynamic source aspects. A layer, with rounded lapilli from the uppermost outcrop, indicate some degree of reworking and remobilisation of tephra. Indications to sedimentary processes can be recognized in the succession of the old quarry (A1). It represents the northern marginal facies of the maar lake.

Pöschl (1991) made a schematic model for the volcanoclastic succession and the assumed maar-environment of this volcanic area. New geophysical data indicate a ring structure, including almost all volcanic remnants and a significant disturbing body located in the centre (south of clay pit Burgfeld) of the volcanic area of Fehring. A detailed geological mapping is necessary to understand the relation between phreatomagmatic deposits from the surrounding elevations, the maar lake sediments with intercalated volcanoclastic layers and the supposed post-volcanic mass movements, which seem to have happened when erosion started and creeks began to incise. The relation of the volcanoes of Riegersburg (diatrem) to Altenmarkt (maar; Fritz 2006) looks similar to the one of Kapfenstein (diatrem) to Fehring (maar). They might have had comparable developments too.

Important references: Winkler (1927a), Pöschl (1991), Gross et al. (2007).

Stop 13 – Museum Geo-Info Kapfenstein

Topic: Museum, Prof. Dr. Arthur Winkler-Hermaden, geotourism.

Locality: Center of Kapfenstein (community center), meeting location; GK M34 [EPSG 31256]
RW -27308,24 HW: 194117,57; SH: 310.

Content: The small museum shows the rock collection of the famous geologist Winkler Hermaden. He did fundamental geological work in Styria and spent much time in studying the volcanic rocks. Up today his publications are the base for modern studies. The museum gives a geological entrance in the region “Steirisches Vulkanland”.



Fig. 47: Museum Geo-Info Kapfenstein.

Stop 14 – St. Anna am Aigen

Topic: Point of view to the “Stradner Kogel”, “Inversion of the landscape”, fossil-bearing limestone (Sarmatian) as a building block.

Locality: Center of St. Anna am Aigen; GK M34 [EPSG 31256] RW -27296,89 HW: 188074,69; SH: 403.



Fig. 48: View to the Stradner Kogel (with the former valley level marked) from St. Anna am Aigen.

Content: In St. Anna am Aigen, we have direct access to the oldest and youngest geological rocks in the Styrian Volcanic Region. In the "Türkengraben" (Turkish Trench), we can climb the approximately 400-million-year-old rock of a former island, and on the Stradnerkogel, we hike along a 1.7-million-year-old lava flow that, following its morphology, flowed into a valley. The lava mass, now a very hard basalt rock, resists erosion more than the much softer surrounding rocks (e.g., sand, clay), resulting in an inversion of the landscape: a former valley became a mountain!

The center of St. Anna am Aigen stands on the remains of what were once widespread deposits from a shallow sea. Limestone beds, alternating with sand layers, testify to cyclical sea-level fluctuations, and occasional fossil soil formations bear witness to complete drying out. The limestone, rich in fossilized mussels and snails, was used as building blocks in historical times and continues to characterize the townscape today. The "Wine Trail of the Senses" leads through the diverse geology and thus also through frequently changing, long-gone landscapes. Widespread viticulture on diverse rocks and soils gives the present landscape a special character and invites visitors to discover traces of geological development and the associated legends.

Stop 15 – Quarry Weitendorf

Topic: Basalt, mining, fossils, subsequent use.

Locality: Quarry Weitendorf (owned by Heimo Ecker-Eckhofen Group), GK M34 [EPSG 31256] RW: -67556,94 HW: 195586,92; SH: 285 (Fig. 49).

Lithostratigraphy: „Weitendorf Basalt“ (GROSS 2022).

Chronostratigraphy: Middle Miocene (BALOGH et al. 1994).

Description: Basalt has been mined in Weitendorf since ancient times. The crushed rock was used, among other things, as paving stones (e.g., for the city of Graz) and building stones. The quarry is widely known among collectors for its mineral and fossil finds (Ebner & Gräf). Today, this rock is processed into high-quality gravel, as an aggregate for asphalt production, and as water blocks. The owner of the quarry gives a lecture about the planned subsequent use (H. Ecker-Eckhofen, page 7)



Fig. 49: Basalt quarry Weitendorf, view to the east (Fritz, I. 2025)

Important references: Heritsch (1963a), Mauritsch (1975), Ebner & Gräf (1974); Hiden, H.
https://www.hengist.at/wp-content/uploads/Der-vulkan-von-weitendorf-2_2006_4-9.pdf

For further reading

- Anker, J.M. (1809): Kurze Darstellung einer Mineralogie von Steyermark. – 79 p., Verlag Franz Ferstl, Graz.
- Balogh, K., Ebner, F., Ravasz, C. (1994): K/Ar-Alter tertiärer Vulkanite der südöstlichen Steiermark und des südlichen Burgenlandes. – In: Lobitzer, H., Csaszar, G. & Daurer, A. (eds.): Jubiläumsschrift 20 Jahre Geologische Zusammenarbeit Österreich-Ungarn. 2. – 55-72, Geologische Bundesanstalt, Wien.
- BOJAR, H.-P., BOJAR, A.-V., HALAS, S. & WÓJTOWICZ, A. (2013): K/Ar geochronology of igneous amphibole phenocrysts in Miocene to Pliocene volcanoclastics, Styrian Basin, Austria. – *Geological Quarterly*, 57 (3): 405–416.
- Dobosi, L., Kurat, G., Jenner, G.A. & Brandstätter, F. (1999): Cryptic metasomatism in the upper mantle beneath Southeastern Austria: a laser ablation microprobe-ICP-MS study. – *Mineralogy and Petrology*, 67: 143-161, Wien.
- Ebner F. & Gräf W. 1977: Die Fauna von Weitendorf. – Landesmus. Joanneum, Jber. 1976, N.F. 6: 157–163.
- Ebner, F. & Sachsenhofer, R.F. (1991): Die Entwicklungsgeschichte des Steirischen Tertiärbeckens. – *Mitteilungen der Abteilung für Geologie und Paläontologie am Landesmuseum Joanneum*, 49: 1-96, Graz.
- Ebner, F. & Sachsenhofer, R.F. (1995): Palaeogeography, subsidence and thermal history of the Neogene Styrian Basin (Pannonian basin system, Austria). – *Tectonophysics*, 242: 133-150, Amsterdam.
- Falus, G., Szabo, C. & Vaselli, O. (2000): Mantle upwelling within the Pannonian Basin: evidence from xenolith lithology and mineral chemistry. – *Terra Nova*, 12: 295-302, Oxford.
- Flügel, H.W. (1972): Das Steirische Neogen-Becken. – In: Flügel, H.W. (ed.): Führer zu den Exkursionen der 42. Jahresversammlung der Paläontologischen Gesellschaft in Graz. – 199-227, Abteilung für Paläontologie und Historische Geologie der Universität Graz & Abteilung für Geologie, Paläontologie und Bergbau am Landesmuseum Joanneum in Graz, Graz.
- Flügel, H.W. (1975): Die Geologie des Grazer Berglandes. – *Mitteilungen der Abteilung für Geologie, Paläontologie und Bergbau am Landesmuseum Joanneum, Sonderheft 1*: 1-288, Graz.
- Flügel, H.W. (1984): Das Paläozoikum und Mesozoikum des Remschnigg, Sausal, von St. Anna am Aigen und des Steirischen Tertiärbeckens. – In: Flügel, H.W. & Neubauer, F.: Steiermark. – 54, Geologie der österreichischen Bundesländer in kurzgefaßten Einzeldarstellungen, Erläuterungen zur Geologischen Karte der Steiermark, Geologische Bundesanstalt, Wien. Flügel, H.W. (1988): Geologische Karte des prätertiären Untergrundes. In: Kröll, A., Flügel, H.W., Seiberl, W., Weber, F., Walach, G. & Zych, D.: Erläuterungen zu den Karten über den prätertiären Untergrund des Steirischen Beckens und der Südburgenländischen Schwelle. – 21-27, Geologische Bundesanstalt, Wien.
- Flügel, H.W. (1995): Bericht über geologische Aufnahmen im Paläozoikum und Tertiär auf Blatt 164 Graz. – *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 138(3): 541-542, Wien.
- Flügel, H. & Hertisch, H. (1968): Das Steirische Tertiär-Becken. – *Sammlung geologischer Führer*, 47: 1-196, Gebrüder Bornträger, Berlin/Stuttgart.
- Flügel, H.W. & Neubauer, F. (1984): Steiermark. – 127 p., Geologie der österreichischen Bundesländer in kurzgefaßten Einzeldarstellungen, Erläuterungen zur Geologischen Karte der Steiermark, Geologische Bundesanstalt, Wien.
- Flügel, H., Heritsch, H., Höller, H. & Kollmann, K. (1964): Grazer Bergland, Oststeirisches Tertiär- und Vulkangebiet. – *Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien*, 57(1): 353-377, Wien.
- Friebe, J.G. (1990): Lithostratigraphische Neugliederung und Sedimentologie der Ablagerungen des Badeniens (Miozän) um die Mittelsteirische Schwelle (Steirisches Becken, Österreich). – *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 133(2): 223-257, Wien.
- Friebe, J.G. (1994): Gemischt siliziklastisch-karbonatische Abfolgen aus dem Oberen Sarmatium (Mittleres Miozän) des Steirischen Beckens. – *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 137(2): 245-274, Wien.
- Fritz, I. (1996): Notes on the Plio-/Pleistocene volcanism of the Styrian Basin. – *Mitteilungen der Gesellschaft der Geologie- und Bergbaustudenten in Österreich*, 41: 87-100, Wien.
- Goldbrunner, J. E. (1988): Tiefengrundwässer im Oberösterreichischen Molassebecken und im Steirischen Becken. – *Steirische Beiträge zur Hydrogeologie*, 39: 5-94, Graz.
- Gross, M. (1998a): Faziesanalyse fluviatiler Sedimente (Obermiozän, Südoststeiermark, Österreich). – *Mitteilungen Geologie und Paläontologie am Landesmuseum Joanneum*, 56: 131-164, 367-371, Graz.
- Gross, M. (1998b): Floren- und Faziesentwicklung im Unterpannonium (Obermiozän) des Oststeirischen Neogenbeckens (Österreich). – *Geologisch-Paläontologische Mitteilungen Innsbruck*, 23: 1-35, Innsbruck.
- Gross, M. (2000): Das Pannonium im Oststeirischen Becken. – *Berichte des Institutes für Geologie und Paläontologie der Karl-Franzens-Universität Graz*, 2: 47-86, Graz.
- Gross, M. (2003): Beitrag zur Lithostratigraphie des Oststeirischen Beckens (Neogen/Pannonium; Österreich). – *Österreichische Akademie der Wissenschaften, Schriftenreihe der Erdwissenschaftlichen Kommissionen*, 16: 11-62, Wien.
- Gross, M. (ed., 2004): Die Tongrube Mataschen - Treffpunkt von Wirtschaft, Wissenschaft und Schule. – *Joannea Geologie und Paläontologie*, 5: 1-278, Graz.
- Gross, M. (2006): Der versunkene Wald von Mataschen. – 5-39, Landesmuseum Joanneum GmbH, Graz.
- Gross, M., Erhart, C. & Piller, W.E. (2005): Neogen des Steirischen Beckens. – 25 p., Exkursionsführer 75. Jahrestagung der Paläontologischen Gesellschaft, Karl-Franzens-Universität Graz, Graz.
- Gross, M., Fritz, I., Harzhauser, M., Hubmann, B., Moser, B., Piller, W.E., Soliman, A., Suttner, T.J. & Bojar, H.-P.: The Neogene of the Styrian Basin – Guide to Excursions. – *Joannea Geologie und Paläontologie*, 9: 117-193, Graz.
- Gruber, W., Hermann, S., Sachsenhofer, R.F. & Stingl, K. (2003): Kohlefazies und Sedimentologie der Eibiswalder Bucht (Steirisches Becken). – *Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft*, 93: 15-29, Wien.

- Haas, M., Daxner-Höck, G., Decker, K., Kolcon, I., Kovar-Eder, J., Meller, B. & Sachsenhofer, R.F. (1998): Palaeoenvironmental Studies in the Early Miocene Lignite Opencast Mine Oberdorf (N Voitsberg, Styria, Austria). – *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 140(4): 483-490, Wien.
- Handler, R., Ebner, F., Neubauer, F., Bojar, A.-V. & Hermann, S. (2006): $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Miocene tuffs from the Styrian part of the Pannonian Basin: an attempt to refine the basin stratigraphy. – *Geologica Carpathica*, 57(6): 483-494, Bratislava.
- Harzhauser, M., Piller, W.E. & Steininger, F.F. (2002): Circum-Mediterranean Oligo-Miocene biogeographic evolution - the gastropods' point of view. – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 183: 103-133, Amsterdam.
- Harzhauser, M., Daxner-Höck, G. & Piller, W.E. (2004): An integrated stratigraphy of the Pannonian (late Miocene) in the Vienna Basin. – *Austrian Journal of Earth Sciences*, 95/96: 6-19, Wien.
- Harzhauser, M. & Piller, W.E. (2004a): The Early Sarmatian - hidden seesaw changes. – *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, 246: 89-111, Frankfurt am Main.
- Harzhauser, M. & Piller, W.E. (2004b): Integrated stratigraphy of the Sarmatian (Upper Middle Miocene) in the western Central Paratethys. – *Stratigraphy*, 1(1): 65-86, New York.
- Harzhauser, M., Piller, W.E. & Steininger, F.F. (2002): Circum-Mediterranean Oligo-Miocene biogeographic evolution - the gastropods' point of view. – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 183: 103-133, Amsterdam.
- Harzhauser, M., Mandic, O. & Zuschin, M. (2003): Changes in Paratethyan marine molluscs at the Early/Middle Miocene transition: diversity, palaeogeography and palaeoclimate. – *Acta Geologica Polonica* 53(4): 323-339, Warszawa.
- Harzhauser, M., Gross, M. & Binder, H. (submitted): Biostratigraphy of Middle Miocene (Sarmatian) freshwater systems in an Eastern Alpine Intramontaneous Basin (Gratkorn Basin, Austria) revealed by terrestrial gastropods. – *Geologica Carpathica*, Bratislava.
- Hatle, E. (1885): *Die Minerale des Herzogthums Steiermark*. – 212 p., Verlag Leuschner & Lubensky, Graz.
- Head, M.J. & Westphal, H. (1999): Palynology and paleoenvironments of a Pliocene carbonate platform: the Clino Core, Bahamas. – *Journal of Paleontology*, 73: 1-25, Ithaca/New York.
- Heritsch, F. (1915): Beiträge zur geologischen Kenntnis der Steiermark. VI. Beobachtungen am Tuffkegel von Kapfenstein bei Fehring. – *Mitteilungen des Naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*, 51: 85-91, Graz.
- Heritsch, F. (1943): *Die Stratigraphie der geologischen Formationen der Ostalpen. Das Paläozoikum*. – 681 p., Borntraeger, Berlin.
- Haymo Heritsch (1963): Exkursion zum Basaltsteinbruch von Weitendorf. – *Mitteilungen des Naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*, 93: 199 – 205, Graz.
- Heritsch, H. (1963): Exkursion in das oststeirische Vulkangebiet. – *Mitteilungen des Naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*, 93: 206-227, Graz.
- Hiden, H. & Stingl, K. (1998): Neue Ergebnisse zur Stratigraphie und Paläogeographie der „Eibiswalder Schichten“ (Miozän, Weststeirisches Becken, Österreich): Die Otolithenfauna der Tongrube Gasselsdorf. – *Geologisch-Paläontologische Mitteilungen Innsbruck*, 23: 77-85, Innsbruck.
- Hilber, V. (1878): Die Miocän-Ablagerungen um das Schiefergebirge zwischen den Flüssen Kainach und Sulm in Steiermark. – *Jahrbuch der Geologischen Reichsanstalt*, 28(3): 505-580, Wien.
- Hilber, V. (1893): Das Tertiärgebiet um Graz, Köflach und Gleisdorf. – *Jahrbuch der kaiserl. königl. Geologischen Reichsanstalt*, 43(2): 281-365, Wien.
- Holzer, H.-L. (ed., 1994): *Exkursionsführer Steirisches Tertiärbecken*. – 80 p., Österreichische Geologische Gesellschaft, Wandertagung (Bad Gleichenberg) 1994, Karl-Franzens-Universität Graz, Graz.
- Hudackova, N., Holcova, K., Zlinska, A., Kovac, M. & Nagymarosy, A. (2000): Paleocology and eustasy: Miocene 3rd order cycles of relative sea-level changes in the Western Carpathian - North Pannonian basins. – *Slovak Geological Magazine*, 6(2-3): 95-100, Bratislava.
- Juhász, E., Kovacs, L.O., Müller, P., Toth-Makk, A., Phillips, L. & Lantos, M. (1997): Climatically driven sedimentary cycles in the Late Miocene sediments of the Pannonian Basin, Hungary. – *Tectonophysics*, 282: 257-276, Amsterdam.
- Kazmer, M. (1990): Birth, life and death of the Pannonian Lake. – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 79: 171-188, Amsterdam.
- Kollmann, K. (1960): Cytherideinae und Schulerideinae n. subfam. (Ostracoda) aus dem Neogen des östl. Oesterreich. – *Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien*, 51: 89-195, Wien.
- Kollmann, K. (1965): Jungtertiär im Steirischen Becken. – *Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien* 57(2): 479-632, Wien.
- Konecny, V., Kovac, M., Lexa, J. & Sefara, J. (2002): Neogene evolution of the Carpatho-Pannonian region: an interplay of subduction and back-arc diapiric uprise in the mantle. – *European Geosciences Union, Stephan Mueller Special Publication Series*, 1: 105-123, Katlenburg-Lindau.
- Konecny, V., Lexa, J., Konecny, P., Balogh, K., Elecko, M., Hurai, V., Huraiova, M., Pristas, J., Sabol, M. & Vass, D. (2004): *Guidebook to the Southern Slovakia Alkali Basalt Volcanic Field*. – 143 p., Statny geologicky ustav Dionyza Stura, Bratislava.
- Kosi, W., Sachsenhofer, R.F. & Schreilechner, M. (2003): High Resolution Sequence Stratigraphy of Upper Sarmatian and Pannonian Units in the Styrian Basin, Austria. – *Österreichische Akademie der Wissenschaften, Schriftenreihe der Erdwissenschaftlichen Kommissionen*, 16: 63-86, Wien.
- Kovac, M., Marton, E., Sefara, J., Konecny, V. & Lexa, J. (2000): Miocene development of the Carpathian chain and the Pannonian Basin: Movement trajectory of lithospheric fragments, subduction and diapiric uprise of asthenospheric mantle. – *Slovak Geological Magazine* 6(2-3): 77-84, Bratislava.

- Kovac, M., Barath, I., Harzhauser, M., Hlavaty, I. & Hudackova, N. (2004): Miocene depositional systems and sequence stratigraphy of the Vienna Basin. – *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, 246: 187-212, Frankfurt am Main.
- Kovar-Eder, J. & Krainer, B. (1990): Faziesentwicklung und Florenabfolge des Aufschlusses Wörth bei Kirchberg/Raab (Pannon, Steirisches Becken). – *Annalen des Naturhistorischen Museums Wien*, A, 91: 7-38, Wien.
- Kovar-Eder, J. & Krainer, B. (1991): Flora und Sedimentologie der Fundstelle Reith bei Unterstorcha, Bezirk Feldbach in der Steiermark (Kirchberger Schotter, Pannonium C, Miozän). – *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 134(4): 737-771, Wien.
- Krainer, B. (1987a): Das Tertiär der Weizer Bucht, Steirisches Becken. – 327 p., unpublished thesis, Karl-Franzens-Universität Graz, Graz.
- Krainer, B. (1987b): Fluviale Faziesentwicklung im Unterpannonien des steirischen Beckens (Zentrale Paratethys, Österreich). – *Facies* 17: 141-148, Erlangen.
- Kröll, A., Flügel, H.W., Seiberl, W., Weber, F., Walach, G. & Zych, D. (1988): Erläuterungen zu den Karten über den prätertiären Untergrund des Steirischen Beckens und der Südburgenländischen Schwelle. – 49 p., Geologische Bundesanstalt, Wien.
- Kümel, F. (1957): Der Süßwasseropal der Csatherberge im Burgenlande. Zur Geologie, Paläobotanik und Geochemie seltener Quellabsätze. – *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 100(1): 1-66, Wien.
- Kurat, G., Palme, H., Spettel, B., Baddenhausen, H., Hofmeister, H., Palme, C. & Wänke, H. (1980): Geochemistry of ultramafic xenoliths from Kapfenstein, Austria: Evidence for a variety of upper mantle processes. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44: 45-60, Washington.
- Lexa, J. & Konecny, V. (1998): Geodynamic aspects of the Neogene to Quaternary volcanism. – In: Rakus, M. (ed.): *Geodynamic development of the Western Carpathians*. – 219-240, Geological Survey of Slovak Republic, Bratislava.
- Lorenz, V. (1986): On the growth of maars and diatremes and its relevance to the formation of tuff rings. – *Bulletin of Volcanology*, 48: 265-274, Berlin/Heidelberg.
- Magyar, I., Geary, D.H. & Müller, P. (1999): Paleogeographic evolution of the Late Miocene Lake Pannon in Central Europe. – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 147: 151-167, Amsterdam.
- Martin, U. & Nemeth, K. (2004): Mio/Pliocene Phreatomagmatic Volcanism in the Western Pannonian Basin. – *Geologica Hungarica, Series Geologica*, 26: 1-193, Budapest.
- Mauritsch, H.J. (1975): Geophysikalische Untersuchungen an den Vulkaniten im Raum Weitendorf-Wundschuh, Steiermark – *Mitteilungen der Abteilung für Mineralogie am Landesmuseum Joanneum* – 42: 13 - 22.
- Messner, M. & Loitzenbauer, J. (2001): Geotrail Kapfenstein. Der Weg durch den Vulkan. – 84 p., Gemeinde Kapfenstein, Kapfenstein.
- Mogessie, A., Fritz, I., Ettinger, K., Proyer, A. (2005): Mantle xenoliths in Neogene volcanic rocks of the Styrian Basin. In: *Österreichische Mineralogische Gesellschaft. Mitteilungen*. 150, 265-279.
- Moser, E. (1986): Das kohleführende Miozän zwischen Graz und Weiz. – 302 p., unpublished thesis, Karl-Franzens-Universität, Graz.
- Mottl, M. (1970): Die jungtertiären Säugetierfaunen der Steiermark, Südost-Österreichs. – *Mitteilung des Museums für Bergbau, Geologie und Technik am Landesmuseum „Joanneum“ Graz*, 31: 3-92, Graz.
- Nebert, K. (1985): Kohlengeologische Erkundung des Neogens entlang des Ostrandes der Zentralalpen. – *Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt*, 6: 23-77, Wien.
- Nebert, K. (1989): Das Neogen zwischen Sulm und Laßnitz (Südweststeiermark). – *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 132(4): 727-743, Wien.
- Neubauer, F. & Genser, J. (1990): Architektur und Kinematik der östlichen Zentralalpen - eine Übersicht. – *Mitteilungen des Naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*, 120: 203-219, Graz.
- Neubauer, F., Ebner, F. & Wallbrecher, E. (1995): Geological Evolution of the Internal Alps, Carpatians and of the Pannonian Basin - An Introduction. – *Tectonophysics*, 242: 1-4, Amsterdam.
- Nievol, M.: Geophysikalische Untersuchung des pliozänen Vulkanmassivs von Königsberg-Klöch in der Südoststeiermark. – 131 p., unpublished thesis, University of Leoben, Leoben.
- Papp, A. (1951): Das Pannon des Wiener Beckens. – *Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien*, 39-41: 99-193, Wien.
- Papp, A. (1956): Fazies und Gliederung des Sarmats im Wiener Becken. – *Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien*, 47: 1-97, Wien.
- Peer, H. (1998): Die Tongrube St. Stefan. Geologisch-lagerstättenkundliche Untersuchung. – 21 p., unpublished report, Wietersdorfer & Peggauer Zementwerke, Peggau.
- Peresson, H. & Decker, K. (1996): From extension to compression: Late Miocene stress inversion in the Alpine-Carpathian-Pannonian transition area. – *Mitteilungen der Gesellschaft der Geologie- und Bergbaustudenten in Österreich*, 41: 75-86, Wien.
- Piller, W.E. & Harzhauser, M. (2005): The myth of the brackish Sarmatian Sea. – *Terra Nova*, 17(5): 450-455, Oxford.
- Piller, W.E., Egger, H., Erhart, C.W., Gross, M., Harzhauser, M., Hubmann, B., van Husen, D., Krenmayr, H.-G., Krystyn, L., Lein, R., Lukeneder, A., Mandl, G.W., Rögl, F., Roetzel, R., Rupp, C., Schnabel, W., Schönlaub, H.P., Summesberger, H., Wägrich, M. & Wessely, G. (2004): Die stratigraphische Tabelle von Österreich (sedimentäre Schichtfolgen). – 1 tab., Kommission für die paläontologische und stratigraphische Erforschung Österreichs der Österreichischen Akademie der Wissenschaften und Österreichische Stratigraphische Kommission, Wien.
- Pirrung, M., Fischer, C., Büchel, G., Gaupp, R., Lutz, H. & Neuffer, F.-O. (2003): Lithofacies succession of maar crater deposits in the Eifel area (Germany). – *Terra Nova*, 15: 125-132, Oxford.
- Pollak, W. (1962): Untersuchungen über Schichtfolge, Bau und tektonische Stellung des österreichischen Anteils der Eisenberggruppe im südlichen Burgenland. – 108 p., unpublished thesis, University of Vienna, Wien.

- Popov, S.V., Rögl, F., Rozanov, A.Y., Steininger, F.F., Shcherba, I.G. & Kovac, M. (eds., 2004): Lithological-Paleogeographic maps of Paratethys. – Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 250: 1-46, Frankfurt am Main.
- Pöschl, I. (1991): A Model for the Depositional Evolution of the Volcanoclastic Succession of a Pliocene Maar Volcano in the Styrian Basin (Austria). – *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 134(4): 809-843, Wien.
- Postl, W. (1999): 1194. Huntit, ged. Kupfer sowie Al-hältiger Jarosit aus dem Nephelin-Steinbruch in Klöch, Steiermark. – In: Niedermayr, G., Blass, G., Bojar, H.-P., Brandstätter, F., Dinterer, F., Hollerer, C.E., Moser, B., Postl, W. & Taucher, J. (1999): Neue Mineralfunde aus Österreich XLVIII. – *Carinthia II*, 189/109: 232-233, Klagenfurt.
- Postl, W. & Bojar, H.-P. (2003): 1345. Hydrocalumit und ein Vertreter der Strätlingit-Gruppe aus dem Nephelinbasanit-Steinbruch Klöch. – In: Niedermayr, G., Bojar, H.-P., Brandstätter, F., Ertl, A., Leikauf, B., Moser, B., Postl, W., Schuster, R. & Schuster, W. (2003): Neue Mineralfunde aus Österreich LII. – *Carinthia II*, 193/113: 212-213, Klagenfurt.
- Postl, W. & Bojar, H.-P. (2006): 1469. Mottramit und ein Zn-Silikat aus dem Steinbruch in Klöch, Steiermark. – In: Niedermayr, G., Bernhard, F., Bojar, H.-P., Brandstätter, F., Fink, H., Gröbner, J., Hammer, V.M.F., Knobloch, G., Kolitsch, U., Leikauf, B., Postl, W., Sabor, M. & Walter, F. (2006): Neue Mineralfunde aus Österreich LV. – *Carinthia II*, 196/116: 153, Klagenfurt.
- Ratschbacher, L., Frisch, W., Linzer, H.-G. & Merle, O. (1991): Lateral Extrusion in the Eastern Alps 1. Structural Analysis. – *Tectonics*, 10: 257-271, Washington.
- Rögl, F. (1998): Palaeogeographic Considerations for Mediterranean and Paratethys Seaways (Oligocene to Miocene). – *Annalen des Naturhistorischen Museums Wien*, A, 99: 279-310, Wien.
- Rögl, F. (1999): Mediterranean and Paratethys. Facts and hypotheses of an Oligocene to Miocene paleogeography (short overview). – *Geologica Carpathica*, 50(4): 339-349, Bratislava.
- Rögl, F. & Daxner-Höck, G. (1996): Late Miocene Paratethys Correlations. – In: Bernor, R.L., Fahlbusch, V. & Mittmann, H.-W. (eds.): *The Evolution of Western Eurasian Neogene Mammal Faunas*. – 47-55, Columbia University Press, New York.
- Rögl, F., Spezzaferri, S. & Coric, S. (2002): Micropaleontology and biostratigraphy of the Karpatian-Badenian transition (Early-Middle Miocene boundary) in Austria (Central Paratethys). – *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, 237: 47-67, Frankfurt am Main.
- Rolle, F. (1855): Über einige neue Vorkommen von Foraminiferen, Bryozoen und Ostracoden in den tertiären Ablagerungen Steiermarks. – *Jahrbuch der Geologischen Reichsanstalt*, 6: 351-354, Wien.
- Sacchi, M. & Horvath, F. (2002): Towards a new time scale for the Upper Miocene continental series of the Pannonian basin (Central Paratethys). – *European Geosciences Union, Stephan Mueller Special Publication Series*, 3: 79-94, Katlenburg-Lindau.
- Sachsenhofer, R.F. (1996): The Neogene Styrian Basin: An overview. – *Mitteilungen der Gesellschaft der Geologie- und Bergbaustudenten in Österreich*, 41: 19-32, Wien.
- Sachsenhofer, R.F., Lankreijer, A., Cloetingh, S. & Ebner, F. (1997): Subsidence analysis and quantitative basin modelling in the Styrian Basin (Pannonian Basin System, Austria). – *Tectonophysics*, 272: 175-196, Amsterdam.
- Sauerzopf, F. (1952): Beitrag zur Entwicklungsgeschichte des südburgenländischen Pannons. – *Burgenländische Heimatblätter*, 14(1): 1-16, Eisenstadt.
- Schell, F. (1994): Die Geologie der südlichen Windischen Büheln (Raum Arnfels-Leutschach-Langeegg). – 207 p., unpublished thesis, Karl-Franzens-Universität Graz, Graz.
- Schlamberger, J. (1987): Zur Geologie des Sausaler Paläozoikums in der SW Steiermark. – 140 p., unpublished thesis, Karl-Franzens-Universität Graz, Graz.
- Schnepp, E., Arneitz, P., Ganerød, M., Scholger, R., Fritz, I., Egli, R., & Leonhardt, R. (2021). Intermediate field directions recorded in Pliocene basalts in Styria (Austria): evidence for cryptochron C2r. 2r-1. *Earth, planets and space*, 73(1), 182.
- Schönlaub, H.P. (2000): Das Paläozoikum im Burgenland. – In: Schönlaub, H.P. (ed.): *Burgenland. Erläuterungen zur Geologischen Karte des Burgenlandes 1:200.000*. – 31-35, Geologische Bundesanstalt, Wien.
- Seghedi, I., Downes, H., Szakacs, A., Mason, P.R.D., Thirlwall, M.F., Rosu, E., Pecskey, Z., Marton, E. & Panaiotu, C. (2004): Neogene-Quaternary magmatism and geodynamics in the Carpathian-Pannonian region: a synthesis. – *Lithos*, 72: 117-146, Amsterdam.
- Seiberl, W. & Lobitzer, H. (1992): Aerogeophysikalische Vermessung im Bereich von Bad Gleichenberg. – 45 p., Projekt ÜLG-20/92-1, Geologische Bundesanstalt, Wien.
- Skala, W. (1967): Kurzbericht über die Untersuchung von Fließrichtungen in den Basisschottern des Obersarmats im Steirischen Becken. – *Mitteilungen des Naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*, 97: 28-31, Graz.
- Steininger, F. & Papp, A., 1978: 9. Faziesstratotypus: Gross Höflein NNW, Steinbruch "FENK", Burgenland, Österreich. – In: Papp, A., Cicha, I., Senes, J. & Steininger, F. (eds.): *M4 Badenien. Chronostratigraphie und Neostratotypen, Miozän der Zentralen Paratethys*, 6: 194-199, Verlag der Slowakischen Akademie der Wissenschaften, Bratislava.
- Steininger, F.F., Daxner-Höck, G., Haas, M., Kovar-Eder, J., Mauritsch, H., Meller, B. & Scholger, R.M. (1998): Stratigraphy of the "Basin Fill" in the Early Miocene Lignite Opencast Mine Oberdorf (N Voitsberg, Styria, Austria). – *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 140(4): 491-496, Wien.
- Stingl, K. (1994): Depositional environment and sedimentary facies of the basinal sediments in the Eibiswalder Bucht (Radl Formation and Lower Eibiswald Beds), Miocene Western Styrian Basin, Austria. – *Geologische Rundschau*, 83: 811-821, Stuttgart.
- Stingl, K. (1997): Das Steirische Becken. – In: Hubmann, B. & Stingl, K. (eds.): *Fossile Florenfundpunkte der Mittelsteiermark. Exkursionsführer. – Paläobotanische Forschung 100 Jahre nach Freiherr Constantin von Ettingshausen*. – 16-23, 30-33, Institut für Geologie und Paläontologie, Karl-Franzens-Universität Graz, Graz.
- Stiny, J. (1918): Die Lignite in der Umgebung von Felzbach in Steiermark. – *Bergbau und Hütte*, 10/11: 171-180, 193-196, Wien.

- Suttner, T. & Lukeneder, A. (2004):** Accumulations of Late Silurian serpulid tubes and their palaeoecological implications (Blumau-Formation; Burgenland; Austria). – *Annalen des Naturhistorischen Museums Wien*, A, 105: 175-187, Wien.
- Szabo, C., Harangi, S. & Csontos, L. (1992): Review of Neogene and Quaternary Volcanism of the Carpathian Pannonian Region. – *Tectonophysics*, 208(1-3): 243-256, Amsterdam.
- Taucher, J. & Hollerer, C.E. (2001): Die Mineralien des Bundeslandes Steiermark in Österreich. – 956 p. (Vol. 1), 1124 p. (Vol. 2), Verlag C.E. Hollerer, Graz.
- Taucher, J., Postl, W., Moser, B., Jakely, D. & Golob, P. (1989): Klösch. Ein südoststeirisches Basaltvorkommen und seine Minerale. – 160 p., Verlag Taucher & Jakely, Weiz.
- Vincenz, M. (1988): Prospektion auf expandierende Tone im Raum Fehring. – 156 p., unpublished report, Forschungsgesellschaft Joanneum, Leoben.
- Vincenz, M. (1990): Geologie des Abbaufeldes Burgfeld. – 13-40, unpublished report, Österreichische Leca GmbH., Fehring.
- Wieden, P. & Schmidt, W.J. (1956): Der Illit von Fehring. – *Tschermaks mineralogisch-petrologische Mitteilungen*, 5(4): 284-302, Wien.
- Winkler, A. (1913): Das Eruptivgebiet von Gleichenberg in Oststeiermark. – *Jahrbuch der Geologischen Reichsanstalt*, 63: 403-502, Wien.
- Winkler, A. (1927a): Erläuterungen zur Geologischen Spezialkarte der Republik Österreich. Blatt Gleichenberg. – 164 p., Geologische Bundesanstalt, Wien.
- Winkler, A. (1927b): Das Südweststeirische Tertiärbecken im älteren Miozän. – *Denkschriften der Akademie der Wissenschaften, Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse*, 101: 89-130, Wien.
- Winkler, A. (1927c): Über die sarmatischen und pontischen Ablagerungen im Südostteil des steirischen Beckens. – *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 77: 393-456, Wien.
- Winkler-Hermaden, A. (1939): Geologischer Führer durch das Tertiär- und Vulkanland des steirischen Beckens. – *Sammlung geologischer Führer*, 36: 1-209, Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- Winkler-Hermaden, A. (1951): Die jungtertiären Ablagerungen an der Ostabdachung der Zentralalpen und das inneralpine Tertiär. – In: Schaffer, F.X. (ed.): *Geologie von Österreich*. – 414-524, Deuticke Verlag, Wien.
- Winkler-Hermaden, A. (1957): *Geologisches Kräftespiel und Landformung*. – 822 p., Springer Verlag, Wien.
- Winkler-Hermaden, A.v. & Rittler, W. (1949): Erhebungen über artesische Wasserbohrungen im steirischen Becken, unter Berücksichtigung ihrer Bedeutung für die Tertiärgeologie. – *Geologie und Bauwesen*, 17(2-3): 33-96, Wien.
- Zetinig, H. (1993): Die Mineral- und Thermalquellen der Steiermark. – *Mitteilungen der Abteilung für Geologie und Paläontologie am Landesmuseum Joanneum*, 50/51: 1-362, Graz.
- Zötl, J. & Goldbrunner, J.E. (1993): *Die Mineral- und Heilwässer Österreichs. Geologische Grundlagen und Spurenelemente*. – 324 p., Springer Verlag, Wien/New York.

Author address:

Ingomar Fritz
 Universalmuseum Joanneum
 Geologie & Paläontologie
 Weinzöttlstrasse 16
 A-8045 Graz
ingomar.fritz@museum-joanneum.at

List of figures

Fig. 1: High geodiversity region of the northern Harrat Rahat with various young monogenetic volcanoes. Scoria extraction removed a large part of one of the largest scoria cones of the region (green star). Geology data is from the USGS – SGS 1 to 75k scale Geology map of Northern Harrat Rahat.	39
Fig. 2: Satellite imagery shows the impact of scoria extraction of one of the iconic large scoria cones near Al Madinah. The two images reflect 12-year difference. Below, the large cone shown from the ground (left bottom) and drone image (right bottom).	40
Fig. 3: Map of the Lausitz Volcanic Field including the study area: (a) – Dolní Falknov diatreme, (b) – Stožec diatreme. Modified from Büchner et al. (2015).	62
Fig. 4: Collapse breccia from the Stožec diatreme with crystalline rock pebbles in a red clay-silt-sand matrix. Drill core from 0.8 m depth with 10 cm diameter. Foto O. Tietz	62
Fig. 5: Model sketch for the origin of the pre-rift diatremes of Dolní Falknov and Stožec. (1) Redeposition of Permian sediments into the Saxo-Bohemian Cretaceous Basin ca. 80–70 Ma, including rounding of crystalline components near the coast (multi-stage sedimentary cycle). (2) 68 Ma diatremes incorporate the youngest Late Cretaceous sediments into red facies as collapse breccia. (3) After the erosion of the uppermost Late Cretaceous (erosion amount according to Tietz et al. 2018), these sediments are only preserved in the pre-rift diatreme structures.	63
Fig. 6: Riegersburg (view from the north).	67
Fig. 7: Geographic position of the Styrian Basin.	68
Fig. 8: Stratigraphic chart of the Neogene basin fill of the Styrian Basin (Gross et al. 2007).	72
Fig. 9: Simplified palaeogeographic map of the Styrian basin for the Karpatian and excision of “Styrian earth history in pictures”, Fritz Messner 2012.	73
Fig. 10: Simplified palaeogeographic map of the Styrian basin for the Badenian and excision of “Styrian earth history in pictures”, Fritz Messner 2012.	73
Fig. 11: Simplified palaeogeographic map of the Styrian basin for the Sarmatian and excision of “Styrian earth history in pictures”, Fritz Messner 2012.	73
Fig. 12: Simplified palaeogeographic map of the Styrian Basin for the Pannonian and excision of “Styrian earth history in pictures”, Fritz Messner 2012.	74
Fig. 13: Simplified palaeogeographic map of the Styrian Basin for the Pliocene and excision of “Styrian earth history in pictures”, Fritz Messner 2012.	74
Fig. 14: Geological sketch of the “Steirisches Vulkanland”.	74
Fig. 15: Volcanic remnants in the “Steirisches Vulkanland”.	76
Fig. 16: excursions stops.	77
Fig. 17: Laserscan with volcanic rocks in the region of Kapfenstein (GIS-Steiermark).	78
Fig. 18: Geotrail at Kapfenstein.	79
Fig. 19: The clay pit Mataschen in the municipality of Kapfenstein in summer 2020, photo I. Fritz	80
Fig. 20: “Swamp forest with beaver and turtle” – Mud flats in Kapfenstein 11.5 million years ago, oil on canvas, F. Messner 2003, UMJ Geology & Paleontology	80
Fig. 21: “Flooded swamp forest with sea bass and giant salamander” – Mud flats in Kapfenstein 11.5 million years ago, oil on canvas, F. Messner 2003, UMJ Geology & Paleontology	80
Fig. 22: Salvage and conservation of a giant tree, C. Kant.	81
Fig. 23: Laserscan with volcanic rocks and the Basalt quarries of Steinberg/Feldbach (GIS-Steiermark).	82
Fig. 24: N-S profile section through the Steinberg (Winkler-Hermaden, date unknown).	82
Fig. 25: Basalt quarry Steinberg	83
Fig. 26: The Riegerburg on a diatreme.	84
Fig. 27: Panorama view from Riegersburg to the south.	84
Fig. 28: Slip folds in the base sediments at the beginning of the maar lake stage in Riegersburg	85
Fig. 29: Maar-diatrem volcano Riegersburg: 4 stages of development: initial – growth – sedimentation – erosion (modified after Lorenz 1986).	85
Fig. 30: Laserscan with volcanic rocks in the area Altenmarkt - Riegersburg. (GIS-Steiermark).	86
Fig. 31: Eruption of the Riegersburg volcano (in front the maar lake Altenmarkt), 3,71 million years (F. Messner, 2024)	86
Fig. 32: Discordanz in layered ash-/lapilli tuff; house “Maberl”, Altenmarkt - Riegersburg.	87
Fig. 33: Layered ash-lapilli tuff with bomb sag structures; change of eruption style; house Maberl, Altenmarkt - Riegersburg.	88
Fig. 34: Basalt quarry Hochstraden, view to the north (Fritz, I. 2025).	89
Fig. 35: Eruption of the Stradnerkogel volcano, 1,7 million years (F. Messner, 2024).	89
Fig. 36: Base of the lava flow at the Stradner Kogel.	90
Fig. 37: Laserscan with volcanic rocks from the “Königsberg-Klöch volcanic field” (GIS-Steiermark).	91
Fig. 38: Basalt quarry Klöch (white lines: layered scoria; orange lines: basalt / scoria borderline (vents, dikes) ...	92
Fig. 39: Eruption of the “Königsberg-Klöch volcanic field”, 2,51 million years (F. Messner, 2024)	93
Fig. 40: Laserscan with volcanic rocks in the southern part of the “Steirisches Vulkanland” (GIS-Steiermark).	93

Fig. 41: Laserscan with volcanic rocks and the Basalt quarries of Steinberg/Feldbach (GIS-Steiermark).....	95
Fig. 42: "in order" - stages of development.....	96
Fig. 43: Laserscan with volcanic rocks in the volcanic field of Kapfenstein and Fehring (GIS-Steiermark).	97
Fig. 44: Eruption of the Kapfenstein volcano (in front the maar lake Burgfeld), 4,86 million years (F. Messner, 2024)	98
Fig. 45: Outcrop A1 ("Quarry chapel"). a) Overview. b) Ripple marks. c) Sedimentary block, embedded in ash/lapilli tuff. d) Channel.	99
Fig. 46: Overview from geophysical measurements in the area of Burgfeld (Gross et al. 2007)	99
Fig. 47: Museum Geo-Info Kapfenstein.	101
Fig. 48: View to the Stradner Kogel (with the former valley level marked) from St. Anna am Aigen.....	102
Fig. 49: Basalt quarry Weitendorf, view to the east (Fritz, I. 2025)	103

