

**PETROLOGISCH-GEOCHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG
QUARTÄRER LAVEN DER EIFEL ALS GRUNDLAGE ZUR
ARCHÄOMETRISCHEN HERKUNFTSBESTIMMUNG
RÖMISCHER MÜHLSTEINE**

Dissertation
zur Erlangung des Grades
„Doktor der Naturwissenschaften“
im Promotionsfach Mineralogie

am Fachbereich Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Tatjana Mirjam Gluhak

geb. in Mainz

Mainz, 2010

Dekan: [REDACTED]

1. Berichterstatter: [REDACTED]

2. Berichterstatter: [REDACTED]

3. Berichterstatter: [REDACTED]

Tag der mündlichen Prüfung: 12.03.2010

ERKLÄRUNG

Ich versichere hiermit, die Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel verfasst zu haben.

Ich habe oder hatte die hier als Dissertation vorgelegte Arbeit nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht.

Ich hatte weder die jetzt als Dissertation vorgelegte Arbeit noch Teile davon bei einer anderen Fakultät bzw. einem anderen Fachbereich als Dissertation eingereicht.

Mainz, Dezember 2009

Zusammenfassung

1. Einleitung

- 1.1 Aufgaben der Archäometrie
- 1.2 Ziel der Provenienzanalyse

2. Stand der Forschung

- 2.1 Historischer Hintergrund
- 2.2 Der archäologische Kenntnisstand
 - 2.2.1 Lava als Rohstoff für Mühlsteine
 - 2.2.2 Abbaustellen in der Eifel
 - 2.2.3 Handel und Produkte
- 2.3 Archäometrische Untersuchungen
- 2.4 Geologischer Hintergrund
 - 2.4.1 West- und Zentraleuropäischer Vulkanismus
 - 2.4.2 Regionalgeologie der Vulkaneifel
 - 2.4.3 Die quartären Vulkanfelder der Eifel
 - 2.4.3.1 Westeifeler Vulkanfeld
 - 2.4.3.1 Osteifeler Vulkanfeld

3. Provenienzanalyse

- 3.1 Vorgehensweise
- 3.2 Probennahme
 - 3.2.1 Steinbrüche
 - 3.2.2 Mühlsteine
- 3.3 Analytische Methoden
- 3.4 Analyse der Mühlsteinbrüche: Ergebnisse und Charakterisierung
 - 3.4.1 Petrographie und Phasenbestand
 - 3.4.2 Gesamtgesteinschemie
 - 3.4.3 Multivariate Methoden
 - 3.4.3.1 Datenvorbereitung: Transformation und Test auf Normalverteilung
 - 3.4.3.2 Clusteranalyse
 - 3.4.3.3 Diskriminanzanalyse
 - 3.4.4 Sr-, Nd-, Pb-Isotopie
- 3.5 Analyse der Mühlsteine: Ergebnisse und Provenienz
 - 3.5.1 Zuordnung der Fundstücke
 - 3.5.1.1 Gesamtgesteinschemie
 - 3.5.1.2 Clusteranalyse
 - 3.5.1.3 Diskriminanzanalyse
 - 3.5.2 Vergleich mit anderen römischen Abbaugebieten
- 3.6 Verbreitung der Eifeler Lavamühlen zur Römerzeit

4. Diskussion

5. Schlussfolgerung und Ausblick

6. Exkurs zur Petrologie der quartären Vulkanite der Ost- und Westeifel

6.1 Fraktionierte Kristallisation

6.2 Magmenbildung

6.3 Sr-, Nd-, Pb-Isotopie

Literatur

Anhang A: Abbildungen der römischen Steinbrüche der Ost- und Westeifel

Anhang B: Dünnschliff-Fotos der Steinbruchproben

Anhang C: Herkunft, Datierung und Probenbezeichnung der Mühlsteine

Tabellenanhang

Abbildungsverzeichnis

Zusammenfassung

Lava aus der quartären Vulkanregion der Eifel wurde in römischer Zeit großmaßstäblich abgebaut, um daraus Mühlsteine hoher Qualität herzustellen, die in großen Mengen in weite Teile des Römischen Reiches exportiert wurden. Somit erweisen sich diese Mühlsteine als ideale Indikatoren für Handelsgebiete und –wege dieser Zeit. Für eine erfolgreiche Herkunftsanalyse von Fundstücken ist eine genaue Charakterisierung der infrage kommenden Rohstoffe die unbedingte Voraussetzung. Aus diesem Grund konzentriert sich diese Arbeit auf die geochemische Definition der 16 bekannten römischen „Basalt“-Abbaustellen in den Vulkanfeldern der Ost- und Westeifel, mit dem vorrangigen Ziel, eine möglichst eindeutige Charakterisierung der einzelnen Abbaustellen zu erreichen. Auf dieser Basis wird eine Vorgehensweise zur folgenden Provenienzanalyse der Mühlsteine entwickelt.

Um die geochemische Variabilität der Laven zu erfassen wurden die Abbaustellen großflächig beprobt. Die Proben wurden zunächst petrographisch bestimmt und der Phasenbestand mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) untersucht. Die Haupt- und Spurenelement-Zusammensetzung wurde anhand von Röntgenfluoreszenzanalysen und Laser-Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (LA-ICP-MS) ermittelt, die Sr-Nd-Pb-Isotopie ausgewählter Proben mittels Thermo-Ionen-Massenspektrometrie (TIMS). Es zeigte sich, dass auf Grundlage der Haupt- und Spurenelementzusammensetzung, gemessen mit RFA, eine Abgrenzung der Abbaustellen zueinander mittels einer Kombination aus geochemischer Diskriminierung mit Cluster- und Diskriminanzanalysen gelingt. Die anschließende Provenienzanalyse der Mühlsteinfundstücke erfolgt analog zur Charakterisierung der Abbaustellen. Im ersten Schritt wird eine geochemische Zuordnung des Fundstücks vorgenommen, um zu überprüfen, ob eine Eifeler Herkunft überhaupt in Frage kommt. Lässt der geochemische Vergleich mit den Referenzdaten aus dem Gelände eine Eifeler Herkunft zu, kommt im zweiten Schritt die Clusteranalyse zum Einsatz. Hier wird auf multivariater Ebene geprüft, ob das Fundstück einer Eifeler Abbaustelle oder einem Cluster von Eifeler Abbaustellen zugeordnet werden kann. Bei einer positiven Zuordnung wird ergänzend als dritter Schritt die Diskriminanzanalyse angewendet, anhand der das Mühlstein-Fundstück einer Abbaustelle mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zugewiesen wird.

Bei 68 analysierten Mühlsteinen aus verschiedenen Regionen Mitteleuropas konnte so für 49 Fundstücke eine Eifeler Provenienz festgestellt werden. Alle römischen Eifeler Mühlsteine entstammen dem Bellerberg bei Mayen, ein mittelalterliches Stück aus dem Niedermendiger Lavastrom. Die Zuordnung der übrigen 19 Mühlsteine zu anderen möglichen Abbaugebieten erfolgt anhand geochemischer Daten aus der Literatur. Aufgrund der unzureichenden Datenlage sind im Falle dieser Proben jedoch im Gegensatz zur Lavastrom-genauen Zuordnung der Eifeler Mühlen lediglich Vermutungen über die Herkunftsregionen möglich. Damit zeigt sich, dass eine ausführliche Referenzdatenbank der in Frage kommenden Rohstoffe die erforderliche Basis für erfolgreiche Provenienzanalysen ist. Die Möglichkeit der genauen Zuordnungen von Mühlsteinen zu den Eifeler Abbaustellen belegt, dass die Verbindung von geochemischer Auswertung mit Cluster- und Diskriminanzanalysen ein hilfreiches Verfahren zur Provenienzanalyse darstellt.

Abstract

Lava from the quaternary volcanic Eifel region was quarried in large scale in Roman times to produce high-quality millstones, which were exported in huge quantities to many parts of the Roman Empire. So millstones are useful tracers for trade patterns in these times. An exact characterization of the raw material is the most important requirement for successful provenance analyses of artefacts, so this study concentrates on the geochemical definition of the 16 well-known Roman "basaltic" lava quarries in the volcanic fields of East- and West-Eifel, with the main focus lying on a characterization of the individual quarries as exact as possible. Based on that, a procedure to do the following provenance analyses of the millstones is developed.

To record the geochemical variability of the lavas the quarries were extensively sampled. The samples were determined petrographically and analyzed for their mineral content by X-ray diffractometry (XRD). Major- and trace-elements were measured by X-ray fluorescence (XRF) and laser-inductively-coupled-plasma mass-spectrometry (LA-ICP-MS), Sr-Nd-Pb-isotope compositions of selected samples by thermal ion mass spectrometry (TIMS). On the basis of their major- and trace-element composition measured by XRF a differentiation of each quarry is achieved

by using a combination of geochemical discrimination and cluster and discriminant analysis. The following provenance analyses of the millstone-finds are done equally to the quarry characterization. First the millstone is allocated geochemically, to check if an Eifel provenance can be considered. If an Eifel provenance is possible according to the comparison with the reference data from the field, in the second step cluster analysis is applied. By cluster analysis it is tested multivariately if the millstone can be affiliated to a certain Eifel-quarry or cluster of Eifel-quarries. In case of a positive affiliation discriminant analysis is additionally employed in a third step. By discriminant analysis the millstone can be assigned to its quarry of origin with a certain confidence.

An Eifel provenance was determined for 49 of 68 analyzed millstones from different regions in Middle Europe. All Roman millstones were produced from the lava of the Bellerberg-volcano next to Mayen, one medieval find from the Niedermendig-Lava. The affiliation of the other 19 millstones to other possible regions, where millstones of comparable lava were extracted, was done by using geochemical data from literature. However, because of the insufficient data only assumptions about the regional provenance can be made, in contrast to the precise affiliation of the Eifel millstones to the lava flow they are extracted from. This shows that a detailed reference database of the raw material to be considered is the essential basis for successful provenance-analyses. The possibility of exact affiliations of millstones to their Eifel-quarries of origin shows that the combination of geochemical evaluation with Cluster- and discriminant analyses is a powerful tool for provenance analyses.

1. Einleitung

Über die Vulkaneifel schrieb J. Jacobs im Jahre 1914:

„Alle vulkanischen Erzeugnisse verwertet nunmehr der Mensch. Die gewaltigen Kräfte des Erdinneren haben der Gegend nicht nur Reize verliehen, sondern mit verschwenderischer Hand auch Reichtümer ausgestreut. So hat sich an den erloschenen Feuerbergen und ihren Aufschüttungen Industrie entwickelt. Sie ist in ihrer Gesamtheit so eigener Art, dass kein anderer Erdenfleck eine ähnliche aufweisen kann.“ (Jacobs 1914).

Der neogene Vulkanismus stellt mit seinen geförderten vulkanischen Produkten seit vielen Jahrhunderten die wirtschaftliche Grundlage der Eifel dar. Die gesamte Landschaft der Vulkaneifel ist intensiv geprägt von Abbau und Verarbeitung von Lava, Tuff und Tephra. Mit dem Forschungsschwerpunkt „Entstehung einer Industrielandschaft - das antike Steinbruch- und Bergwerksrevier zwischen Eifel und Rhein“ setzt sich die Mayener Außenstelle „Vulkanologie, Archäologie und Technikgeschichte“ des Römisch-Germanischen Zentralmuseums Mainz mit der Industrie- und Wirtschaftsgeschichte dieser Region auseinander. Dabei steht die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Archäologen und Geowissenschaftlern im Vordergrund, mit der Absicht, die Ausmaße von Gewinnung und Handel mit mineralischen Rohstoffen und Gütern in der Antike zu untersuchen und festzustellen. Auf dieser Basis können die komplexen Vorgänge bewertet werden, die zur Herausbildung der heutigen Eifeler Industrielandschaft geführt haben, deren Wurzeln bereits in der Jungsteinzeit liegen.

Die Ausdehnung des Handels mit Eifeler Rohstoffen in römischer Zeit lässt sich anhand der Verbreitung von „basaltischen“ Mühlsteinen besonders gut beleuchten, da diese bereits in der Antike zu den bedeutendsten Produkten der Eifeler Steinindustrie gehörten und in großem Maßstab vertrieben wurden. Ziel seitens der Archäologie ist die präzise Herkunftsbestimmung ausgewählter „basaltischer“ Mühlstein-Fundstücke, um einerseits den Exportraum abzustecken und andererseits die Nutzungsgeschichte der Eifeler Lavavorkommen zu rekonstruieren. Hier kommt die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit Geowissenschaftlern zum Tragen, denn eine zweifelsfreie

Herkunftsbestimmung ist nur auf mineralogischer Basis möglich. Damit liegt der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit darin, die in Frage kommenden Lavavorkommen und analog dazu die Mühlstein-Fundstücke mittels mineralogischer Methoden eindeutig zu charakterisieren und unter Anwendung multivariater Methoden eine Zuordnung der Fundstücke zu ihren Abbaustellen und damit die Bestimmung ihrer Provenienz vorzunehmen. Ziel ist dabei die Entwicklung einer Methodik zur Charakterisierung der Lavavorkommen und zur Herkunftsbestimmung basaltischen Materials aus menschlicher Nutzung.

1.1 Aufgaben der Archäometrie

Die wissenschaftliche Untersuchung von Gebrauchs- und Kulturgütern, deren Rohstoffe und Herstellungstechniken aus prähistorischer und historischer Zeit erfordert eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit von Archäologie, Kunstgeschichte und Denkmalpflege auf der einen und naturwissenschaftlichen Disziplinen wie Geo- und Biowissenschaften, Chemie und Physik auf der anderen Seite. Die Archäometrie stellt die Schnittstelle dieser Forschungsfelder dar und kann definiert werden als „*Entwicklung und Anwendung naturwissenschaftlicher Verfahren zur Lösung archäologischer Fragestellungen...*“ mit dem Zweck, „...*kulturgeschichtliche Ziele auf naturwissenschaftlichem Wege*“ (Wagner 2007) zu erreichen. Bei den Forschungsobjekten handelt es sich meist um Geomaterialien wie Gestein, Keramik, Mörtel, Pigmente, Glas, Metalle oder Schlacken und damit verbundene Verfahren zur Herstellung des Artefakts. Daher haben Analysemethoden aus der Mineralogie und Geochemie einen großen Anteil an den Verfahren in der Archäometrie. Die naturwissenschaftliche Analyse von Artefakten und den entsprechenden Rohstoffen soll zur Klärung folgender Fragen beitragen:

- Welcher Werkstoff wurde benutzt, bzw. wie ist er zusammengesetzt?
- Wo liegt die Rohstoffquelle?
- Wo wurde das Stück hergestellt?
- Wie war die Herstellungstechnik?
- Wann wurde es hergestellt?
- Wie kam das Stück dorthin, wo es gefunden wurde?

Bei der Auswertung der Analysedaten ist die Zusammenarbeit von Naturwissenschaftlern mit Archäologen unerlässlich, da nur aus dem archäologisch erforschten sozial-kulturellen Kontext, in dem das Objekt hergestellt, benutzt und weitergegeben wurde, deutlich wird, welche Funktion ein Artefakt besaß, wie und warum eine bestimmte Technik eingeführt wurde, wie die Weitergabe strukturiert war usw. (Magetti 2006).

1.2 Ziel der Provenienzanalyse römischer Mühlsteine

Der Provenienz- oder Herkunftsanalyse liegt die Absicht zugrunde, die in Handwerk, Architektur oder Kunst verwendeten natürlichen Rohstoffe ihren primären Lagerstätten oder Liefergebieten zuzuordnen. Das Wissen um die Herkunft von Rohstoffen kann Antworten auf vielfältige Fragen der Archäologie geben: Beispielsweise werden wirtschaftliche und politische Beziehungen ableitbar, Fälschungen oder Kopien können nachgewiesen werden, im Falle von Bauwerken lassen sich zeitliche, räumliche und technologische Entwicklungen erkennen (Germann & Cramer 2005).

Ein wichtiges Forschungsfeld der Archäologie ist die Identifikation von Produktionsorten für Wirtschaftsgüter verbunden mit der Rekonstruktion von Handelswegen und Exporträumen. Die archäometrische Provenienzanalyse von Mühlsteinen zeigt sich dazu besonders geeignet: Getreide nahm mit dem Wechsel zur produzierenden Wirtschaftsweise vor mehr als 7000 Jahren eine zentrale Stellung in der Versorgung der Menschen ein. Anbau und Verarbeitung bestimmten fortan den Alltag, und gute Reib- und Mahlsteine waren als unverzichtbares Arbeitsgerät in jeder Haus- bzw. Hofgemeinschaft vorhanden. Mühlsteine waren als alltägliche Gebrauchsgegenstände weit verbreitet und bilden heute eine umfangreiche Fundgattung.

Für die römische Epoche sind Untersuchungen zur Provenienz von Mühlsteinen von großer Relevanz, da zu dieser Zeit ein umfangreicher Abbau und massenhafter Export von Mühlsteinen aus verschiedenen Provinzen des Römischen Reiches stattfand. Die hochwertigsten Mühlsteine, die über weite Distanzen verhandelt wurden, wurden aus sorgfältig ausgesuchten vesikulären Laven hergestellt. Eine Zusammenstellung der vulkanischen Ausgangsgesteine zur Mühlsteinherstellung im Römischen Reich findet sich bei Peacock (1980), der zugleich die Bedeutung des römischen Mühlsteinhandels hervorhebt, denn die Identifikation der Ausgangsgesteine von

1. Einleitung

1.2 Ziel der Provenienzanalyse römischer Mülhlsteine

Mülhlsteinfundstücken liefert wichtige Informationen über Handelsstrukturen im römischen Europa. Eines der wichtigsten Abbaureviere war die Eifel, denn die vesikuläre Eifeler Basaltlava besitzt zur Verarbeitung von Getreide hervorragende Qualitäten. Ziel dieser Provenienzanalyse ist die Ermittlung der Exporträume der Eifeler Mülhlsteine mittels mineralogischer Untersuchungen der im Nordwesten Europas weit verbreiteten Fundstücke. Damit kann die Studie einen wichtigen Beitrag zur antiken Wirtschaftsgeschichte leisten.

2. Stand der Forschung

2.1. Historischer Hintergrund

Mit dem Ende des Gallischen Krieges 50/51 v. Chr. war Gallien bis zum Rhein der römischen Herrschaft unterstellt. Die Bürgerkriege nach der Ermordung Cäsars verzögerten die Organisation der gallischen Provinzen, und erst unter der Herrschaft des Augustus erfolgte eine grundlegende Neuordnung der Provinzen Galliens und damit auch der Rheinzone. Der Rhein galt als Grenzlinie zwischen römischem Reich und Germanien, die aber bis ins 2. Jahrzehnt v. Chr. ohne Schutz durch Truppenlager war. Es kam immer wieder zu Übergriffen germanischer Truppen von rechts des Rheins. Nach einer besonders schwerwiegenden Niederlage in Nordgallien gegen verbündete germanische Stämme im Jahre 16 v. Chr. reiste Augustus nach Gallien, um zwischen 16 und 13 v. Chr. die dortige Zivil- und Militärverwaltung neu zu organisieren. Im Zuge der Umstrukturierung der politischen und ökonomischen Verhältnisse unter Augustus war der Bau von Fernstraßen besonders wichtig, zum einen zur Erschließung bereits erobelter Gebiete, zum anderen zur Sicherung der Ostgrenze Galliens. Ausgangspunkt dieses Straßennetzes war *Lugdunum/Lyon*. Ein Straßenzug führte in Richtung Atlantik, einer in Richtung Norden. Letzterer teilte sich ab Langres auf, zum einen nach Nordwesten zur Kanalküste und zum anderen in die sog. „Agrippastraße“ über Metz, Trier, Bitburg, Zülpich und Köln an den Rhein. Erst ab 13 v. Chr. rückten die Legionen und ihre Hilfstruppen in mehrjährig bezogene Standlager an den Rhein vor: *Noviomagus/Nijmegen*, *Vetera/Xanten* und *Mogontiacum/Mainz* sind die ersten größeren Legionslager an Mittel- und Niederrhein, mit denen die römische Geschichte des Rheinlands ihren Anfang nimmt. Nach der Niederlage in der Varusschlacht 9 n. Chr. und dem Verlust dreier Legionen wurden entlang des Rheines acht Legionen stationiert. Die Rheinarmee wurde in ein oberes und unteres Heer aufgeteilt. Das Rheinland hatte damit bis zur Gründung der Provinzen den Status eines unter Militärverwaltung stehenden Grenzlandes inne mit zwei Militärspengeln (*exercitus germanicus superior* und *inferior*) und *Mogontiacum* als römische Hauptgarnison. Die unter Vespasian und Domitian rechtsrheinischen neu eroberten Gebiete wurden mit dem obergermanischen Limes gesichert, in Niedergermanien blieb der Rhein Grenze. Um 85 n. Chr. erst wurden die beiden

Militärbezirke durch Domitian in die ordentlichen Provinzen *Germania superior* mit dem Statthaltersitz in *Mogontiacum* und *Germania inferior* mit *Colonia Claudia Ara Agrippinensium*/Köln als Hauptstadt umgewandelt, westlich grenzte die Provinz *Belgica* mit der Hauptstadt *Durocortorum*/Reims an. Das Gebiet der Osteifel gehörte zur Provinz *Germania superior*, das Gebiet der Westeifel bereits zur Provinz *Belgica* (Kunow 1987; Bernhard 1990).

2.2 Der archäologische Kenntnisstand

2.2.1 Lava als Rohstoff für Mühlsteine

Eine große Vielfalt an Gesteinen wurde in Europa zur Herstellung von Mühlsteinen genutzt: Sandsteine, Arkosen, Konglomerate, Kalksteine oder Granite. Mühlen aus diesen Gesteinen deckten jedoch immer nur den lokalen Bedarf. Die großen Produktionszentren für Mühlsteine, von denen aus weit überregional exportiert wurde, entwickelten sich ausschließlich in vulkanischen Regionen. Zur Herstellung der qualitätsvollen Mühlen wurden sorgfältig Laven ausgewählt, die im Vergleich zu anderen Gesteinen hervorragende Eigenschaften als Mühlsteinrohstoff besitzen. Diese Laven verfügen über mehrere Vorteile: Aufgrund der raschen Abkühlung an der Erdoberfläche sind sie extrem feinkörnig, d.h. beim Mahlvorgang werden keine größeren Kristallkörner oder Gesteinsstücke, die das Mehl verunreinigten und Zähne schädigen, herausgebrochen. Die Laven sind hart, der Abrieb bleibt somit im Vergleich zu einem Sandstein oder Granit geringer, damit ist die Mühle lange nutzbar. Aufgrund ihres Gasgehaltes sind die Laven vesikulär, die Mühle besitzt also trotz des Verschleißes selbstschärfende Eigenschaften durch die ständige Öffnung neuer Blasenräume. Zudem bietet die Größe der Blasen im Gestein gute Griffigkeit für das Getreidekorn, das so beim Mahlen effektiv zerrissen wird. Die vesikuläre Struktur verringert zudem die Dichte des Gesteins, was Handhabung und Transport der Mühlen erleichtert (Mangartz 2001; 2008). Wichtig für die Abbaustelle war, dass der Lavastrom in ausreichender Mächtigkeit und Ausdehnung vorlag, um großmaßstäblichen Abbau zu ermöglichen. Auch das typische Abkühlungsverhalten der Lava war ausschlaggebend dafür, ob ein Strom als Abbaustelle nutzbar war: Eine säulenartige Zerklüftung durch Kontraktion der Lava beim Abkühlen ist eine charakteristische Eigenschaft insbesondere von basaltischen Gesteinen. Ein konduktiver

Wärmetransfer aus dem Innern des Lavastroms ist gekoppelt mit konvektivem Wärmetransport entlang der entstehenden Klüfte und verursacht die Entwicklung von prismatischen Säulen (Abb. 1a und b).

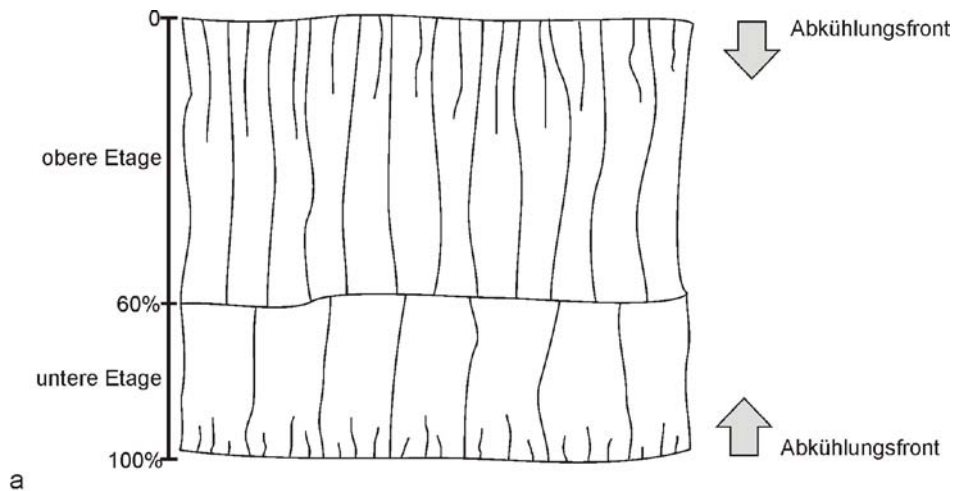


Abb. 1

a: Etagen der Säulen eines Lavastroms (verändert nach Grossenbacher & Mc Duffie 1995).

b: Säulenbildung des Ettringer Lavastroms im Steinbruch *Ettringer Lay*.

Ein so abgekühlter Lavastrom besteht meist aus zwei oder mehreren Etagen, die sich in der Ausbildung der Säulen voneinander unterscheiden. Häufig ist eine obere und untere Etage ausgebildet, in denen sich die prismatischen Säulen rechtwinklig zur Strom-Oberfläche und Strom-Basis als Abkühlungsfronten ausgebildet haben. Die Klüfte migrieren von unten bzw. von oben in Richtung des Inneren des Lavastroms und treffen entlang einer quasi-ebenen Berührungsfläche aufeinander. Große, breite Säulen kennzeichnen langsame, schmale Säulen schnelle Abkühlung. Die rein konduktive Abkühlung über das Nebengestein an der Basis des Lavastroms verläuft langsamer als die Abkühlung der Oberseite des Stroms, und so treffen sich

die schmalen Säulen von oben und die dicken Säulen von unten oft bei ungefähr 60% der Entfernung von Top zu Basis des Lavastroms (Grossenbacher & Mc Duffie 1995). Die Säulen können drei bis acht Seitenflächen besitzen, sind aber meist hexagonal und pentagonal, wobei der Säulendurchmesser proportional zu Kluftweite und Breite der Seitenflächen ist. Gewöhnlich reichen die Durchmesser der Säulen von 0,2 bis 4 m, die Länge kann mehrere Zehner Meter betragen. Die Seitenflächen der Säulen zeigen gewöhnlich querverlaufende Bänder, „Striae“ genannt, die die jeweils einzelnen Schritte des zum Innern einer abkühlenden Lavadecke propagierenden Kluftwachstums anzeigen (Abb. 2). Vermutlich bilden sich die Klüfte knapp unter

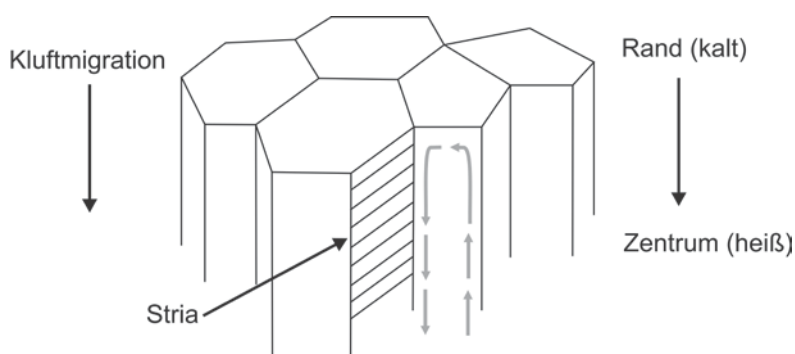


Abb. 2: Basaltsäulen mit Striae.

der Subsolidus-Temperatur von ca. 900°C in Basalt (Grossenbacher & McDuffie 1995; Budkewitsch & Robin 1994). Damit ausreichend große Blöcke für Mühlsteine aus der Lava gewonnen werden konnten, durfte der Lavastrom jedoch nicht zu sehr von Klüften durchzogen sein (Peacock 1980). Bevorzugt wurden demnach die Laven, die in ausreichend mächtigen vertikalen polygonalen Säulen abgekühlt sind, was den Abbau vereinfachte und bereits die Grundform des zukünftigen Mühlsteins vorgab (Mangartz 2008). Da unter den zahlreichen vulkanischen Regionen in Europa nur einige wenige Laven hervorbrachten, die diese Kriterien erfüllen, entwickelten sich nur bestimmte Regionen zu bedeutsamen Mühlstein-Produktionszentren. Peacock (1980) nennt fünf Hauptzentren: Orvieto (Leucytophyr), Sardinien (rotbraune persilizische Lava aus Murlargia und Basalte), Sizilien (Ätna-Basalte), Volvic (Trachyandesit) und schließlich die Eifeler Mayen-Lava, worunter er die Laven aus Mayen und Niedermendig zusammenfasst.

2.2.2 Abbaustellen in der Eifel

Bereits für das Neolithikum ist an vielen Lavaströmen der Ost- und Westeifel Gewinnung von Reibsteinen belegt. Steinbrüche wurde nicht angelegt: Die Menschen nutzten bis in die Bronzezeit die an den Hängen liegenden natürlichen Blockfelder am Rande der Lavaströme. Abbautätigkeiten in Form von Steinbrüchen im engeren Sinne, in denen in den Lavaström selbst vorgedrungen wurde, sind zumindest für den Mayener Lavaström erst seit der Urnenfelderzeit in Form flacher Gewinnungsstellen belegt.

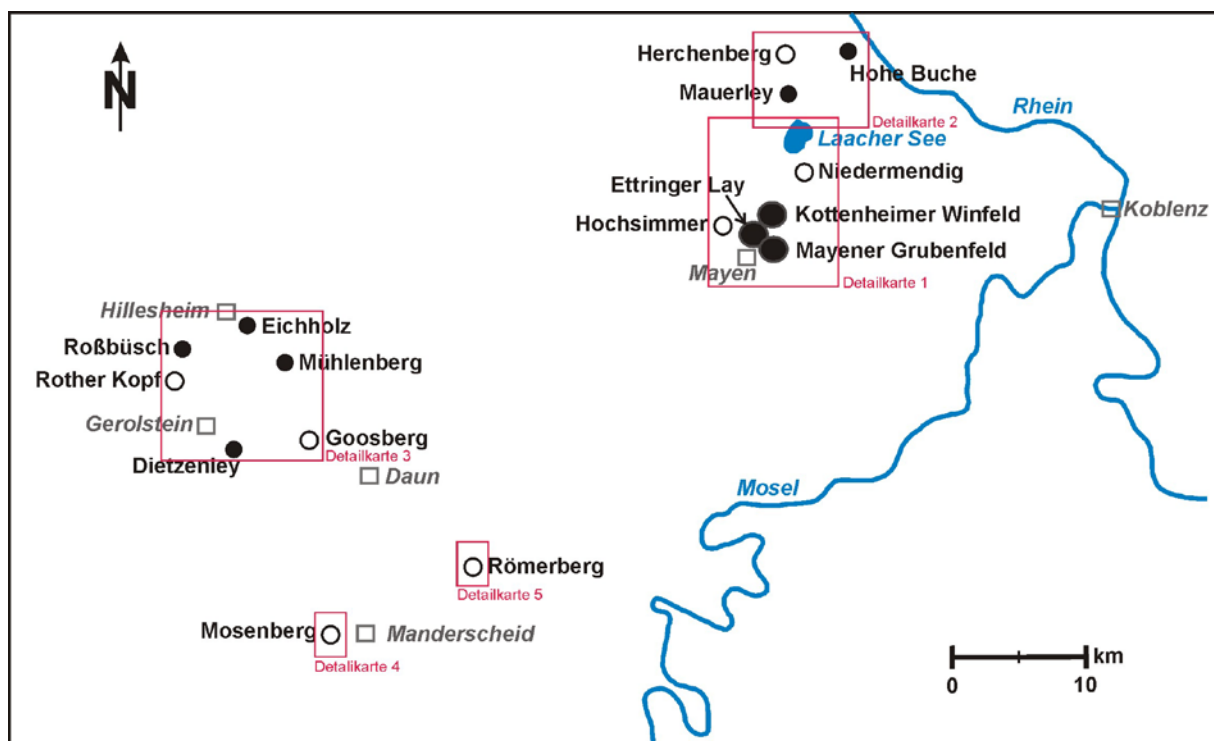


Abb. 3: Übersichtskarte der römischen Abbaustellen der Eifel gemäß Hörter (1994). Große Punkte: größte Abbaustellen. Kleine geschlossene Punkte: sicher römische Abbaustellen. Offene Punkte: fragliche römische Abbaustellen (nach Mangartz 2008).

Römische Abbaustellen sind an einigen Lavavorkommen in West- und Osteifel nachgewiesen bzw. vermutet (Abb. 3). Die Steinbrüche sind oft überprägt von jüngerem oder modernem Abbau, können aber im Gelände anhand von weiten Arealen mit Abraum, in dem sich liegengelassene Mühlsteinrohlinge römischen Formats finden, und typischen Abbauspuren identifiziert werden. Die zylindrischen Handmühlenrohlinge besitzen meist einen Durchmesser zwischen 38 und 42 cm und eine Höhe von 8 bis 12 cm und sind damit etwas größer, aber flacher als ihre Vorgänger aus keltischer

Zeit (Hörter 1994). Verlässlichere Merkmale zur Identifikation römischer Steinbrüche als das Format der liegengelassenen Handmühlenrohlinge sind jedoch die Spuren der Abbautechniken: Spätestens ab dem 2. Jh. n.Chr. hatte sich die sog. Keilspaltung durchgesetzt. Dazu wurde mit einer Zweispietz entlang der abzutrennenden Spaltfläche eine Reihe von in regelmäßigen engen Abständen stehenden Vertiefungen (sog. Keiltaschen) in den Stein gehauen (Abb. 4). In die Keiltaschen wurden Eisenkeile eingetrieben, wodurch senkrecht zur Spaltungsfläche Druck ausgeübt und der Stein gespalten wurde. Die Keiltaschen wurden oft in spitzwinklige Keilrinnen, später in wannenförmige Schalrinnen eingeschlagen, die über die gesamte Spaltungslänge angelegt wurden, damit die Keile tiefer im Gestein ansetzen konnten. Der

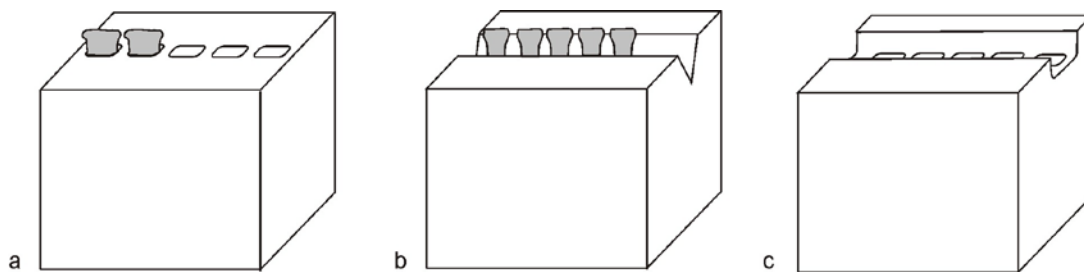


Abb. 4: Schemazeichnung der a) Keiltaschen, b) Keiltaschen in Keilrinne, c) Keiltaschen in Schalrinne (nach Mangartz 1998).

Eisenkeil saß in jeder Keiltasche zwischen zwei eisernen oder hölzernen Lamellen, die dazu dienten, dass sich der Keil besser an das Gestein anpresste, sich damit der Druck auf die Seiten der Keiltasche erhöhte und dass die Reibung zwischen Keil und Gesteinsoberfläche beim Einschlagen gemindert wurde (Mangartz 1998). Zur ausführlichen Beschreibung der römischen Abbautechniken sei auf Mangartz (2000) und Mangartz (2008) verwiesen. Insbesondere die heute noch im Gelände deutlich erkennbaren Keiltaschen sind eindeutige Zeugen römischer Steingewinnung.

Den intensivsten Abbau erfuhren diejenigen Lavavorkommen in der Eifel, die die oben beschriebenen Kriterien erfüllten: Abkühlung der Lava in polygonalen Säulen ausreichenden Durchmessers und ausreichende Mächtigkeit des Vorkommens, zudem musste eine gute Zugänglichkeit gewährleistet sein.

Die Abbaustellen der Osteifel

Die bedeutendsten Mühlsteinbrüche entwickelten sich in den Lavaströmen des **Bellerberg-Vulkans** (Abb. 5) bei Mayen in der Osteifel. Kein anderer Vulkan der Region produzierte Lavaströme, die vergleichbar geeignetes Rohmaterial hervorbrachten und gleichzeitig alle oben beschriebenen Voraussetzungen lieferten, um großmaßstäblichen Abbau zu ermöglichen. Die Steinbrüche des *Bellerbergs* sind archäologisch eingehend untersucht, die aktuellste und ausführlichste Arbeit dazu ist die von Mangartz (2008). In allen drei Lavaströmen, die der *Bellerberg* produzierte, dem **Mayener**, **Ettringer** sowie dem **Kottenheimer Lavastrom**, mit den entsprechenden Steinbrucharealen des **Mayener Grubenfelds**, der **Ettringer Lay** und des **Kottenheimer Winfelds**, ist römische Steinbruchtätigkeit anhand vielfältiger Relikte wie Münzen, Werkzeuge, Mühlsteinrohlinge und typischen Abbauspuren nachweisbar (Anhang A, Abb. A1 –A6). Da die Lava des *Bellerberg*-Vulkans in Form der oben geschilderten Basaltsäulen abgekühlt war, konnte man die Säule geeigneten Durchmessers mittels Keilspaltung von der Basis abtrennen und mit Hilfe von Hebeisen in den Bruch stürzen, wo dann von der liegenden Säule ebenfalls durch Keilspaltung die gewünschten „Scheiben“ für die Mühlsteinrohlinge abgespalten wurden. Häufig wurden entsprechend dicke Abschnitte auch direkt von der im Lavastrom noch aufrecht stehenden Säule abgekeilt. Im Mayener Lavastrom finden sich sogar Reste einer römischer Parzellierung des Steinbruchs in Form von stehen gelassenen Basaltsäulen (Anhang A, Abb. A3), die zu erkennen gibt, dass die Abbautätigkeit streng organisiert war (Mangartz 2000).

Vom nördlich von St. Johann und westlich von Ettringen gelegenen Vulkan **Hochsimmer** (Abb. 5) erstreckt sich entlang des Nettetals ein Lavastrom in süd-östliche Richtung bis in das Stadtgebiet von Mayen und liegt in unmittelbarer Nachbarschaft zum o.g. Mayener und Ettringer Lavastrom des *Bellerberg*-Vulkans. Im Lavastrom finden sich gemäß Mangartz (2000; 2008) vereinzelte Keiltaschen. Da die Lava extrem hart ist, ist unsicher, ob zu römischer Zeit die Hochsimmer-Lava in größerem Maßstab abgebaut wurde oder ob es sich lediglich um vereinzelte Versuche zur Gewinnung handelte, die dann aufgegeben wurden. Da die Lava neben ihrer Härte auch außerordentlich arm an Blasen ist, ist fraglich, ob sie als Rohstoff für Mühlsteine genutzt wurde. Da dies aber nicht vollständig ausgeschlossen werden

kann, wird der Lavastrom des Hochsimmer in diese Untersuchung einbezogen (Anhang A, Abb. A7).

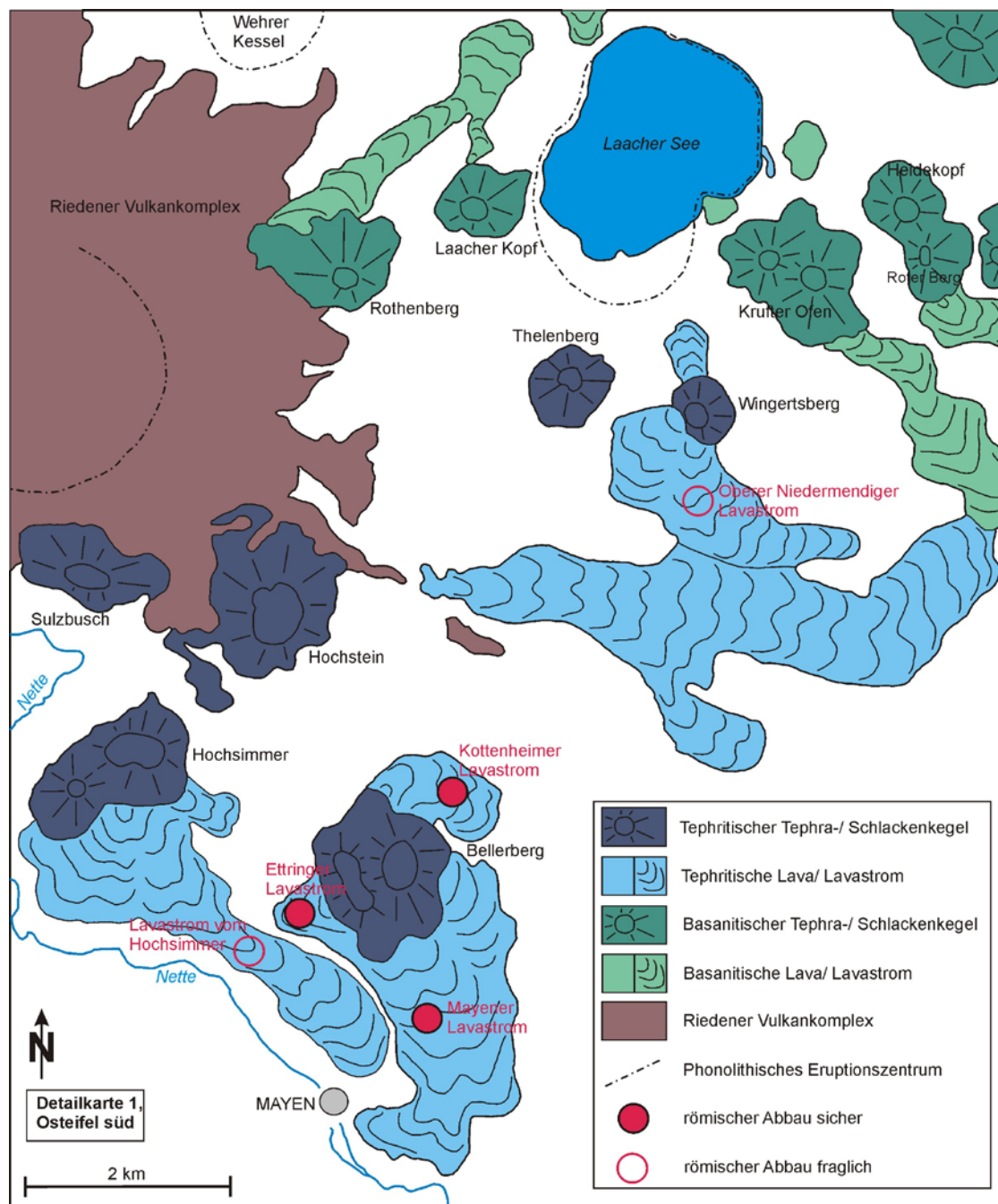


Abb. 5: Detailkarte 1 der südlichen Osteifel mit der Lage der untersuchten Abbaustellen (Kartenvorlage von Bogaard & Schmincke 1990).

Südlich des Laacher Sees kam es zum Ausfluss des **Oberen Niedermendiger Lavastroms** (Abb. 5). Der Ursprung des Lavastroms ist nicht klar lokalisiert, muss sich aber im Bereich der Schlackenkegel des Thelenberg und Wingertsberg befinden. Die Vulkanologische Karte der Osteifel von Bogaard & Schmincke (1990) gibt den Wingertsberg als Eruptionszentrum an. Der Lavastrom, ursprünglich vollständig

bedeckt von den Tephraablagerungen des Laacher See Vulkans, erstreckt sich heute unter dem Ortsbereich von Niedermendig. Archäologisch ist der Abbau erst seit dem späten Mittelalter belegt. Abbau wurde aufgrund der hangenden Tephra-schichten stets unterirdisch betrieben (Anhang A, Abb. A8). Die Theorie, dass bereits zu römischer Zeit unter Tage Steine gebrochen wurden, fußt auf dem heute nicht mehr nachvollziehbaren Fund einer augusteischen Münze in den Niedermendiger Felsenkellern. Entsprechende Mühlsteinfunde und römische Abbauspuren fehlen jedoch. Römischer Abbau im Niedermendiger Lavastrom gilt daher als unwahr-scheinlich (Hörter 1994; Mangartz 2008).

Der Vulkan **Hohe Buche** (Abb. 6) liegt nordwestlich von Nemedy in unmittelbarer Nähe des Rheintals. Ein kurzer, breiter Lavastrom floss am Nordrand des Kraterwalls aus, setzte sich als schmales Band bis ins Rheintal fort und wurde dort aufgestaut. Die antiken Steinbrüche der Hohen Buche wurden ausführlich untersucht und doku-mentiert von Mangartz (1998). Im oberen Bereich des Lavastroms, der ebenfalls in senkrechten Säulen abgekühlt ist, finden sich Spuren intensiver römischer Abbau-tätigkeit in Form zahlreicher Keiltaschenspaltungen, in einigen Fällen in Schalrinnen (Anhang A, Abb. A9-A11). Sechs römische Brüche konnten dort identifiziert werden. Eine Parzellierung ist teilweise noch erkennbar. Im unteren, rheinnahen Bereich des Lavastroms sind aufgrund starker moderner Überprägung nur Annahmen zur Abbau-tätigkeit möglich. An der Hohen Buche wurden hauptsächlich Bausteine gebrochen, insbesondere für die um 150 n. Chr. erbaute Steinpfeilerbrücke in Trier (Mangartz 2000). Die wenigen Handmühlenrohlinge wurden in erster Linie im Bereich der Block-felder, in die sich die Ränder des Lavastroms aufgelöst haben, aufgefunden. Mangartz (1998) berichtet von nur einem sicheren römischen Untersteinrohling und drei weiteren Exemplaren, bei denen eine römische Zeitstellung möglich, aber nicht eindeutig feststellbar ist. Hörter (1994) hat nur ein sicher römisches Handmühlen-fragment aufgefunden.

Nördlich des Laacher Sees produzierte der Vulkan Veitskopf bei Wassenach drei Lavaströme, wobei der mächtigste, die sog. **Mauerley** (Abb. 6), den westlichen Hang des Schlackenkegels aufriss und hauptsächlich in nordöstliche Richtung austrat. Er bildet heute den südlichen Hang des Gleeser Bachs, der sich entlang des Lava-stroms in den weicheren devonischen Untergrund schnitt. Der nordwestliche Rand des Lavastroms hat sich in Blockfelder aufgelöst, die sich bis ins Bachtal ausdehnen.

Auch dieser Lavastrom ist in Form prismatischer Säulen abgekühlt und zusätzlich horizontal zerklüftet. Auf einer Länge von 2 km wurden am anstehenden Lavastroms acht weitgehend ungestörte römische Steinbrüche und in den Blockfeldern drei Gewinnungsstellen nachgewiesen (Mangartz 2000, 2008). Die Keiltaschen entsprechen den Keiltaschentypen der Hohen Buche. Mangartz (2008) vermutet eine römische Nutzungsphase im 1. Jh. im Blockfeld und eine zweite, intensive Nutzungsphase frühestens ab dem 2. Jh. am Anstehenden. Die Lava der Mauerley wurde jedoch,

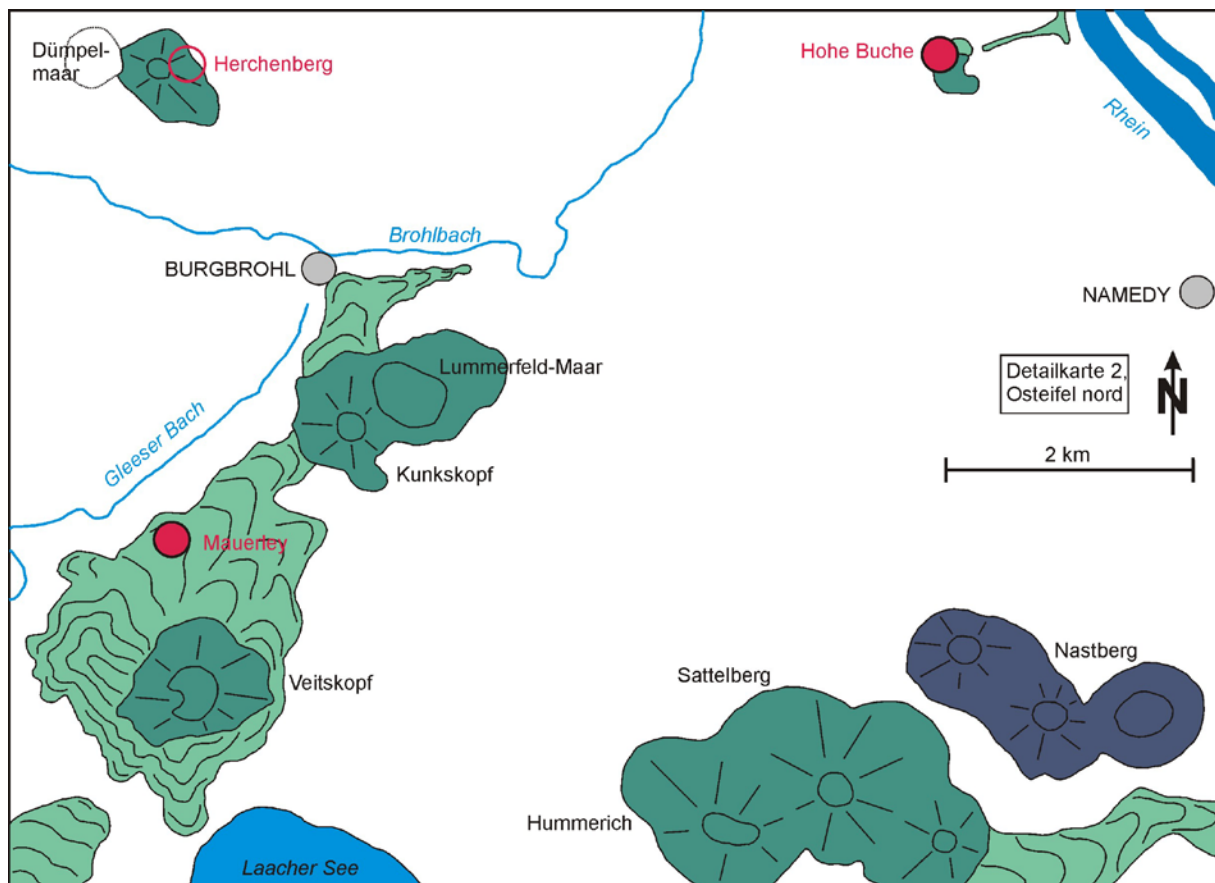


Abb. 6: Detailkarte 2 der nördlichen Osteifel mit den untersuchten Abbaustellen. Zur Legende siehe Abb. 5 (Kartenvorlage von Bogaard & Schmincke 1990).

nach den Spuren abgelöster Blöcke an den Wänden des Lavastroms und den herumliegenden aufgegebenen Blöcken zu urteilen, hauptsächlich zur Gewinnung von Bauquadern genutzt. Mühlsteine wurden offensichtlich nur untergeordnet produziert, denn entsprechende Fundstücke in den Steinbrüchen sind rar. Lediglich zwei aufgegebenen Mühlsteinrohlinge konnten von Mangartz (2008) und Hörter (1994) sicher als römisch identifiziert werden (Anhang A, Abb. A12-A14).

Der Schlackenkegel des **Herchenbergs** (Abb. 6) liegt nordwestlich von Burgbrohl und wird aktuell abgebaut. Der Herchenberg besteht hauptsächlich aus Ablagerun-

gen von Lapilli und hat keinen Lavastrom produziert, aber einige Lavagänge hervor- gebracht, die in der modernen Grube eindrucksvoll aufgeschlossen sind. Die Entste- hung des Herchenberg-Vulkans wurde von Bednarz & Schmincke (1990) untersucht. Im Ablauf des Tagebaus wurden neben den von Bednarz & Schmincke (1990) kartierten Lavagängen noch weitere Dikes aufgeschlossen. Der Gipfelbereich ist weitgehend abgebaut, jedoch existierten nach Hörter (1994) dort in einem Lavagang Stollen zur Steingewinnung. Ob dort in römischer Zeit die Lava gewonnen wurde, ist heute aufgrund des modernen Abbaus nicht mehr nachvollziehbar; aus dem Jahr 1931 liegt aber ein Bericht über römische Steinbrüche vor, und ein mutmaßlich rö- mischer halbfertiger Steinmörser vom Herchenberg wurde aus einer Sammlung von privat aufgekauft (Hörter 1994).

Die Abbaustellen der Westeifel

Im Bereich des Westeifeler Vulkanfeldes wurden von Hörter (1994) acht römerzeit- liche Gewinnungsstellen lokalisiert, in denen Rohmaterial für Mühlsteine gewonnen wurde. Die Identifikation beruht bei einigen dieser Stellen lediglich auf den für die römerzeitlich typischen Maßen von Mühlsteinrohlingen und kann daher nicht als sicher angesehen werden. Als nachweislich römisch gelten die Abbaustellen, in denen sich neben den Rohlingen weitere Spuren finden. Darunter fallen nach Man- gartz (2008) die Abbaustellen **Roßbüsch**, **Dietzenley**, **Eichholz** und **Mühlenberg**. Die Vorkommen des **Rother Kopf**, **Mosenberg**, **Römerberg** und **Goosberg** hinge- gen erklärt Mangartz (2008) als fraglich römisch.

Die Gewinnung erfolgte in allen Fällen ausschließlich am bereits fragmentierten Material der Blockfelder der Lavaströme, die anstehende Lava wurde nach bishe- rigen Erkenntnissen nicht angegangen. Keine der betreffenden Gewinnungsstellen erreicht im Mindesten die Umfänge der Steinbrüche in den Lavaströmen des Beller- berg in der Osteifel.

Nordöstlich von Kahlenborn-Scheuern liegt der Schlackenvulkan des **Roßbüsch** (Abb. 7), dessen Lavastrom sich in Form eines nach Nordosten geöffneten Hufeisens ergoss. Auf dem gesamten Gebiet seiner Lava findet sich ein ausgedehntes Feld aus Abraum und flachen Gruben, in denen römische Mühlsteinrohlinge gefunden wurden. Im nördlichen Bereich des Lavastroms ist die Lava entlang des Weges aufge-

geschlossen. Im südlichen Bereich des Lavastroms findet sich neben den Pingen ein kleiner Steinbruch, der nach Hörter (1994) schon in vorgeschichtlicher Zeit genutzt wurde. Im Bereich der Westeifel ist der Lavastrom des Roßbüsch die größte antike Gewinnungsstelle für Mühlsteine (Anhang A, Abb. A15-A17).

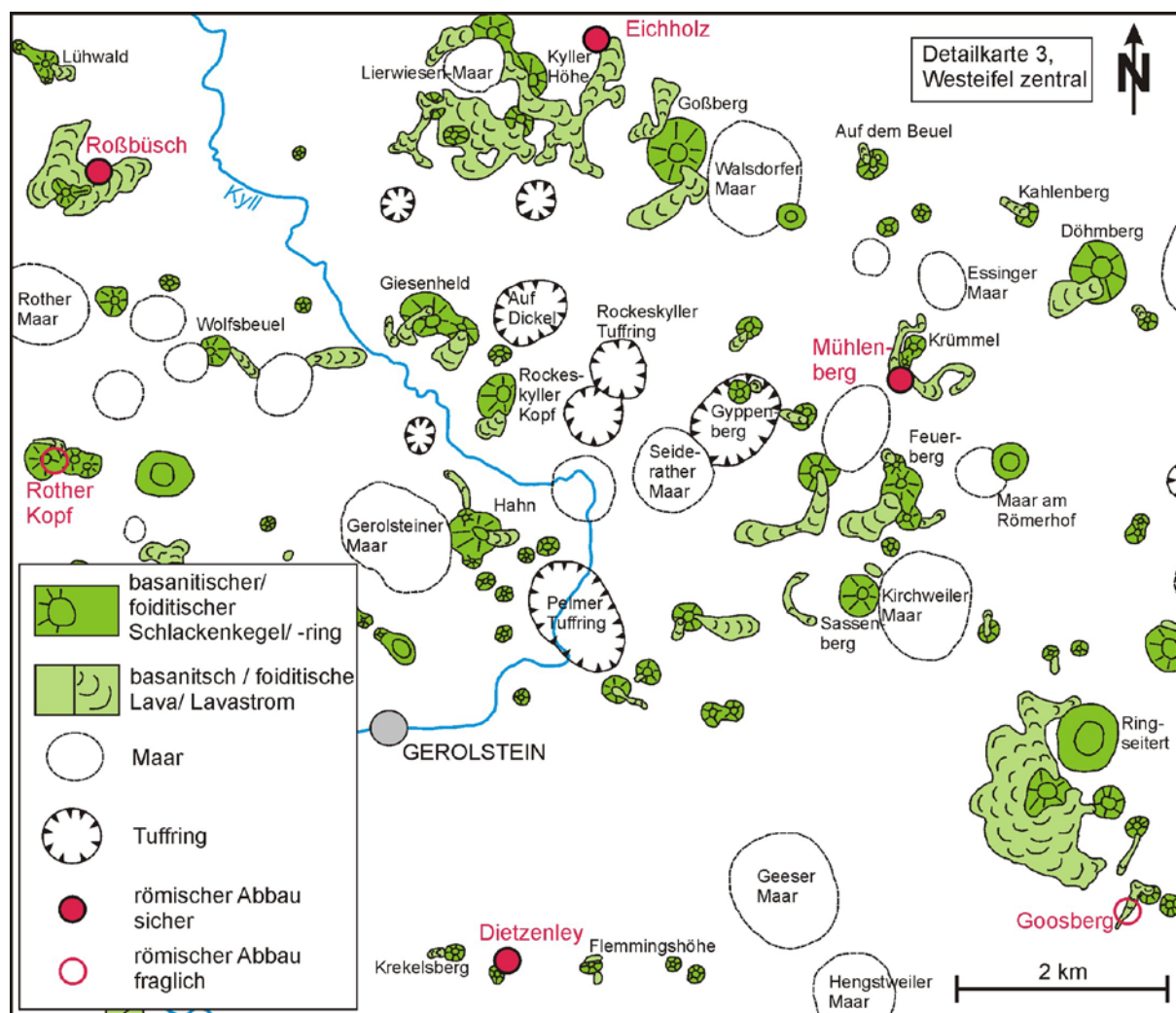


Abb. 7: Detailkarte 3 der Zentralfelds der Westeifel mit den untersuchten Abbaustellen (Kartenvorlage von Büchel 1994).

Nördlich von Gerolstein-Büscheich liegen die Felsen der **Dietzenley** (Abb. 7), auf denen bereits in vorgeschichtlicher Zeit ein Ringwall errichtet wurde. Innerhalb des Ringwalles sind alte Steinbruchspuren in dem kleinen Lavavorkommen erhalten (Anhang A, Abb. A18-A20). Auf der Südseite des Ringwalles sind zahlreiche Mühlsteinrohlinge mit typisch römischen Maßen und einige mit charakteristischen Hiebmalen gefunden worden (Hörter 1994).

Zwischen Hillesheim und Walsdorf liegt der Wald „**Eichholz**“ (Abb. 7) über einem Feld von Schlacken, in denen sich vereinzelte Lavaabschnitte finden. Einzelne flache

Steinbrüche sind dort angelegt worden, es finden sich auf dem Areal großflächig Abfälle aus Steinbearbeitung. Hörter (1994) fand dort Reste von Mühlsteinen römischen Typs (Anhang A, Abb. A24-A25).

Direkt am Ortsrand von Hohenfels-Essingen erhebt sich der Vulkan des **Mühlenbergs** (Abb. 7), in dem bis in die Neuzeit die wohl bedeutendsten Mühlsteinbrüche der Westeifel lagen. Im nördlichen Bereich wird heute noch immer abgebaut, im südlichen Bereich der Lava liegen ausgedehnte moderne Steinbrüche, die heute aber aufgegeben sind. Wann die Abbautätigkeit am Mühlenberg begann, ist unklar, da die rege jüngere Abbautätigkeit womöglich ältere Spuren überprägt hat. An der Nordseite des Mühlenbergs im Blockfeld unterhalb des aktuell betriebenen Steinbruchs konnte Hörter (1994) Rohlinge für römerzeitliche Mühlsteine identifizieren, die neben den typischen Maßen auch charakteristische Schlagmale aufweisen (Anhang A, Abb. A26-A28).

Am **Rother Kopf** (Abb. 7) südlich des Ortes Roth wurden Mühlsteine hauptsächlich aus den Schweißschlacken hergestellt, Lava tritt am Rother Kopf nur in geringem Umfang am Nordhang in Nähe zum Gipfel zu Tage. Gemäß Hörter (1994) überprägt mittelalterlicher Abbau wahrscheinlich ältere Abbauspuren. Er wertet Rohlingsfunde aus Schweißschlacke aufgrund der Maße als Hinweis auf römischen Abbau (Anhang A, Abb. A29-A31).

Der **Goosberg** (Abb. 7) nordwestlich von Daun-Steinborn hat neben Schlacken und Schweißschlacken großflächig Lava hervorgebracht, die nach Norden, Westen und Süden austrat. Hörter (1994) konnte jedoch nur an dem kleinen südlichen Bereich der Lava eine kleine Gewinnungsstelle lokalisieren, in der er Mühlsteinrohlinge fand, die römerzeitliche Maße aufweisen. Mangels eindeutiger römischer Spuren in der Feinbearbeitung der Rohlinge sieht Hörter (1994) eine römische Zeitstellung jedoch als unsicher an (Anhang A, Abb. A32-A33).

Die **Mosenberg**-Vulkangruppe (Abb. 8) bei Bettenfeld setzt sich aus dem Mosenberg selbst, dem Windsborn-Maar und Hinkelsmaar zusammen. Der eigentliche Mosenberg umfasst einen nordwestlichen, nach Norden offenen und einen südlichen, nach Süden geöffneten Krater. In einer Grube am südwestlichen Hang des Mosenbergs traten zwei weitere Förderzentren zu Tage (Meyer & Stets 1979). Die Lava des

Nordkraters ist in einem kleinen Bereich in Gipfelnähe und in größerem Maßstab an einer Wand entlang des Weges am Westhang des nördlichen Mosenberg-Kraters aufgeschlossen. Weitere Lavaaufschlüsse finden sich auf der Südseite des Mosenbergs und entlang des Horngrabens (Anhang A, Abb. A34-A36). Aufgrund der Größe von Mühlsteinrohlingen und der Nähe zu einer römischen Siedlung zieht Hörter (1994) eine römische Nutzung in Betracht.

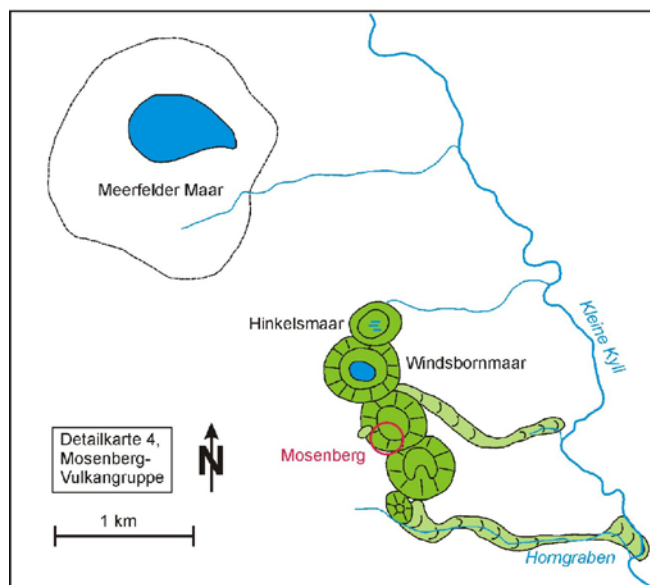


Abb. 8: Detailkarte 4 der Mosenberg-Vulkangruppe im Südwesten des Westeifeler Vulkanfeldes mit Lage der Abbaustelle. Legende siehe Abb. 6 (Kartenvorlage von Büchel 1994).

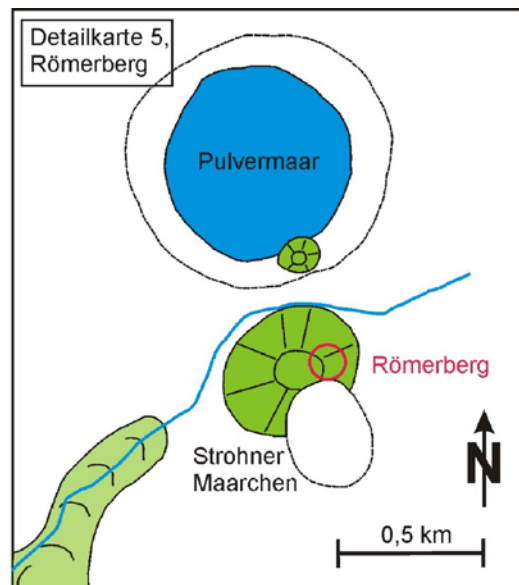


Abb. 9: Detailkarte 5 des Römerbergs im Südosten des Westeifeler Vulkanfeldes mit Lage der Abbaustelle. Legende siehe Abb. 6 (Kartenvorlage von Büchel 1994).

Westlich von Gillenfeld, südlich des Pulvermaares liegen die Schlacken des **Römerbergs** (Abb. 9), die das angrenzende „Strohnher Maarchen“ im dessen Norden und Nordwesten umfassen. Hörter (1994) schließt nach einer alten Publikation, in der von römischer Mühlsteingewinnung bei Gillenfeld berichtet wird, auf den Römerberg als einzige in Frage kommende Stelle. Abraumhalden am Südhang des Römerberges in unmittelbarer Nähe des dort hervorragenden Schlackenfelsens belegen eine gewisse Abbautätigkeit (Anhang A, Abb. A37-A39). Ob es sich um römische Spuren handelt, kann weder festgestellt noch ausgeschlossen werden.

2.2.3 Handel und Produkte

In den archäologischen Quellen lässt sich schon früh eine Bevorzugung qualitätvoller Reib- und Mühlsteine fassen. Eifeler Basaltlava wurde seit Beginn des Neolithikums kontinuierlich bis in die Neuzeit abgebaut und zu Reib- bzw. Mühlsteinen verarbeitet. Während man davon ausgehen kann, dass die Basaltlava vom Neolithikum bis in die Bronzezeit nur für den regionalen Gebrauch genutzt worden ist, dehnt sich seit der Hallstattzeit das Gebiet, in dem Reibsteine weitergegeben wurden, aus. Erst ab der Latènezeit wurden Reibsteine und später Drehmühlen in Gebiete geliefert, in denen eigene Reib- und Mühlsteine produziert wurden. Die Eifeler Produkte traten damit in Konkurrenz zu lokaler Mühlsteinproduktion, womit seit dieser Zeit die Weitergabe in gewinnorientierten Handel übergegangen ist (Mangartz 2008).

Spätestens seit römischer Zeit spiegelt sich die hervorragende Qualität der Eifeler Basaltlava in einem weit überregionalen Handel mit Mühlsteinen wider. Zu Anfang des 1. Jahrhunderts n. Chr. begann der großmaßstäbliche Abbau der Eifeler Lava, insbesondere der Lava des *Bellerbergs* bei Mayen. Mit der Umstrukturierung der rechtsrheinischen Gebiete und dem Ausbau von Fernstraßen und des alten Wegenetzes in augusteischer Zeit (siehe Kap. 2.1) wurde die Infrastruktur für intensiven Handelsverkehr geschaffen. Der Hafen in Andernach diente als Umschlagspunkt für die vulkanischen Gesteine, neben Mühlsteinen auch für Bausteine für das steinarme Niedergermanien (Mangartz 2008). Das Militär selbst hatte zunächst einen hohen Bedarf an Handmühlen, verfügte doch jedes *contubernium* (Zeltgemeinschaft von acht bis zehn Soldaten) über eine Handmühle (Jacobi 1912). Die Handmühlenproduktion für den erhöhten militärischen Bedarf, speziell in den Mayener Brüchen, wurde im 1. Jh. n. Chr. gezielt gefördert, rationalisiert und vergrößert; die jährliche Produktion steigerte sich von der Latène- zur Römerzeit um das nahezu Vierfache (Mangartz 2008). Die erhöhte Produktion lässt auf einen weiträumigen Export von Mühlsteinen schließen. Archäologische Funde deuten auf einen Handel bis auf die Britischen Inseln und in weite Bereiche des freien Germaniens hin.

Die Übersichtskarte in Abb. 10 zeigt den vermuteten Exportraum der Eifeler Mühlen. Entlegene Fundorte im Römischen Reich legen einen weiten Export von Eifeler Handmühlen nahe, so z.B. die römische Siedlung am Magdalensberg in Kärnten

(Zirkel 1963). Demnach hat ein Export rheinauf- und sogar donauabwärts stattgefunden und die Mühlsteine gelangten z.B. im Falle Magdalensberg bis in den Einzugsbereich regionaler kleiner Mühlsteinbrüche aus Vulkaniten, wie z.B. des Paulibergs im Burgenland (Zirkel 1955). Der Weg über den Rhein zu den Abnehmern lässt sich an Schiffsfunden rekonstruieren: In den Funden von Salmorth (Hinz 1966; Langenbach 1998) und Rindern bei Kleve (Kock 1970) am unteren Niederrhein und Wantzenau bei Straßburg am Oberrhein (Forrer 1912) waren die Schiffe u. a. mit Mühlsteinen beladen. Im Mündungsgebiet des Rheins wurden die Steine anschließend auf seetaugliche Schiffe umgeladen (Mangartz 2008). Die Mühlsteine gelangten über den Rhein und den Ärmelkanal nach Britannien. Gemäß archäologischer Interpretation wird der Export von Handmühlen aus Basaltlava auf die Britischen Inseln in römischer Zeit mit großen Mengen dieser Artefakte in Südost-England, West- und Nordbritannien belegt, der erst ab dem 4./5. Jh. abflaut und schließlich im 7. Jh. endet (King 1987; Bishop 2000).

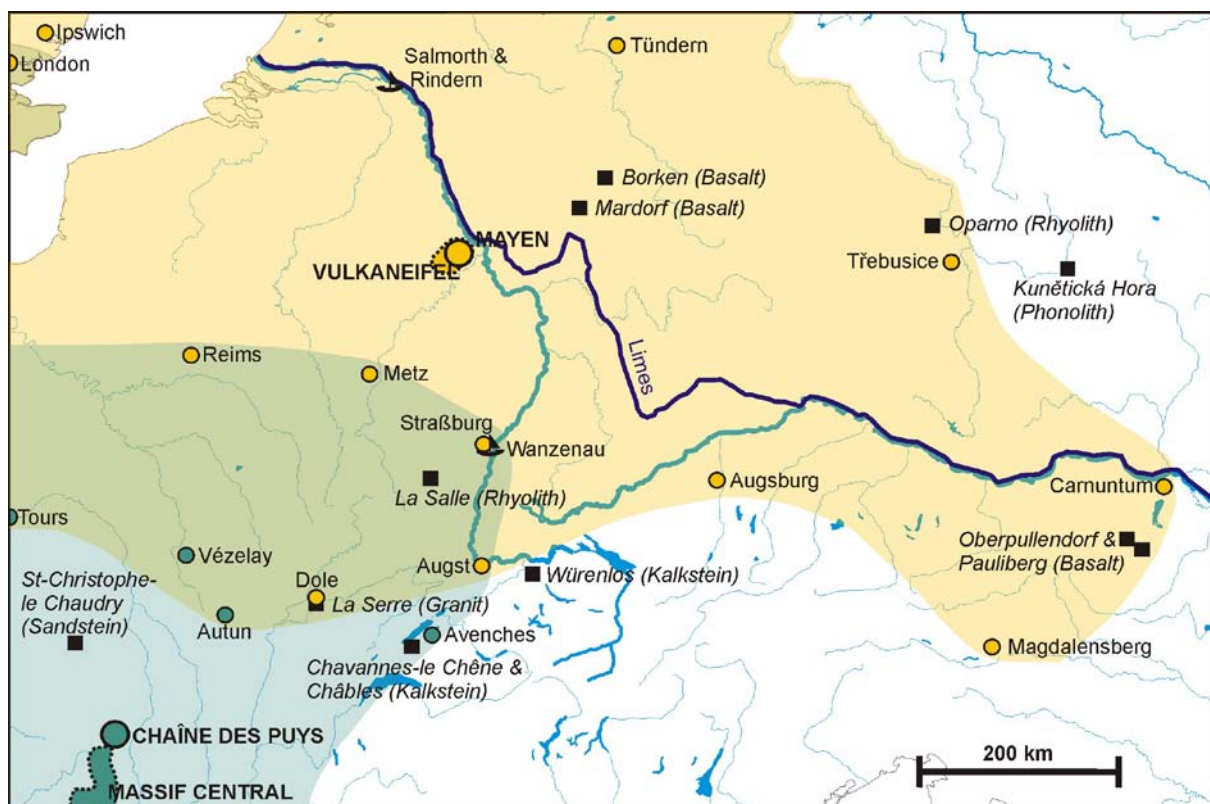


Abb. 10: Vermuteter Exportraum der Eifeler Mühlen (gelb) in Abgrenzung zum Exportraum des Massif Central (grün). Karte verändert nach Mangartz (2008).

Im innergallischen Bereich grenzt der Exportraum der Eifeler Mühlen an den der Mühlen vergleichbarer Qualität aus Vulkaniten des Massif Central (Abb. 10). Die Entwicklung der Mühlsteinproduktion im Massif Central lief entsprechend der Ent-

wicklung der Eifeler Produktion: Während im Einzugsbereich in vorrömischer Zeit der Bedarf an Mühlen aus lokalen bis regionalen Steinbrüchen gedeckt wurde, verdrängten mit Beginn der römischen Herrschaft, dem einhergehenden hohen militärischen Bedarf an qualitätvollen Mühlen und dem Ausbau der Infrastruktur die hochwertigen Mühlen aus dem Massif Central zunehmend die schlechteren Mühlen lokaler Herkunft (Mangartz 2008). Die Lava von Volvic gilt als wahrscheinlichster Rohstoff für die Mühlen (Peacock 1980; Williams-Thorpe & Thorpe 1988; Serneels 1994; 1996), jedoch können in der Chaîne des Puys die römischen Mühlsteinbrüche im Gegensatz zu denen in der Eifel von Archäologen aufgrund der Überprägung durch modernen Abbau nicht mehr lokalisiert werden. Obwohl die Laven der Chaîne des Puys nicht die einzigen vulkanischen Vorkommen des Massif Central sind, gelten die Laven der übrigen Regionen (z.B. Cantal, Monts Dore) in der archäologischen Forschung als unwahrscheinliche Rohstoffquellen, da sie von bewohnten Gegenden sehr abgelegen und schwer zugänglich waren, können aber nicht ausgeschlossen werden (Peacock 1980, Serneels 1994, 1996).

Die Liefergebiete der Eifel einerseits und der Chaîne des Puys andererseits lassen sich bisher nicht voneinander abgrenzen. Jedoch waren im Nordwesten Produkte aus der Auvergne gegenüber Eifeler Mühlsteinen nach bisherigem Kenntnisstand nur in der Frühzeit konkurrenzfähig, denn zu diesem Zeitpunkt war das Rheinland militärisch noch nicht vollständig gesichert. Die Grenzen zwischen den Handelsräumen der Mühlsteine der Auvergne und denen der Eifel werden im Bereich der Mittelgebirge westlich des Ober- und Mittelrheins vermutet. Nördlich und westlich der Kölner Bucht dominierten die Eifeler Steine über den Rhein und seine Nebenflüsse den Handel. Nach Südwesten lag die Grenze zwischen den Handelsgebieten Eifel und Auvergne vermutlich in der Westschweiz, die als autarke Trennzone den Eigenbedarf an Mühlsteinen durch den Abbau von dortigen Muschelkalken deckte (Mangartz 2008).

Der intensive Handmühlenexport aus der Eifel jenseits der Grenzen des Römischen Reiches östlich des Limes setzte erst mit dem ausgehenden 2. Jh. n. Chr. ein (Bischof 2000). Zu diesem Zeitpunkt wurden die Handmühlen beim Militär unwichtig, da mit zunehmender fester Stationierung und Kasernierung ortsfeste Kraftmühlen den Mehlbedarf der Truppen deckten. Die Produzenten und Händler wichen aus diesem Grund auf die neuen Märkte der Germania libera aus (Mangartz 2008). Für

Niedersachsen liegt eine Kartierung von Fundstellen des 1.-4. Jh. n. Chr. mit Handmühlen aus von Bischof (2000) vermuteter Mayener Basaltlava vor. Die Verteilung richtet sich fast ausschließlich nach den Wasserläufen. Handmühlen aus augenscheinlich Eifeler Material finden sich an der unteren und mittleren Weser, und mit Fundstücken aus Tündern (Kreis Hameln/Pyrmont) und Göttingen zeigt sich, dass auch der Oberlauf der Weser und deren weiterer Einzugsbereich erreicht wurden. Der Handel war an römische Kaufleute gebunden, die wenigstens in Friedenszeiten bei den Germanen Immunität genossen (Bischof 2000). Am weitesten in die *Germania libera* gelangten zwei mutmaßlich Eifeler Handmühlen, die in Böhmen gefunden wurden (Waldhauser 1981). Als Handelsgut - trotz Konkurrenz zu böhmischen Produktionszentren mit hochwertigen Mühlen - können diese Mühlsteine nach Mangartz (2008) ihren Weg nur über Rhein, Nordseeküste und Elbe ins heutige Böhmen genommen haben.

In der Eifel, insbesondere in den Lavaströmen des *Bellerbergs* bei Mayen, bestand damit bereits in der Antike eines der größten Bergbaureviere der „alten Welt“ nördlich der Alpen (Peacock 1980; Mangartz 2008). Die Forschungen zur Archäologie und Technikgeschichte der Eifel haben eine lange Tradition und sind weit fortgeschritten (einen Überblick über die Forschungsgeschichte gibt Mangartz 2008); jedoch gibt es keine naturwissenschaftlich fundierten Daten, welche die Ausdehnung und damit die Bedeutung des Handels mit diesem Werkstoff in der Römerzeit dokumentieren können.

Produkte

In der Eifel wurden sowohl Handmühlen, die ein Mensch von Hand bedienen konnte, als auch Kraftmühlen, die im Göpelbetrieb oder unter Wasserkraft liefen, hergestellt und gehandelt. Römische Mühlen sind stets Rotationsmühlen. Die Mühlen bestehen aus dem „Unterlieger“ (Meta) und dem „Oberlieger“ oder „Läufer“ (Catillus).

Die Handmühlen (Abb. 11) besitzen meist einen Durchmesser von 38 bis 44 cm (Hörter 1994; Mangartz 2008), wobei die sog. Legionärs-mühlen (s.u.) stets einen kleineren Durchmesser haben. Meta und Catillus haben in neuwertigem Zustand eine Höhe von 8 bis 12 cm, wurden aber, wie zahlreiche Fundstücke zeigen, oft auf wenige Zentimeter herunter gemahlen, bis die Mühle durch den geringen Auflast-

druck unbrauchbar war oder zerbrach. Der Unterlieger hat eine flach konische Form und ist an der Unterseite ausgehöhlt, um das Gewicht zu reduzieren und hat so eine nahezu konkav-konvexe Form. In der Mitte des Unterliegers befindet sich ein durchgeschlagenes Loch, in das eine Zentrierachse eingesetzt war, die wiederum in den Läufer griff. Die frühen Mühlenformen hatten eine Achse aus Holz, um die sich der Läufer drehte (Mangartz 2008; Hörter 2000). Weiterentwickelt wurden die Mühlen zu den „Legionärsmühlen“, indem im Läufer entweder an der Ober- oder später vermehrt an der Unterseite ein höhenverstellbarer eiserner Mitnehmer („Mühlenshau“) in Form eines Schwalbenschwanzes eingelassen und mit Blei befestigt wurde. In dieses Lager griff die Zentrierachse aus dem Unterlieger. Die Mahlseite des Läufers ist entsprechend dem Unterlieger konisch herausgearbeitet.

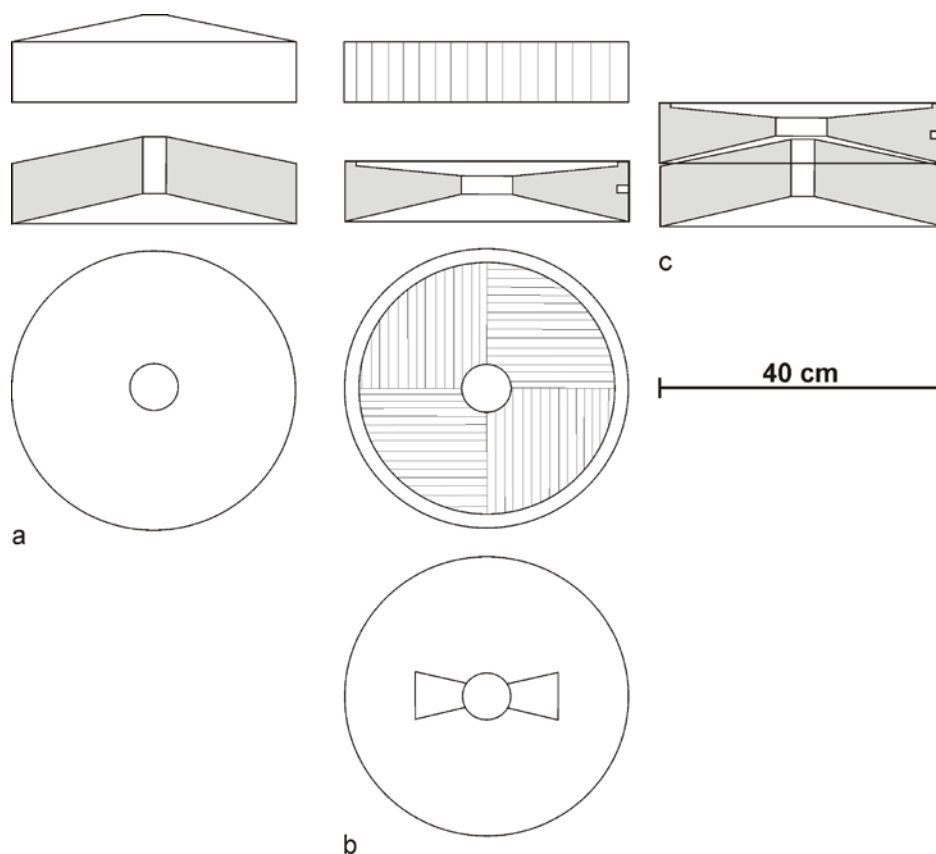


Abb. 11: Schematische Darstellung einer Handmühle;
a: Unterlieger,
b: Oberlieger mit verzierter Oberseite und Unterseite mit schwalbenschwanzförmiger Aussparung für den Mitnehmer,
c: Seitenansicht der kompletten Handmühle (verändert nach Hörter 1994 und Mangartz 2008).

Der Griff war an einem Loch an der Oberseite oder Außenseite des Läufers angebracht (Hörter 2000). In manchen Fällen ist der Läufer am Rand auf der Oberseite schräg zur Außenseite hin durchlocht, um dort Eisenklammern für einen Griff zu befestigen (Mangartz 2008). Auf den Mahlflächen von Unterlieger und Läufer sind oft Schärfungsrillen gemeißelt, die entweder radial vom Achsloch nach außen verlaufen oder parallel in einzelnen Abschnitten angelegt sind. Dabei sind sie stets so angeordnet, dass das Mahlgut bei der Drehbewegung optimal nach außen transportiert wird.

An der Orientierung der Schärfungsrillen zueinander lässt sich demnach feststellen, ob es sich um eine links- oder rechtsdrehende Handmühle handelte. Typisch für die Produktion der Eifeler Mühlsteine ist die Gestaltung der Oberseite des Läufers: Üblicherweise besitzt die Oberseite einen ca. 4 cm breiten Rand. Vom Rand aus nach innen zum Mühlenaugen hin, in das das Mahlgut eingefüllt wurde, ist der Läufer flach konisch ausgearbeitet und erhält damit eine ungefähr bikonkave Form. Oft ist die Fläche in Felder, (meist vier) unterteilt, in die parallel zum Feldrand Rillen gearbeitet sind. Die Außenränder der Mühlsteine sind sorgfältig gebeilt und häufig mit parallelen Rillen verziert. In vielen Fällen findet sich am Rand des Mühlsteins eine Vertiefung, in die zum Transport ein Eisen eingehakt wurde.

Nach Baatz (1995) liegt die Grenze zwischen einer Handmühle und einer Kraftmühle bei einem Durchmesser von ca. 45 cm. Die Kraftmühlen lassen sich in verschiedene Typen einordnen. Baatz (1995) unterscheidet langsam laufende Kraftmühlen (mit 7 – 10 Umdrehungen pro Minute), die ohne Getriebe direkt von Menschen oder Tieren angetrieben wurden, und schnell laufende Kraftmühlen, die über ein Getriebe, das die Drehzahl heraufsetzt, unter Wasser- oder Göpelantrieb liefen.

Zwei Typen der langsam laufenden Kraftmühlen sind in der Eifel hergestellt worden: die Mühlen des sog. „pompejanischen Typs“ und die zylindrischen Langsamläufer des Typs „Haltern/Rheingönheim“ (Baatz 1995).

Die **langsam laufenden Kraftmühlen pompejanischen Typs** (Abb. 12) bestehen aus einem zylindrischen Unterlieger, der im oberen Teil zu einem 50 – 70° steilen Konus, vergleichbar mit einem Zuckerhut, gearbeitet ist, und einem uhrglasförmige Läufer. Die Basis des Unterliegers war in ein Podest eingemauert. In der Kegelspitze des Unterliegers saß in einer Vertiefung die Achse, der ein hölzernes Hängewerk auflag. An dem Hängewerk hing der Läufer, der so über dem Unterlieger angehoben werden konnte. An der eingeschnürten „Taille“ des Läufers waren Öffnungen aus dem Stein gearbeitet, in denen die Hebel saßen, mit denen die Mühle über das Hängewerk gedreht wurde. Das Zugtier, Esel oder Maultier, war an das Hängewerk geschirrt und trieb die Mühle an (Baatz 1995; Hörter 2000).

Die Mühlsteine **des Langsamläufers vom Typ „Haltern/Rheingönheim“** (Baatz 1995) haben eine zylindrische Form (Abb. 13). Der Unterlieger ist wie bei den Hand-

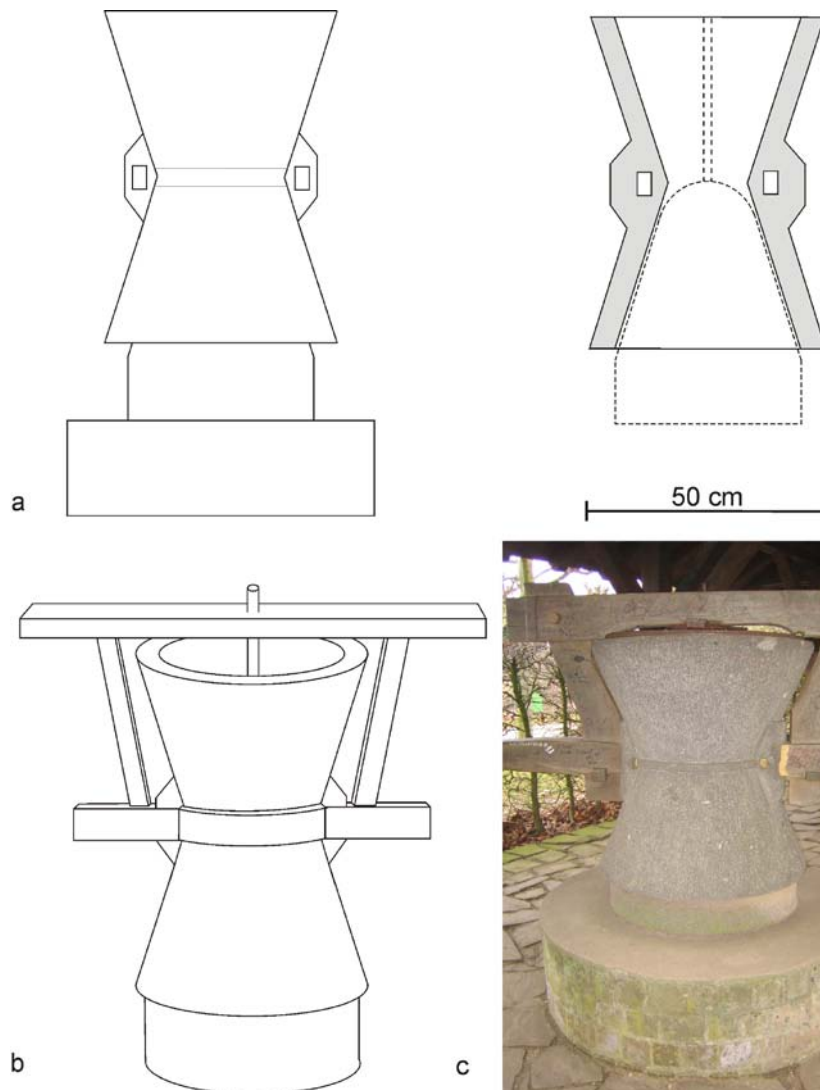


Abb. 12: Schema einer langsam laufenden Kraftmühle pompejanischen Typs, a: sanduhrförmiger Läufer auf dem Unterlieger, der in eine Basis eingemauert ist und Querschnitt durch den Läufer, b: Mühle mit Hängewerk (verändert nach Baatz 1995, Buffone et al. 2003; Mangartz 2008), c: Nachbau im Archäologischen Park, Xanten.

mühlen unten ausgehöhlt mit konischen Mahlflächen. Frühere Unterlieger sind nicht durchbohrt, in deren Mitte befand sich lediglich eine Vertiefung für ein Lager, in dem sich die Achse drehte, die späteren Unterlieger sind durchbohrt und hatten vermutlich eine feste eiserne Zentrierachse. Die Läufer besaßen auf der Oberseite wie die Handmühlen einen Rand, von dem aus die Oberfläche trichterförmig zum Mühlenauge hin abfiel. Die Mahlflächen haben Winkel von $18 - 30^\circ$. Wenn Schärfungsrillen vorhanden sind, zeigen sie keine vorgegebene Drehrichtung. Die Mühlen sind so schwer, dass sie ebenfalls an einem Hängewerk aufgehängt gewesen sein müssen, dessen Konstruktion allerdings unbekannt ist. Baatz (1995) geht davon aus, dass in den seitlichen schwalbenschwanzförmigen Eintiefungen der Läufer des Typs „Haltern/ Rheingönheim“ Nuten gesessen haben müssen, an denen ein Querbalken befestigt war, über den der Läufer mit dem Hängewerk verbunden war und über dessen verlängerte Hebel die Mühle gedreht wurde. Hörter (2000) hält es auch für möglich, dass um den Unterlieger ein Felgenkranz lag, der mit Zapfen eines Stern-

radgetriebes versehen war, wodurch der Langsamläufer Typ „Haltern/Rheingönheim“ durch Wasserkraft oder Göpelwerk angetrieben wurde.

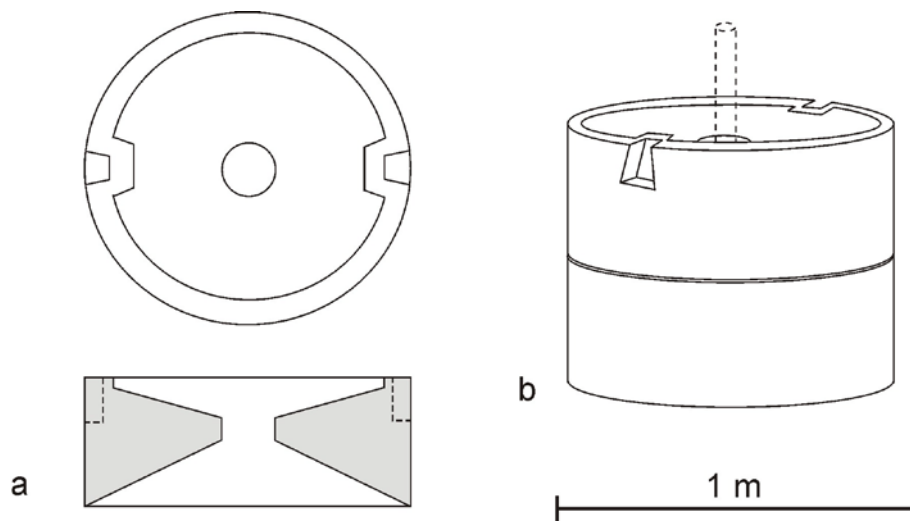


Abb. 13: Schema der Kraftmühle des Typs „Haltern/ Rheingönheim“; a: Oberlieger mit seitlichen Eintiefungen für die Halterungen des Quer balkens; b: komplette Mühle (verändert nach Baatz 1995).

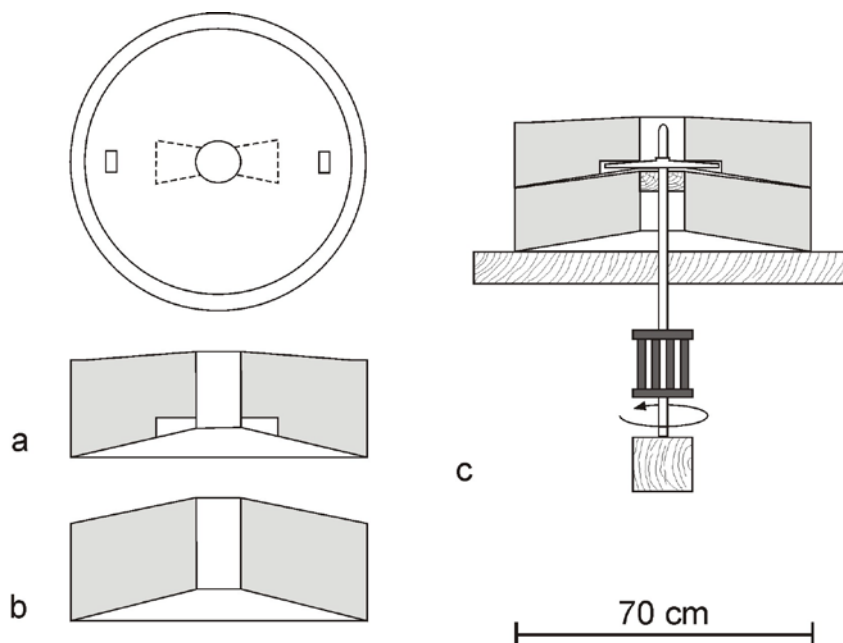


Abb. 14: Schema einer Schnellaufende Kraftmühle, a: Läufer mit schwalbenschwanzförmiger Aussparung für Mitnehmer, b: Unterlieger, c: Mühle mit Mühlennachse und Getriebe (verändert nach Hörter 1994; Baatz 1995).

Schnellaufende Kraftmühlen (Abb. 14) sind nach Baatz (1995) eine „mühlentechnische Neuerung des 2. Jahrhunderts n. Chr.“. Die Schnellläufer wurden stets über ein Getriebe von Wasser oder Zugtieren angetrieben. Bei diesen vergleichsweise leichten Mahlwerken war der Läufer gestützt, d.h. er hing nicht wie die Langsamläufer an einem Hängewerk, sondern saß der Mühlennachse auf. Letztere wurde von unten durch ein weites Loch im Unterlieger geführt und griff über eine schwalbenschwanzförmige Mühlennachse in den Läufer. Dieses Merkmal ist bei allen unterschiedlichen Formen den Schnellläufern gemeinsam: die Unterseite des Läufers be-

sitzt schwalbenschwanzförmige, meist zwei gegenüberliegende Nuten, in die die Mühlenhaue eingesetzt war. Die Mahlflächen der älteren Schnellläufer waren noch konisch, wurden aber im Laufe der Weiterentwicklung deutlich flacher. Die Mahlflächen waren oft geschärft, wobei eine Drehrichtung vorgegeben wurde (Baatz 1995).

2.3 Archäometrische Untersuchungen

Ungeklärt bei der Rekonstruktion von Handelsräumen ist, ob die von archäologischer Seite der Eifel zugeordneten römischen Steine tatsächlich alle aus den entsprechenden Brüchen stammen. Die archäologische Herkunftsbestimmung der Mühlstein-Fundstücke beruht bisher ausschließlich auf makroskopischen petrographischen Beobachtungen. Dies ist seitens der Geologie großenteils in Frage zu stellen, da sich die einzelnen angenommenen Lavavorkommen makroskopisch nur unzureichend unterscheiden lassen und die angeführten Unterscheidungskriterien (z.B. Blasengröße) oft mineralogisch nicht nachvollziehbar oder quantifizierbar sind. So wird etwa für fast alle Lava-Mühlsteine aus dem Nordwesten Europas eine Mayener Produktion angenommen, was keinesfalls sicher ist.

Archäometrische Provenienzanalysen für Mühlsteine der Römerzeit mit vermutetem Ursprungsort Eifel fehlen bis jetzt. Die bislang einzigen mineralogischen Untersuchungen an Mühlsteinen vermuteter Eifeler Herkunft wurden an frühmittelalterlichen bis mittelalterlichen Fundstücken unternommen. Die Studien konzentrierten sich stets auf die Fundstücke und deren Zuordnung, aber nie auf eine Charakterisierung der Rohstoffe aus den Steinbrüchen mit ihrer geologischen Variabilität. Den einzigen Ansatz zur Charakterisierung Eifeler Steinbrüche liefert die Arbeit von Hörmann & Richter (1983), die sich jedoch auf wenige Proben aus dem Mendiger Lavastrom und aus zwei von drei Lavaströmen des Mayener *Bellerbergs* beschränkt und nicht die gewünschte verlässliche Differenzierung der einzelnen Steinbrüche erreicht. Hörmann & Richter (1983) verglichen Mühlsteinreste aus dem frühmittelalterlichen Haithabu (Kreis Schleswig-Flensburg) mit Bruchsteinproben aus Mendig, Ettringen und Mayen in der Eifel. Durch den Vergleich von Haupt- und Spurenelementen und petrographische Beobachtungen wurde festgestellt, dass das Material der entsprechenden Funde durchaus den untersuchten Lavaströmen entstammen kann.

Wie und ob sich die Funde auch mit anderen mittelalterlichen Steinbrüchen der Eifel korrelieren lassen, wurde jedoch von den Autoren nicht berücksichtigt. Problematisch ist weiterhin, dass Hörmann & Richter (1983) keinerlei Angaben zur Messmethode und Auswertung vorlegen, was die Nachvollziehbarkeit der Messergebnisse erschwert. Kars (1980) unternahm für die frühmittelalterliche Siedlung Dorestad an der niederländischen Küste entsprechende Analysen. Das Rohmaterial aller Mühlsteine und Rohlinge entstammt zufolge mikroskopischer petrographischer Studien und Hauptelement-Analysen der Lava des Mayener Bellerbergs; nur ein Fundstück wurde einer Lavabombe des Vulkans Veitskopf (Osteifel, Laacher See-Gebiet) zugeschrieben. Doch auch hier entstammen die wenigen Geländeproben ausschließlich der Region um Mayen und aus Niedermendig, und auf die übrigen, sehr zahlreichen mittelalterlichen Steinbrüche in der Eifel wird nicht eingegangen. Jeweils nur eine Probe wurde aus jedem der drei beprobten Steinbrüche geochemisch untersucht und neben jeweils einem weiteren Literaturwert als Referenz herangezogen. Spurenelemente oder sonstige Signaturen wurden bei dieser Analyse nicht berücksichtigt. Angaben zur Messmethode fehlen. Die Kriterien, die die Fundstücke dem Mayener *Bellerberg* zuordnen, sind unzureichend, da keine ausreichende Menge an Referenzwerten vorliegt und nicht versucht wird, die Mayener von der Niedermendiger Lava geochemisch zu unterscheiden. Gerade die Zuordnung eines Fundstücks zur „Lavabombe“ des Veitskopfes ist in Frage zu stellen, da sich der Basanit des Veitskopfes (der außerdem großflächig in der Mauerley am Gleeser Bach aufgeschlossen ist, wo auch mittelalterlicher Abbau nachgewiesen ist) auf der von Kars (1980) vorgelegten Basis (Polarisationsmikroskopie) nicht von dem Basanit der Hohen Buche (Osteifel), für die archäologisch ebenfalls mittelalterlicher Abbau belegt ist, unterscheiden lässt. Damit zeigt sich, dass nur auf Grundlage einer ausführlichen Geländebegehung und Probenahme eine genaue räumliche Zuordnung der Fundstücke zu den Steinbrüchen der Eifel möglich ist.

Entsprechende Untersuchungen aus anderen Regionen zeigen, dass sich die genaue mineralogisch-geochemische Provenienzbestimmung von Mühlsteinen als vielversprechend erweist:

Bisherige Provenienzanalysen von römischen Mühlsteinen beschränken sich hauptsächlich auf den Mittelmeerraum. Dort sind Funde leuzitführender Mühlsteine besonders häufig, die den leuzitführenden Laven in der Gegend um Orvieto zugeordnet

wurden (Peacock 1980; 1986). In einer Studie speziell zu diesen Laven von Antonelli et al. (2003) wurde anhand mikroskopischer und geochemischer Bestimmungen eine Datenbank über die möglichen Abbaustellen erstellt. Anhand der geochemischen Daten konnten die Magmen gegen andere phonolithische und tephri-phonolithische Laven der quartären Vulkangebiete Latiums abgegrenzt werden. Dadurch war es möglich, fünf römische Mühlsteine ihren Abbaustellen zuzuordnen. Die Herkunft einiger sizilianischer und französischer leuzitführender Mühlsteine konnte verifiziert werden (Antonelli et al. 2003). In weiteren Studien konnten anhand entsprechender Analysen neben den phonolithischen Laven aus Orvieto zusätzliche Abbauzentren von Natrium-Trachyt, Hawaiit und Tholeiitischen Basalten exakt lokalisiert werden (Renzulli et al. 2002; Volterra & Hancock 1994). Buffone et al. (2003) gelang es, auf Basis der geochemischen Zusammensetzung Mühlsteine aus Pompeji dem Vesuv, Ätna und den Orvieto-Steinbrüchen zuzuordnen.

Williams-Thorpe & Thorpe (1988; 1989; 1991; 1993) unternahmen umfassende Studien zu zahlreichen Mühlsteinfundstücken im gesamten mediterranen Raum, z.B. östlicher Mittelmeerraum (Williams-Thorpe & Thorpe 1993; Williams-Thorpe et al. 1991), Mallorca (Williams-Thorpe & Thorpe 1991), Sardinien (Williams-Thorpe & Thorpe 1989) und weiteren Lokalitäten im Mittelmeergebiet (Williams-Thorpe 1988). Die Fundstücke wurden auf Basis geochemischer Analysen von Haupt- und Spurenelemente mittels RFA mit antiken Abbaustellen in bestimmten vulkanischen Gebieten verglichen, die zu römischer Zeit Mühlsteine in den mediterranen Raum exportierten. Durch die Zuordnung der Fundstücke zu den Produktionszentren ließen sich die Transportwege rekonstruieren. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass sich der Mühlsteinhandel an den Routen von Getreideschiffen, die auf ihrer Fahrt von Norden in den südlichen und westlichen Mittelmeerraum Mühlsteine als Ballast und Handelsgut an Bord hatten, orientierte. Die Mühlen wurden nicht von Süden nach Norden transportiert, da die Schiffe auf dieser Route Getreide geladen hatten (Williams-Thorpe 1988).

Anhand der geochemischen Analyse der Mühlstein-Ladung eines griechischen Handelsschiffs, das vor Mallorca im 4. Jh. v. Chr. gesunken ist, konnte sogar der Weg, den das Schiff durchs Mittelmeer nahm, rekonstruiert werden (Williams-Thorpe & Thorpe 1990).

Oliva et al. (1999) untersuchten römische Mühlsteine aus Les Martyrs in der Montagne Noire, die in der Metallproduktion zum Einsatz kamen. Die Autoren kamen auf Grundlage mineralogischer Bestimmungen zu dem Ergebnis, dass die Mühlen pompejanischen Typs aus Orvieto, die Handmühlen aber aus Adge in Südfrankreich kamen. Anhand von energiedispersiver Röntgenspektroskopie und Rasterelektronenmikroskopie konnte sogar der genaue Einsatzbereich der Mühlen geklärt werden.

In ihrer mineralogischen Untersuchung dreier römischer Eselsmühlen im römischen Britannien, von denen eine von Archäologen der Mayener Lava zugeordnet wurde, konnten Williams-Thorpe & Thorpe (1988) per RFA nachweisen, dass keine der Mühlen aus der Eifel stammt, sondern zwei aus der Chaîne des Puys und eine aus Sardinien. Damit bekräftigen sie die bestehende Annahme, dass Mayen kein Produktionsort für Mühlsteine dieses Typs war, zumal zum Zeitpunkt ihrer Untersuchungen dort erst *ein* solches Fundstück bekannt war (Williams-Thorpe & Thorpe 1988). Inzwischen sind allerdings vier Mayener Exemplare von Eselsmühlen vorhanden (Mangartz 2008); damit sind bezüglich dieses Mühlentyps ebenfalls neue Ergebnisse zu erwarten.

2.4 Geologischer Hintergrund

2.4.1 West- und Zentraleuropäischer Vulkanismus

Tertiärer und quartärer Vulkanismus in West- und Zentraleuropa (Central European Cenozoic Volcanism, abgekürzt CECV) ist eng verknüpft mit der Ausbildung des känozoischen europäischen Riftsystems. Das Riftsystem entwickelte sich zeitgleich mit den eozänen und späteren orogenen Phasen der Alpen, in denen das nordwestliche Alpenvorland wiederholt horizontaler Kompression ausgesetzt war, und begleitete somit den neogenen Kollaps des mediterranen und Pannonischen Beckens. Es verbreitete sich während des Oligozäns nach Norden und Süden und ist bis heute tektonisch aktiv. Die Hauptelemente des Riftsystems (Abb. 15) sind Rhein-, Ruhr- und Leine-Graben, die das Rheinische Schild durchschneiden, der Eger-Graben des Böhmisches Massivs, der Limagne-Graben im Norden des Massif Central, die Bresse- und Saône-Graben, die im Osten an das Massif Central grenzen, der Golfe du Lion-Graben südlich des Massif Central und der Valencia-Trog, der sich parallel zur Ostküste Spaniens erstreckt (Ziegler 1992; 1994).

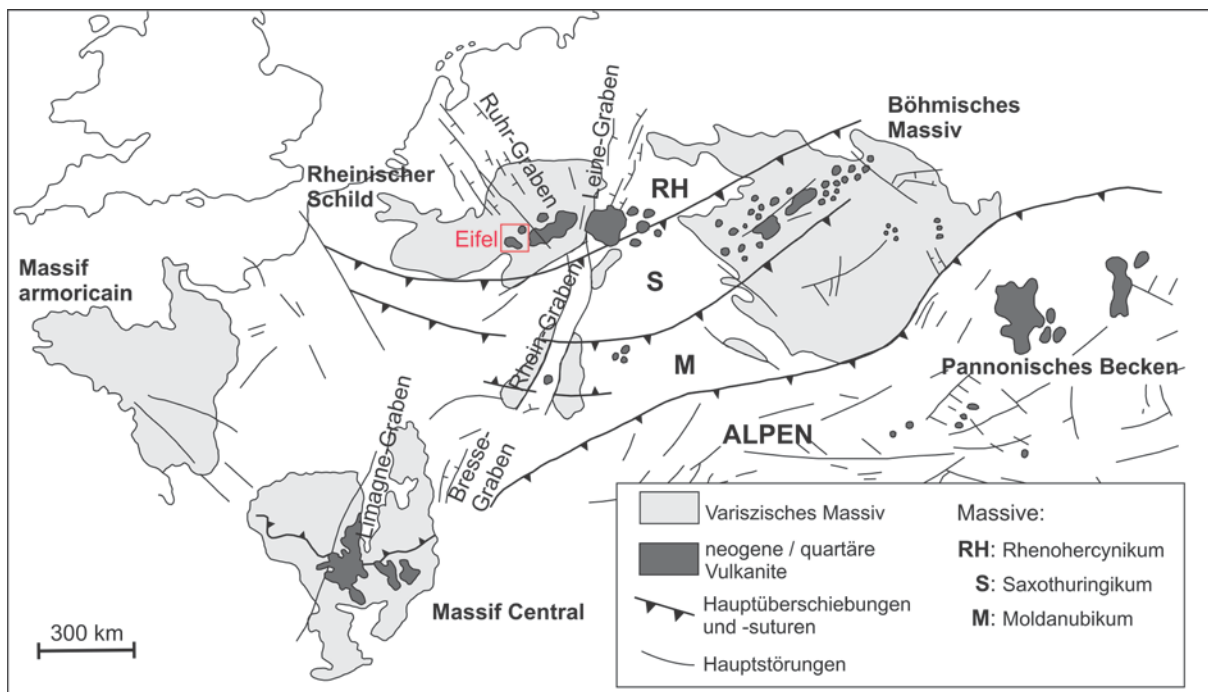


Abb. 15: Karte des West- und Zentraleuropäischen Vulkanismus in Verbindung mit den Hauptstörungssystemen und den variszischen Massiven (verändert, nach Wilson & Downes 1991).

Der N-NE-verlaufende Rheingraben gabelt sich auf, zum einen in den Leinegraben, der die Streichrichtung des Rheingrabens beibehält und die Hessische Senke über-

prägt, und zum anderen in den NW-streichenden Ruhr-Graben. Die Subsidenz des Grabensystems begann im Eozän. Vulkanismus war mehr oder weniger kontinuierlich während des gesamten Känozoikums aktiv, hatte aber eine Hauptphase im Miozän und später eine weitere im Quartär. Die Gegend der triple junction von Rhein-, Ruhr- und Leinegraben kann als Hauptzentrum des Vulkanismus angesehen werden; kleinere vulkanische Zentren liegen weiter östlich des Rheingrabens (Rhön, Urach, Hegau). Auf dem Rheinischen Schild, der von der triple junction durchschnitten wird, erstreckt sich der neogene Vulkanismus in einem weiten E-W-orientierten Bereich über 250 km. Während des Quartärs konzentrierte sich der Vulkanismus auf das Gebiet der Eifel.

Das südliche Ende des Rheingrabens ist über ein NE-streichendes System aus Transformstörungen mit den Graben des Massif Central verbunden. Die känozoischen Rifts im Südosten Frankreichs streichen parallel zur alpinen Deformationsfront und folgen einem reaktivierten spätherzynischen Bruchsystem. Die Subsidenz der Graben nahm ihren Anfang während des Eozäns und wurde von vulkanischer Aktivität begleitet. Vulkanismus begann, der einsetzenden Subsidenz vorausgehend, im späten Paläozän und hatte seine Hauptphase während des Plio- bis Pleistozäns, insbesondere im Massif Central. Das Vulkangebiet des Böhmisches Massivs ist der östlichste Teil der CECV. Der NE-streichende Eger-Graben überprägt das Böhmisches Massiv. Der Grabenentwicklung gingen paläozäne Dike-Intrusionen voraus. Vom Oligozän bis ins Pleistozän wurde die Grabenentwicklung auch hier von vulkanischer Aktivität begleitet, die sich auch auf Gebiete außerhalb des Grabens erstreckte (Ziegler 1990). Die Hauptphasen des Vulkanismus verbunden mit dem känozoischen Riftsystem lagen im Miozän und Pliozän, pleistozäner Vulkanismus trat nur noch vereinzelt in wenigen Gebieten auf.

Die geodynamischen Ursachen des Vulkanismus sind noch immer umstritten. Diskutiert wird, ob der Vulkanismus auf das Vorhandensein eines Mantel Plumes oder auf Magmenbildung als Folge von Druckentlastung durch Extension der Lithosphäre zurückzuführen ist. Der große Teil der Vulkangebiete, die auch die stärkste Aktivität aufweisen, wie z.B. Auvergne und Eifel, liegt nicht innerhalb der Graben selbst, sondern auf den angrenzenden herausgehobenen paläozoischen Massiven. Andere, weniger aktive Vulkangebiete liegen innerhalb oder in unmittelbarer Nachbarschaft

der Riftzonen, die an die Massive angrenzen oder diese schneiden (z.B. Kaiserstuhl, Vogelsberg, Hessische Senke, Eger Rift) (Wilson & Downes 1992; Schmincke 2007).

Wilson & Downes (1992) werten dies als Hinweis darauf, dass das Auftreten des Vulkanismus von den Extensions-Strukturen der Lithosphäre kontrolliert wird. Infolge der Platznahme alpiner Decken kann die Lithosphäre aufgebogen worden sein, welches Dekompression und partielle Aufschmelzung des oberen Mantels verursacht und damit zum Magmatismus führt. Die primitiven Alkali-Magmen der CECV können als Mischung zweier Magmen-Endglieder angesehen werden. Die primären Magmen als erstes Endglied bildeten sich in der Asthenosphäre oder an der Basis der Lithosphäre als Folge von Dekompression durch Extension der Lithosphäre. Der Chemismus der Magmen wird mit dem Aufstieg durch die herzynische Lithosphäre als zweites Endglied verändert, sei es in Form von Mischung partieller Schmelzen aus Asthenosphäre und Lithosphäre, oder in Form komplexer Solid-Fluid-Reaktionen. Die Tatsache, dass die Vulkanfelder des Rheinischen Massivs die größten Mengen hochalkalischer Magmen des CECV gefördert haben, zeigt, dass sie aus Mantelquellen abgeleitet werden können, die durch Fluide aus der devonischen Subduktionszone modifiziert worden sind. Die Präsenz eines Plumes kann nicht widerlegt werden, ist für die Magmenbildung jedoch keine notwendige Voraussetzung (Wilson & Downes 1992; Wilson 1993). Lustrino & Wilson (2007) schlagen ein Modell vor, in der ein gemeinsames Mantelreservoir (CMR: common mantle reservoir) den sublithosphärischen Mantel darstellt, der lokal durch alte wiederaufgearbeitete Kruste kontaminiert ist, die dem Mantel durch Subduktion an alten aktiven Kollisionzonen oder durch Delamination der Lithosphäre zugeführt wurde. Das Alter dieser Kruste ist unbestimmt; es kann Kruste sein, die während der Schließung der Neo-Tethys im Mesozoikum/Känozoikum oder während der Frühphase der herzynischen Orogenese im mittleren bis späten Karbon subduziert wurde. Einen Plume aus dem tiefen Mantel halten die Autoren für ausgeschlossen. Anderson (2005) lehnt die Präsenz eines Plumes unter der Eifel ebenfalls ab und sieht den Intraplattenvulkanismus als Folge flacher, rein plattentektonischer Vorgänge. Ziegler (1992) bezeichnet das känozoische Riftsystem als ein „passives Riftsystem“, da dessen Entwicklung von stressbedingter Extension der Lithosphäre bestimmt ist. Der auftretende Magmatismus zeigt, dass die Schmelzen der unteren Lithosphäre und oberen Asthenosphäre entstammen und schließt den Einfluss eines Plumes aus dem tiefen Mantel aus. Diese Aussage relativiert der Autor jedoch später: Um die Mengen an Schmelzen zu bilden,

muss die Temperatur in der Asthenosphäre angehoben und der Gehalt an Volatilen im lithosphärischen Mantel erhöht sein. Damit kann, basierend auf geochemischen Daten, der Einfluss eines tiefen Mantel-Plumes nicht ausgeschlossen werden (Ziegler 1994). Zumindest für den tertiären Vulkanismus der Eifel sehen Fekiacova et al. (2007a) die Ursache eindeutig in Dekompression durch Extension in Zusammenhang mit der taphrogenetischen Entwicklung des Rheingrabens. Plomerová et al. (2007) konnten unter dem Eger-Graben bis zu einer Tiefe von 250 km mittels Tomographie keine säulenartige Anomalie, die wie unter der Eifel oder dem Massif Central als Mantelplume interpretiert werden könnte, nachweisen. Die entdeckte breitflächige schwache Anomalie unter dem Eger-Graben wird als auffälliger Übergangsbereich von Asthenosphäre zu Lithosphäre interpretiert, der möglicherweise einen Schwächebereich der Lithosphäre an den Rändern von Paläoplaten darstellt.

Dèzes et al. (2004) jedoch sehen die Heraushebung des Rheinischen Schildes wie die des Massif Central eindeutig in Zusammenhang mit thermaler Ausdünnung der Mantel-Lithosphäre durch darunter liegende Mantelplumes. Hoernle et al. (1995) postulieren einen einzigen großmaßstäblichen Plume, der sich, NNE streichend und nach Westen einfallend deckenartig in bis zu 500 km Tiefe unter den vulkanischen Provinzen des Ostatlantik, des westlichen Mittelmeers und Zentraleuropas ausbreitet. Extension der Lithosphäre und Rifting finden demnach an der Schnittstelle des Plumezentrums mit der Lithosphäre statt. Der schwache Vulkanismus in Europa und im Mittelmeergebiet sowie das Riftsystem, das sich immer noch in einem Initialstadium befindet, sind Anzeichen dafür, dass die beobachtete Anomalie eine Erscheinung des oberen Erdmantels ist und der Grenzschicht zwischen oberem und unterem Erdmantel entspringt (Hoernle et al. 1995). Aufgrund der geochemischen Ähnlichkeit der gefördert Magmen mit OIB interpretieren Wedepohl & Baumann (1999) die vulkanischen Perioden des CECV als Impulse eines separaten aufsteigenden stationären ultraschnellen Plumes, dessen Magmenproduktion einen Höhepunkt im Miozän mit dem Ausbruch des Vogelsberges hatte und dessen letzter Impuls den quartären Vulkanismus der Eifel verursachte. Die europäische Lithosphäre bewegte sich gemäß den Autoren durch die Öffnung des Atlantiks in östliche Richtung und versetzte die erloschenen Vulkane von ihren Quellen (Wedepohl & Baumann 1999). Dieser Prozess müsste jedoch an einer Spur von Hot Spot-Vulkanismus erkennbar sein, mit dem ältesten im Osten und dem jüngsten in Westen. Dies passt jedoch nicht zu den Altern der vulkanischen Felder, die einen komplexeren geodynamischen

Zusammenhang andeuten: Fekiacova et al. (2007b) widersprechen der Theorie von Wedepohl & Baumann (1999), da das Gebiet der Eifel zur Zeit des tertiären Vulkanismus vor 40 Millionen Jahren ca. 1000 km südwestlich der heutigen Position lag und somit eine Verbindung der vulkanischen Aktivität dieser Zeit zu einem quartären stationären Mantel-Plume nicht nachvollziehbar ist. Nach Goes et al. (1999) kann zufolge tomographischer Bilder ein Mantle Plume unter Zentraleuropa bis in 2000 km Tiefe verfolgt werden. Dieser Plume aus dem unteren Erdmantel speist kleinere Plumes im oberen Mantel. Die Lage des Riftsystems im alpinen Vorland und der vergleichsweise schwache Vulkanismus werden als Folge der Subduktionsvorgänge unter Südeuropa gewertet. Ritter et al. (2001; 2007) weisen anhand teleseismischer Daten unter der Eifel im Mantel eine Struktur mit im Vergleich zum umgebenden Mantel um 150 bis 200 K erhöhten Temperaturen nach, die in 50 – 60 km Tiefe beginnt und mindestens bis 410 km Tiefe in den Mantel reicht. Im Bereich von 50 – 60 und 90 - 100 km Tiefe werden 1% partielle Schmelze vermutet. Die partielle Schmelze steigt auf und wird an der Mantel-Krusten-Grenze („Moho“) gestoppt. Dieses Underplating kann im Rheinischen Massiv nachgewiesen werden. Magma-Ladungen können sich davon ablösen und in die Kruste vordringen, in der sie Magmenkammern bilden und schließlich an der Oberfläche austreten. Entsprechend den Autoren sind solche tiefen Mantel-Plumes zahlreicher als bisher angenommen und äußern sich oft nur durch geringfügigen oder gar keinen Vulkanismus. Unter dem Massif Central wird von Granet et al. (1995) und später von Sobolev et al. (1997) durch teleseismische Tomographie ebenfalls ein Plume mit mindestens 200 km Durchmesser und einer Temperaturdifferenz von 200 K nachgewiesen. Sie deuten ihre Ergebnisse dahingehend, dass dieser Plume, wie auch der unter der Eifel und unter dem Böhmisches Massiv, dem Modell von Hoernle et al. (1995) folgend von einer thermal und geochemisch anomalen Schicht in 200 - 250 km Tiefe gespeist wird. Diese Schicht interpretieren die Autoren als Kopf eines Plumes aus 400 km Tiefe. Barth et al. (2007) modellieren für den Massif Central-Plume einen Durchmesser von 100 – 120 km und eine Tiefe von 35 bis 330 km. Der Massif Central Plume liegt unter dem südlichen Teil des Limagne-Grabens und weiter im Süden unter den Vulkangebieten des Cantal, Mont Dore und Devès. Die Autoren ziehen in Erwägung, dass die Quelle des Massif Central Plumes, ähnlich dem Eifel-Plume, in der Mantel-Übergangszone liegt. Im Falle des Vogelsbergs sehen Jung & Masberg (1998) und Bogaard & Wörner (2003) die frühen Phasen des Vulkanismus als Folge von Aufheizung und Schmelzentwicklung in der Lithosphäre durch einen darunter

liegenden Plume. Die weitere Schmelzentwicklung und Erosion durch den Plume verdünnte die Lithosphäre und ließ den Plume aufsteigen, was zu Schmelzen als Folge von Dekompression führte. Weitere Magmenbildung wurde durch Extensionsbewegungen gesteuert, und die Magmen stammen hauptsächlich vom Plume selbst. Nach Haase et al. (2004) lässt die Tatsache, dass weder das Vulkangebiet des Vogelsbergs noch das der Hessischen Senke domartigen Hebungsprozessen unterworfen ist, auf durchschnittliche Temperaturen im dortigen Mantel schließen. Die Magmen bildeten sich durch adiabatische Dekompression eines angereicherten „thermal boundary layers“ an der Basis der Lithosphäre als Folge von lithosphärischer Extension und Ausdünnung. Das große Magmenvolumen des Vogelsbergs beruht auf verstärkter Schmelzbildung in geringeren Tiefen unter der ausgedünnten Lithosphäre. Die Magmenbildung des Westerwalds im Tertiär hingegen beruht auf einem Mantelplume mit um ca. 100°C erhöhter Temperatur, entsprechend der Anomalie, die unter der Eifel beobachtet wird. Die Autoren gehen daher von einem pulsierenden Mantelplume unter dem Rheinischen Schild aus.

Einen anderen Ansatz für Eifel und Massif Central verfolgen Nowell et al. (2006). Die Episoden des quartären Vulkanismus in Frankreich und Deutschland sehen sie in Zusammenhang mit der Klimaentwicklung der letzten zwei Millionen Jahre. Verstärkter Vulkanismus ist demnach deutlich mit den Warmphasen am Ende der Weichsel- und frühen Elster-Eiszeit korreliert. Die Autoren vermuten, dass es mit dem Wachsen und Abschmelzen der nahen Eismassen zu Veränderungen in der Massenverteilung des Kontinents und zu Verbiegung der Lithosphäre kam. Der Vulkanismus wurde durch die schnelle Anpassung der Lithosphäre an die Massenverhältnisse gesteuert.

2.4.2 Regionalgeologie der Vulkaneifel

Das Gebiet der Vulkaneifel lässt sich in drei Vulkanfelder unterteilen: zum einen in das tertiäre Vulkanfeld der Hocheifel, zum anderen in die beiden quartären Vulkanfelder der Ost- und Westeifel. Die Osteifel wird im Nordosten und Osten durch den Rhein und das eingebrochene Neuwieder Becken begrenzt, die südliche Grenze bildet die Mosel. Das Vulkangebiet erstreckt sich über 35 km in ungefähre NW-SE Richtung. Lateral dehnt es sich über 10 – 20 km aus und umfasst eine Fläche von ca. 400 km². Das Vulkangebiet der Westeifel bedeckt eine Fläche von ungefähr 600 km², zieht sich über ca. 50 km in NW-SE Richtung von Ormont im Norden bis Bad Bertrich nahe der Mosel im Süden und grenzt im Südwesten an den Rand der Trierer Bucht. Die laterale Ausdehnung der Westeifel beträgt nicht mehr als 20 km. Das Gebiet des tertiären Vulkanismus in der Hocheifel liegt zwischen den beiden quartären Vulkanfeldern der Ost- und Westeifel, randliche Ausläufer reichen bis in die Westeifel.

Die Vulkaneifel liegt auf dem westlichen Rheinischen Massiv, einem lithosphärischen Block, der Teil des Rhenohertzynischen Falten- und Überschiebungsgürtels des Variszischen Orogens ist (Abb. 15). Den Untergrund der Vulkanfelder bilden die unterdevonischen Schiefer, Grauwacken und Sandsteine der Siegener (Siegener Normal- und Hunsrückschiefer Fazies) und der Ems-Schichten. Mittel- und z.T. oberdevonische Kalksteine finden sich in den Eifeler Kalkmulden (LfGB Rheinland-Pfalz 2005). Nach der variszischen Faltung stieg das Gebiet in einzelnen Schollen auf, im Rotliegend setzte starke Abtragung ein (Meyer 1986). Zur Zeit des Unteren Buntsandsteins war die Eifel ein Hochgebiet, erst im Mittleren und Oberen Buntsandstein setzten wieder Ablagerungen hauptsächlich fluviatiler Sedimente in der Eifeler Nord-Süd-Zone ein, die sich zu dieser Zeit als N-S-gerichtetes Senkungsgebiet herausbildete. In großem Umfang sind die Gesteine des Buntsandsteins lediglich noch im Bettinger Graben im Bereich der Westeifel (Raum Hillesheim – Steffeln – Gerolstein), in dem sich Eifeler Nord-Süd-Zone und Gebirgsstreichen kreuzen, erhalten. Zu Beginn des Muschelkalkes kam es zu einem Meeresvorstoß von SE, die Eifeler Nord-Süd-Zone war weiterhin eingesenkt und es kam wiederum zur Sedimentation. Im Gebiet der Vulkaneifel finden sich nur im Bettinger Graben noch Ablagerungen des Unteren Muschelkalkes in sandig-dolomitischer Fazies (Meyer 1986).

Gesteine des Jura liegen im Eifeler Vulkangebiet nicht vor. Sedimentäre Ablagerungen der Kreide fehlen in Rheinland-Pfalz, da die gesamte Region vermutlich flächenhafter Erosion ausgesetzt war, jedoch ist bereits für die Kreidezeit im Raum Wittlich vulkanische Aktivität nachgewiesen (Neuerburger Kopf und LUXEMBERG). Im Tertiär kommt es unter feuchtwarmem Klima zu tiefgründiger Verwitterung und zu Ablagerungen von Tonen, Sanden und Terrassenschottern (LfGB Rheinland-Pfalz 2005; Meyer 1986). Im Eozän setzt der Vulkanismus der Hocheifel ein. Die Vulkanvorkommen nehmen eine Fläche von ~ 1000 km² ein und förderten hauptsächlich primitive Alkali-Basalte und nur in geringem Maße differenzierte Lava. ⁴⁰Ar/³⁹Ar-Datierungen lassen auf zwei vulkanische Perioden, von ca. 44 bis 39 Ma und von 37 bis 35 Ma schließen (Fekiacova et al. 2007b). Seit dem frühen Tertiär, d.h. seit ca. 50 Ma, ist das Gebiet immer wieder Hebungen unterworfen, begleitet von der Absenkung des Neuwieder Beckens um etwa 350 m beginnend im Eozän mit dem Höhepunkt im Oligozän / Miozän. Die Heraushebung des Rheinischen Massivs betrug während des Pliozäns geschätzte 1,7 cm ka⁻¹, beschleunigte sich aber während des Pleistozäns auf bis zu 7 cm ka⁻¹ und hält bis heute an (Meyer & Stets 2007). Die quartären Vulkanfelder der Ost- und Westeifel bildeten sich etwa zeitgleich mit der Hauptphase der quartären Heraushebung. Beide Vulkanfelder zeigen, wie oben beschrieben, eine deutliche NW-SE-Ausrichtung, die in der Westeifel noch etwas deutlicher zu Tage tritt als in der Osteifel. Die NW-SE-Ausrichtung der lithosphärischen Schwächezonen, denen das Magma beim Aufstieg folgt, beruht wahrscheinlich auf der Reaktivierung von paläozoischen strukturellen Diskontinuitäten, die durch das rezente lithosphärische Stressfeld reaktiviert wurden, da paläozoisches wie rezentes Stressfeld die gleiche Orientierung haben (Schmincke et al. 1983).

2.4.3 Die quartären Vulkanfelder der Eifel

Das quartäre Vulkanfeld der Eifel ist ein typisches Intraplatten-Vulkanfeld, dominiert von Maaren und Schlackenkegeln. Ost- und Westeifel unterscheiden sich jedoch deutlich in der Anzahl der Eruptionszentren und im Verhältnis von intermediären und hochdifferenzierten Laven. Die Westeifel ist größer als die Osteifel bezüglich Länge, Ausdehnung und Anzahl der Eruptionszentren, aber allein die Magmenmenge, die der Laacher See-Vulkan in der Osteifel förderte, übertrifft dreifach das gesamte Volumen der eruptierten Westeifel-Magmen. Innerhalb beider Vulkanfelder nimmt charakteristischerweise die Anzahl der Vulkane zum Zentrum der Felder hin zu. Ebenso nimmt der Grad der Differenzierung zum Zentrum der Vulkanfelder hin zu (Büchel et al. 1986).

2.4.3.1 Westeifeler Vulkanfeld

Die Erkenntnisse über Aufbau und Geochemie des Vulkangebiets der Westeifel stützen sich bis heute ausschließlich auf die vulkanologischen und petrologischen Untersuchungen von Mertes (1983) in seiner Arbeit „Aufbau und Genese des Westeifeler Vulkanfelds“. Das Vulkanfeld umfasst ca. 240 Eruptionszentren, hauptsächlich Schlackenkegel, von denen die Hälfte Lavaströme hervorgebracht hat, Maare und vereinzelt Tuffringe, Schlackenringe und Tuffschlote (Büchel & Mertes 1982). Die meisten Vulkanbauten liegen im Bereich Hillesheim, Gerolstein und Daun. Die Westeifel-Magmen sind fast ausschließlich mafische, stark unterkieselte Alkali-basalte mit Mg-Zahlen > 67 . Dabei handelt es sich hauptsächlich um Foidite (Leuzitite, Nephelinite und Melilith-Nephelinite), Basanite und vereinzelt Olivin-Nephelinite (Büchel et al. 1986). Mertes & Schmincke (1985) und Schmincke (2007) unterscheiden auf petrographischer Basis eine Foidit- und eine Olivin-Nephelinit-Basanit-Gruppe („F-“ bzw. „ONB-suite“): in der „F-suite“, die den größten Anteil der Westeifel-Magmen ausmacht, dominiert Klinopyroxen (Ti-Augit), begleitet von Olivin und untergeordnetem Phlogopit. In der „ONB-suite“, die gemäß den Autoren jüngeren Alters als die „F-suite“ ist, ist Olivin gegenüber Klinopyroxen vorherrschend. Letztere Gruppe tritt hauptsächlich im Südosten des Vulkanfeldes auf. Höher differenzierte Magmen (Tephrite und Phonolithe) wurden nur an drei Stellen im Zentrum

des Vulkanfeldes beobachtet. Mertes & Schmincke (1985) stellen fest, dass sich die primären Magmen der „F-“ und „ONB-suite“ in einem Fluid- und LILE-angereichertem Granat-Lilherzololith bildeten, wobei die Mantelquelle der „F-suite“ stärker angereichert an Alkalien und inkompatiblen Elementen war als die der „ONB-suite“. Die primären Magmen der „F-suite“, reich an K, F, Rb und Ba, entstanden wahrscheinlich in einem Mantel folgender Mineralogie: ol + opx + cpx + gt + phl + il + dol mit Phlogopit als Träger der LIL-Elemente. Die Magmen bildeten sich unter einem hohem Verhältnis von $\text{CO}_2 / (\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ in einer Tiefe von ca. 90 – 100 km. Die Magmenquelle der „ONB-suite“ bestand aus ol + opx + cpx + amph + gt, mit akzessorischen Amphibolmineralen als Träger von Sr und V, die die niedrigeren Rb- und höheren Sr-Konzentrationen der ONB-Magmen verursachen. Der Gehalt an CO_2 und H_2O in der ONB-Quelle ist niedriger als in der F-Quelle. Die Magmenquelle lag in 60 bis 75 km Tiefe (Mertes & Schmincke 1985).

Die Vulkanische Aktivität der Westeifel begann nach $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Datierungen vor 0,6 Ma (Fuhrmann & Lippolt 1987). Die jüngste Eruption ist die des Ulmener Maars vor ca. 11 000 Jahren (Zolitschka et al. 1995).

2.4.3.2 Osteifeler Vulkanfeld

Das Vulkangebiet der Osteifel baut sich aus ungefähr 100 Eruptionszentren auf, meist aus Schlackenkegeln, seltener aus Maaren, Tephrringen und Lavaströmen. Es können 4 größere phonolithische Vulkankomplexe lokalisiert werden: Kempenich, Rieden, Wehr und Laacher See (Schmincke et al. 1983; Schmincke 2007). Zwei Gruppen alkalischer Magmen lassen sich auf geochemischer, räumlicher und zeitlicher Basis unterscheiden: im Nordwesten Nephelinite, Leuzitite und deren Differentiate, die vor ca. 400 ka gefördert wurden und im Südosten Basanite, Tephrite und deren Differentiate, eruptiert zwischen 400 ka und 10 ka (Lippolt et al. 1990). Schmincke (2007) spricht in diesem Fall von einem westlichen „Rieden-Subfield“ aus Leuzit-Phonolithen, Leuzititen und Nepheliniten und einem östlichen / südöstlichen „Laacher See-Volcano-subfield“ aus Basaniten, Tephriten, Trachyten und Phonolithen. Er teilt die Osteifel-Magmen in eine Foidit- und eine Basanit-Gruppe ein. Meyer (1986) differenziert anhand der Art der Vulkantätigkeit und der geförderten Produkte drei vulkanische Phasen in der Osteifel:

1. die älteste „selbergitische“ Phase, in der neben basaltischen vor allem phonolithische/selbergitische Tuffe und Laven gefördert wurden (Raum Kempenich, Engeln, Rieden, Bell),
2. die Phase der längsten Förderperiode, in der Basaltvulkane mit Tuffdecken, Schlackenkegeln und Lavaströme entstehen,
3. die jüngste, relativ kurze Phase, in der phonolithische und trachytische Tuffe oder Aschen gefördert wurden, die in Osten des Vulkangebiets weit verbreitet sind, und die ihren abschließenden Höhepunkt in der Eruption des Laacher See-Vulkans fand.

Schmincke (2007) grenzt hingegen vier Eruptionsperioden voneinander ab:

1. den ältesten Bereich um Kempenich im Nordwesten mit nephelinitischen mafischen Vulkanen und einigen Leuzit-Phonolithen,
2. den zweitältesten Bereich des Riedener Vulkankomplexes mit Leuzit-Phonolith-Ignimbriten und Tephraablagerungen in der Riedener Caldera und mafischen bis intermediären leuzititischen Schlackenkegeln und Lavaströmen in der Umgebung der Caldera,
3. das südöstliche und östliche Gebiet, das von basanitischen bis tephritischen Vulkanen dominiert wird einschließlich des höherdifferenzierten phonolithischen bis untergeordnet trachytischen Komplex des Wehrer Kessels,
4. der spätquartäre phonolithische Laacher See-Vulkan als jüngstes vulkanisches Zentrum der Osteifel, dessen eruptiertes Magmavolumen ($> 6,3 \text{ km}^3$) das gesamte eruptierte Volumen aller mafischen Vulkane in Ost- und Westeifel übertrifft.

Der Vulkanismus begann demnach im westlichen Teil der Osteifel mit der Eruption alkalireicher Phonolithe und untergeordnet leuzititischer bis nephelinitischer Laven, wanderte ostwärts, wobei hauptsächlich basanitische und tephritische Laven eruptiert wurden, und endete mit der enormen plinianischen Eruption des Laacher See-Vulkans vor 12 916 Jahren (Baales et al. 2002; Duda & Schmincke 1978). Die Basanite und Foidite stellen die primitiven Magmentypen dar, während die Tephrite und Phonolithe Differentiationsprodukte der Basanite sind (Duda & Schmincke 1978; Schmincke et al. 1983). Die Basanit- und Nephelinitmagmen entstanden nach Fraktionierungsberechnungen von Duda & Schmincke (1978) bei niedrigen Schmelzgraden aus einem Phlogopit-reichen Mantel unter geringem H_2O - und mittlerem bis hohem CO_2 -Gehalt zwischen 20 und 30 kbar (65 – 95 km) im Erdmantel. Vermutlich

fand vor der Eruption Zwischenspeicherung der Magmen und partielle Kristallisation an der Grenze von Mantel zu Kruste in mittleren Druckbereichen bei ca. 30 km Tiefe kann statt (Schmincke 1977; Duda & Schmincke 1978).

Die meiste vulkanische Aktivität ereignete sich während des mittleren und späten Quartärs. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Datierungen von Fuhrmann & Lippolt (1985; 1986) aus dem ältesten „selbergitischen“ westlichen Bereich der Osteifel ergaben ein maximales Alter der Vulkanite von 500 ka.

3. Provenienzanalyse

3.1 Vorgehensweise

Grundlage für verlässliche Provenienzbestimmungen von Mühlsteinen vermuteter Eifeler Herkunft ist die eindeutige Charakterisierung der als Rohstoffe genutzten Ausgangsgesteine in der Region, wobei die geologischen Unterschiede innerhalb der vulkanischen Eifel berücksichtigt werden müssen. Dazu müssen die einzelnen Abbaustellen Merkmale besitzen, die sie von den anderen Abbaustellen unterscheiden. Diese Arbeit konzentriert sich also im ersten Schritt, vor der eigentlichen Provenienzanalyse der Fundstücke, auf das in Frage kommende Rohmaterial, d.h. auf die geologischen Geländeproben aus den einzelnen römischen Steinbrüchen in der Eifel. Eine geochemische Datenbank über die Abbaustellen soll etabliert und Möglichkeiten gefunden werden, die individuellen Steinbrüche voneinander zu differenzieren. Dazu werden zunächst die mineralogischen Verfahren ermittelt, die in der Lage sind, Unterschiede in der mineralogisch-geochemischen Zusammensetzung zwischen den einzelnen Steinbrüchen festzustellen.

Zur Untersuchung der einzelnen Merkmale werden verschiedene Techniken herangezogen. In der **petrographischen Analyse** der Dünnschliffe mittels **Polarisationsmikroskopie** wird überprüft, ob auf Basis von Mineralbestand und Gefügemerkmalen der Geländeproben eine erste Unterscheidung der Abbaustellen oder eine Einteilung in petrographische Gruppen möglich ist. Die Gefügemerkmale werden bestimmt durch die Struktur (Größenverhältnisse und Formen der Minerale) und durch die Textur des Gesteins (räumliche Anordnung der Komponenten). In dem typischerweise porphyrischen Gefüge ist die Matrix jedoch oft derartig feinkörnig, dass die einzelnen Komponenten mikroskopisch nicht erfasst werden können. Um den gesamten **Phasenbestand** der Proben, einschließlich dem der feinkörnigen Matrix, identifizieren zu können, wird die **Röntgendiffraktometrie**, kurz XRD (X-ray diffractometry) angewendet. Nach den petrographischen Analysen und den Analysen des Mineralbestandes der Proben erfolgt die Analyse der Gesamtgesteinschemie. Zur Ermittlung der **Haupt- und Spurenelemente** kommt die **Röntgenfluoreszenzanalyse** zum Einsatz. **Spurenelement- und Seltene Erden**-Bestimmungen mit **LA-ICP-MS** (Laser ablation with inductively coupled plasma mass spectrometry) können

weitere Merkmale zur Charakterisierung liefern. Ob sich die Geländepollen anhand der so gewonnenen Daten ausreichend charakterisieren lassen, wird anhand von **Cluster- und Diskriminanzanalysen** festgestellt (Grundlagen dazu z.B. nach Backhaus et al. 2008 oder Eckey et al. 2002). Die Berechnungen erfolgen im Programmsystem SPSS 16.0. Durch die statistische Auswertung soll die Anzahl der Proben bestimmt werden, die durch die vorangegangenen Analysen nicht eindeutig voneinander separiert werden konnten und einer weiteren Charakterisierung durch die Bestimmung der **Pb-Sr-Nd-Isotopie** mit **TIMS** (Thermal ionization mass spectrometry) bedürfen.

Die Auswahl der Abbaustellen, die in die Analyse einbezogen werden, richtet sich danach, ob es nach Hörter (1994) und Mangartz (2008) Spuren oder zumindest Indizien für Abbautätigkeit zu römischer Zeit gibt. Die in Frage kommenden Steinbrüche sind unter 2.2.2 aufgeführt.

Wichtig neben der Charakterisierung der Eifeler Abbaustellen ist die Abgrenzung der Eifeler Vorkommen von makroskopisch nicht zu unterscheidenden grauen, vesikulären Laven anderer europäischer Regionen, in denen Material für Mühlsteine abgebaut wurde, wie z.B. den Laven des Massif Central (Auvergne) und insbesondere denen der Chaîne des Puys. Die konkreten römischen Abbaustellen des Massif Central sind heute unbekannt und von anderen römischen Abbaustellen in Europa liegen kaum chemische Daten vor, daher werden Literaturwerte von Laven dieser Regionen zum Vergleich mit den Eifeler Laven herangezogen.

Die Charakterisierung der Steinbrüche sowie ihre erfolgreiche Abgrenzung zueinander ist die Basis für die Beantwortung weiterführender, wirtschaftsarchäologischer Fragestellungen. Hierzu werden Mühlsteine ausgewählter Fundorte innerhalb und außerhalb des Römischen Reichs beprobt und mit den im ersten Schritt ermittelten geeigneten mineralogischen Methoden analysiert. Ziel ist, ihren jeweiligen Produktionsort zu bestimmen, um so Aussagen zu den Mühlsteinbrüchen der Eifel und den Exportraum tätigen zu können. Da im Rahmen dieser Forschungsarbeit nur eine begrenzte Anzahl von Fundstücken beprobt werden kann, muss eine Auswahl an Mühlen getroffen werden. Zunächst muss eine Probe überhaupt „erreichbar“ sein, d.h. die Voraussetzung zur Probennahme an einer Mühle ist, dass eine Beprobung von den Verantwortlichen erlaubt wird, dass die Mühle im notwendigen Maße bewegt

werden kann und dass sie bei der Probennahme keinen Schaden nimmt. Ein Mühlstein wird stets nur dann beprobt, wenn er aus grauer, vesikulärer Lava besteht und eine Eifeler Herkunft durch makroskopische Beurteilung nicht ausgeschlossen werden kann (mit der pompejanischen Mühle aus Carnuntum als einzige Ausnahme, s.u.).

Das übergeordnete Kriterium, um bestimmte Mühlsteine in die Untersuchungen einzubeziehen, ist der geografische Faktor, d.h. es werden Stücke aus möglichst vielen Bereichen des römischen Reiches analysiert, auch aus dem freien Germanien. Durch ihre Analyse soll zum einen die teilweise lediglich auf makroskopischen Analysen beruhende Produktionsortangabe aus der Literatur (z.B. Zirkl 1963 oder Waldhauser 1981), überprüft werden, zum anderen ist es bei einem positiven Befund gleichzeitig möglich, den maximalen Absatzraum der Eifeler Steinbrüche einzugrenzen, da diese Mühlen in besonders weit entfernten Regionen gefunden wurden. Ein Schwerpunkt bei der Fragestellung zur geografischen Verteilung ist ein möglicher Überschneidungsbereich mit dem Exportraum der Steinbrüche des Massif Central. Somit kann eine Bewertung des Eifeler Absatzraums in Innergallien erfolgen, und gleichzeitig wird nachvollziehbar, inwieweit sich Steinbruchregionen mit großen Exporträumen gegenseitig beeinflussen.

Die Analysen von Mühlsteinen aus dem frühmittelalterlichen Gräberfeld von Preny und dem hochmittelalterlichen Erftstadt sollen zeigen, dass die geografischen Fragestellungen nach Handelsräumen oder Handelswegen auch auf das frühe und hohe Mittelalter ausweitbar sind.

Eine Gruppe von Fundstücken weicht von dieser Fragestellung ab, da hier die Datierung wichtiger ist als die geografische Verbreitung. In dieser Gruppe wird der Schwerpunkt auf Mühlen gelegt, die aus besonders früh datierten römischen Befundkomplexen stammen und damit den Umbruch von Latène- zur Römerzeit charakterisieren. Mit ihrer Hilfe kann der Beginn des römischen Abbaus in den Eifeler Steinbrüchen näher eingegrenzt und gleichzeitig die Umbruchphase von vorrömischer zu römischer Produktion genauer charakterisiert werden. Zwei Gründe waren dafür ausschlaggebend: Zum einen liegen aus der Region des Lippekorridors gut datierbare Mühlen vor (z.B. Haltern, Oberaden), zum anderen sollte diese Übergangsphase vor allem aufgrund der von Mangartz (2008) postulierten starken Produktionssteigerung

der Römischen Kaiserzeit in den Brüchen der Region um Mayen durch Analyse von Exportstücken überprüft werden.

3.2 Probennahme

3.2.1 Steinbrüche

Die von Hörter (1994) als sicher bzw. vermutlich römisch bezeichneten Steinbrüche wurden vor der Probennahme einer ausführlichen Geländebegehung unterworfen, um die Ausmaße der Abbaustelle und makroskopisch erkennbare Heterogenitäten in der Textur der Lava (wie z.B. unterschiedliche Blasenanteile) festzustellen. Den Abbaustellen wurden daraufhin, so weit möglich, großflächig Proben entnommen, um potenzielle chemische Unterschiede in der Lava zu erfassen. Abhängig von dessen Ausdehnung wurden pro Steinbruch mindestens 10 möglichst unverwitterte Proben gesammelt. Die Probennahme beschränkte sich oft nicht nur auf die Stellen mit klar römischen Abbauspuren, sondern wurde auch auf Bereiche jüngeren Abbaus ausgedehnt, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass ältere Spuren von jüngeren überprägt wurden. Insgesamt wurden aus den Steinbrüchen 198 Proben genommen:

- Obwohl alle drei Lavaströme dem *Bellerberg* entstammen, werden die dortigen Steinbrüche des **Mayener Grubenfelds** (n = 13), der **Ettringer Lay** (n = 14) und des **Kottenheimer Winfelds** (n = 13) getrennt behandelt. Die Probennahme orientiert sich an den Spuren römischer Abbautätigkeit nach Mangartz (2008).
- im Falle des **Niedermendiger Lavastroms** stammen zehn Proben aus den alten, heute nicht mehr betriebenen Steinbrüchen unter Tage, vier aus modernem Tiefbruch.
- Ausnahmen in der Anzahl der Proben stellen die Steinbrüche des **Hochsimmer** (n = 9) und des **Herchenbergs** (n = 3) dar, denn eine umfassende Probennahme wurde durch den aktuellen laufenden Betrieb eingeschränkt. Im Falle des *Hochsimmers* konnten die Proben immerhin über die gesamte Länge des Lavastroms genommen werden. Der *Herchenberg* ist heute weitgehend abgebaut; im Steinbruch konnten nur Proben von demjenigen Lavagang genommen werden, der laut Angabe des Betreibers im Gipfelbereich abgebaut worden war.
- Über den gesamten oberen Lavastrom der **Hohen Buche** wurden 12 Proben, über die gesamte Front der **Mauerley** wurden 11 Proben genommen.

- Im Bereich des Ringwalles der **Dietzenley** variiert der geschätzte Anteil der Blasen in der Lava zwischen 0 und 30 %. Es wurden 12 Proben genommen. Nach der Vulkanologischen Karte von Büchel (1994) liegen kleine Lavavorkommen nordwestlich der *Dietzenley* am *Krekelsberg* in der Nähe des *Davitskreuz* und nordöstlich der *Dietzenley* in der Nähe des Jagdhauses Flemmingshöhe. Auch an diesen beiden Vorkommen sind Spuren von Abbautätigkeit erkennbar (Rohling am Davitskreuz und Pingen und Schutt an der Flemmingshöhe), die Hörter (1994) als Mühlsteinbrüche identifiziert, ohne diese zeitlich differenzieren zu können (Anhang A, Abb. A21-A23). Zusätzlich zum Ringwall wurden im Bereich des Davitskreuzes drei, beim Jagdhaus vier Proben genommen.
- Im südlichen Bereich des **Roßbüsch**, in dem sich die Pingen und der kleine Steinbruch befinden, wurden neun, im nordöstlichen Bereich drei und im nordwestlichen Bereich vier Proben genommen.
- Auf dem **Rother Kopf** wurden der Lava oberhalb der Mühlsteinhöhlen zehn Proben entnommen.
- Obwohl eine vergleichsweise kleine Abbaustelle, wurden aus den flachen Steinbrüchen des **Eichholz** aufgrund der makroskopisch sichtbaren Unterschiede der Lava in ihrem Blasenanteil 13 Proben genommen.
- Auch die Abbaustelle am Hang des **Römerbergs** ist sehr klein. Die Blasenverteilung ist homogen, oft finden sich aber große Olivin- und Klinopyroxen-Xenokristalle. Um diesen Einfluss zu erfassen, wurden 12 Proben genommen.
- Die einzelnen Aufschlüsse der Lava auf und am **Mosenberg** haben eine sehr geringe räumliche Ausdehnung. Auf dem *Mosenberg* wurden zwei Proben von der Lava in Gipfelnähe des Nordkraters genommen, eine Probe von den Lavasäulen am Weg am Westhang, sechs Proben südlich der Grube im Bereich des Horngrabens und drei Proben im weiteren Verlauf des Horngrabens.
- Aus dem Blockfeld am Hang im nördlichen Teil des **Mühlenbergs** wurden 10 Proben genommen. Um zu überprüfen, ob sich der Chemismus der Lava über die NW-SE-Erstreckung des *Mühlenbergs* verändert, wurden aus dem modernen, heute aufgelassenen Steinbruch im Süden weitere vier Proben genommen, zumal der moderne Bruch jede ältere Abbauspur, soweit vorhanden, zerstört hat.
- Vom **Goosberg** zieht sich ein kleiner Bereich der Lava nach Süden in Richtung Kleine Kyll. Entlang dieses Stroms wurden 13 Proben genommen.

Das Probenmaterial aus dem Gelände wird gereinigt, in einer hydraulischen Presse von Verwitterungskrusten befreit und im Backenbrecher zerkleinert. Pro Abbaustelle werden vier Dünnschliffe angefertigt. Der Rest des Probenmaterials wird für die geochemisch-mineralogischen Analysen in einer Achatmhle zu Pulver verarbeitet.

3.2.2 Mühlsteine

Um möglichst unverwittertes Probenmaterial zu bekommen, werden die Mühlsteine mittels eines Diamanthohlbohrers auf einer Handbohrmaschine unter permanenter Wasserspülung beprobt (Abb. 16a-c). Dadurch wird dem Fundstück ein Bohrkern von 25 mm Durchmesser und 30 – 40 mm Länge entnommen. Der Bohrkern wird entsprechend den Steinbruchproben aufbereitet.

Das Fundstück wird nach der Probennahme restauriert. Dazu wird vor Beginn der Bohrung von der anzubohrenden Stelle mit Dentsilikon (Panasil® X-light initial contact) ein Abdruck der Gesteinsoberfläche angefertigt. Nach der Bohrung wird der Mühlstein getrocknet. Kunstharz (AKEMI® Marmorkitt 1000 universal / juragelb) wird mit Gesteinspulver und Eisenoxid so gefärbt, dass es die Farbe des Fundstücks annimmt. Das gefrkte Kunstharz wird mit einer Hrterpaste vermischt und mit einem Spatel in das Bohrloch gegeben. Dann wird über dem Bohrloch der Silikonabdruck fixiert und das Fundstück umgedreht, so dass sich das noch flüssige Kunstharz innerhalb des Bohrlochs auf dem Silikon verteilt. Dort härtet es aus und formt die ehemalige Gesteinsoberfläche nach. Nach dem Aushärten wird die Silikon-Manschette entfernt. Damit ist das Bohrloch verschlossen und als solches kaum mehr zu erkennen (Abb. 17a und b).



a



b



Abb. 16: Probennahme an den Mühlsteinen. Vorige Seite a: Bohrung mit Wasserspülung, b: Herausbrechen des Bohrkerns. Diese Seite c: Bohrkern und Bohrloch.

c



a



b

Abb. 17: Restaurierung des Fragments der pompejanischen Mühle in Haltern; a: Silikonabdruck vor der Bohrung, b: das Fundstück nach der Restaurierung.

3.3 Analytische Methoden

Polarisationsmikroskopie, Röntgendiffraktometrie, Röntgenfluoreszenzanalyse und Laser-ICP-MS werden am Institut für Geowissenschaften der Johannes Gutenberg Universität Mainz durchgeführt, Isotopenbestimmungen in den Isotopen-Geochemie- und Geochronologie-Labors des GeoForschungsZentrum in Potsdam.

Röntgendiffraktometrie (XRD): Der Phasenbestand der pulverisierten Probe wird mittels eines Diffraktometers des Typs Seifert XRD 3000 TT mit Cu-Anode, einer Beschleunigungsspannung von 40 kV und einem Kathodenstrom von 30 mA bestimmt. Die Probe wird zwischen 5° und 75° 2θ in einer Schrittweite von $0,03^\circ$ abgefahren.

Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA): Die Bestimmung der Hauptelemente erfolgt an einer Schmelztablette in 14-facher Verdünnung aus 0,4 g pulverisiertem Probenmaterial mit 5,2 g Spektromelt® A 10 ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$), die Spurenelemente werden an gepressten Pulvertabletten aus 6 g Probenmaterial bestimmt. Die Analysen werden routinemäßig durchgeführt an einem Philips MagXPRO Röntgenspektrometer (Baujahr 2002) mit Rh-Röntgenröhre und einer maximalen Anregung von 3,2 kW für Haupt- und 3,6 kW für Spurenelemente.

Laser-Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (LA-ICP-MS): Spurenelemente und Seltene Erden werden *in situ* gemessen. Beim ICP-MS handelt es sich um ein Agilent 7500 CE quadrupol ICP-MS, gekoppelt mit dem Laser-Ablationssystem ESI New Wave Research Up 213 (Nd:YAG-Laser) mit einer Wellenlänge von 213 nm. Für die Messungen wird nach der Methode von Nehring et al. (2008) ca. 40 mg pulverisiertes Probenmaterial auf einem Iridium-Strip-Heater unter Ar-Atmosphäre zu Glaspfropfen geschmolzen (10 s bei 1200°C) und auf einem Objektträger fixiert. Auf jedem Glaspfropfen werden drei Punkte gemessen, mit einer Laser-Pulsrate von 10 Hz, einer Energiedichte von 3 J/cm^2 und einem Lochdurchmesser von $100\ \mu\text{m}$. Trägergas ist Argon. Als interner Standard dient ^{43}Ca , dessen Ca-Konzentrationen mit RFA gemessen wurden, als externer Standard das Referenzmaterial NIST SRM 612 mit den Werten von Jochum & Nehring (2006), zur Qualitätskontrolle wird USGS-BCR-2G herangezogen. Die Datenreduktion erfolgte

über die kommerzielle Software GLITTER 4.0 (Macquarie University, Sydney, Australia). Zu Nachweisgrenzen und Messfehlern siehe Jacob (2006).

Thermo-Ionen-Massenspektrometrie (TIMS): Das Probenpulver wurde fünf Tage lang in konzentrierter (52%) HF auf einer heißen Kochplatte aufgelöst. Die aufgeschlossene Probe wurde eingetrocknet, mit 6N HCl aufgenommen, zentrifugiert und aufgeteilt, in einen Teil zur Trennung von Pb, in einen zweiten Teil zur Trennung von Sr und Nd. Pb, Sr und Nd wurden in standardisierten Ionenaustauschverfahren voneinander getrennt.

- **Strontium:** Sr wird über das Kationenaustauscherharz Bio Rad AG50 W X 8 (100 – 200 mesh) mittels 2,5 N HCl abgetrennt. Sr wird auf ein einfaches Ta-Filament geladen. Die isotopische Zusammensetzung wird in einem Thermo Scientific Triton Multikollektor Massenspektrometer mit double-jump dynamic multicollection bestimmt. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte werden mit $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0,1194$ normalisiert. Wiederholte Messung des Sr-Standards NBS 987 während des Messverlaufs ergab für $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ $0,710248 \pm 0,000008$ (2σ , $n = 20$ Analysen). Der analytische Fehler der Einzelmessung von $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ wird in $2\sigma_m$ angegeben. Blindwerte betragen weniger als 100 pg Sr (Romer et al. 2001; 2005).
- **Neodym:** Nach Eluierung des Sr wird Ba mit 2,5N HCl ausgetragen. Dann werden die Seltenen Erden aus derselben Säule abgetrennt, indem das Harz mit 6N HCl gespült wird. Die Separierung des Nd von den anderen Seltenen Erden erfolgt durch Kationenaustausch-Extraktion in einer chromatographischen Säule mit HDEHP ummanteltem Teflonpulver, eluiert wird mit 0,22N HCl. Nd wird auf ein doppeltes Re-Filament geladen. Die isotopische Zusammensetzung wird in einem Finnigan MAT262 Multikollektor Massenspektrometer mit double jump dynamic multicollection bestimmt. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ -Werte werden mit $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,7219$ normalisiert. Wiederholte Messung des La Jolla Nd-Standard während des Messverlaufs ergab für $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ $0,511850 \pm 0,000005$ (2σ , $n = 15$ Analysen). Der analytische Fehler der Einzelmessung von $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ wird in $2\sigma_m$ angegeben. Blindwerte betragen weniger als 50 pg Nd (Romer et al. 2001; 2005).

- **Blei:** Pb wurde über den Anionenaustauscher AG1-X8 in einer Teflonsäule extrahiert, entsprechend den Verfahren von Tilton (1973) und Manhès et al. (1978). Das Harz wurde mit 6N HCl gereinigt und mit 2N HCl konditioniert. Die Probe wird in 2N HCl aufgegeben und eingespült mit 2N HCl, 0,8N HBr und 2N HCl. Das Pb wurde mit 6N HCl eluiert. Die Pb-Probe wird zusammen mit H₃PO₄ und Silika-Gel auf ein einfaches Re-Filament geladen (Gerstenberger & Haase 1997). Die Isotopen-Zusammensetzung wird bei 1200-1250°C in einem Finnigan MAT262 Multikollektor Massenspektrometer mit static multicollection bestimmt. Instrumentelle Fraktionierung wurde mit 0,1% / a.m.u. korrigiert, bestimmt aus wiederholten Messungen am Pb-Standard NBS 981. Die Reproduzierbarkeit der Pb-Verhältnisse ist auf dem 2σ-Niveau besser als 0,1% (Romer et al. 2001; 2005).

3.4 Analyse der Mühlsteinbrüche: Ergebnisse und Charakterisierung

3.4.1 Petrographie und Phasenbestand

Mittels Polarisationsmikroskopie lassen sich auf Basis ihres Gefüges und Mineralbestandes die Steinbrüche in insgesamt fünf petrographische Gruppen unterteilen. Dabei ist zu beachten, dass die Einteilungen in die folgenden Gruppen vorläufiger Natur sind, da aufgrund der Feinkörnigkeit der Grundmasse mikroskopisch nicht der gesamte Phasenbestand der Laven verlässlich erfasst und damit keine genauen Angaben zum modalen Mineralbestand gemacht werden können. Der modale Mineralbestand kann lediglich geschzt werden; gemäß den Empfehlungen der IUGS (Le Maitre et al. 1989) erfolgt die vorläufige Nomenklatur entsprechend der Lage im Streckeisen-Diagramm. Die untersuchten Laven sind alle Si-unterstigt und bewegen sich in den Feldern 12 (tephritischer Phonolith), 14 (Basanit/Tephrit) und Feld 15b (tephritischer/basanitischer Foidit).

1. Gruppe: Tephritische Phonolithe des *Bellerbergs* und *Niedermendiger* Lavastroms
2. Gruppe: Feldspat-führende Basanite
3. Gruppe: basanitische Foidite
 - a) mit Cpx als vorherrschendem Phänokristall
 - b) mit Cpx als vorherrschendem Phänokristall und Melilith in der Grundmasse
 - c) mit Ol als vorherrschendem Phänokristall

Allen Proben ist ein porphyrisches Gefüge gemeinsam, mit einem Gehalt an Phnokristallen von 10 – 25 %, einer mikroporphyrischen bis intergranularen Grundmasse, die für vulkanisches Gestein typisch ist, und einer regellosen Kristallorientierung. Die Gesteine sind sehr blasenreich (bis zu 30 % Blasenraum), mit einem Blasendurchmesser bis zu 7 mm. Alterationen sind gering, in einigen Proben ist Olivin randlich in „Iddingsit“ umgewandelt oder Phlogopit ist bereits teilweise opak. Die dominante Phnokristallphase ist idiomorpher bis hypidiomorpher Klinopyroxen, der eine charakteristische starke Zonierung aufweist (dazu Duda 1984 und Duda & Schmincke 1985), mit Ausnahme des *Mosenbergs*, in dem Olivin die Masse der Phänokristalle bestimmt. In der Grundmasse stellen in erster Linie die Klinopyroxene die im Mikroskop noch gut erkennbaren kurzsuligen, prismatischen bis stengeligen Mikrophno-

kristalle. Die zweite wichtige Phase in der Grundmasse ist Nephelin, der pflasterartig die Mineralzwischenrume ausfllt oder häufig idiomorph rechteckig in die Blasenräume hineinwächst. Glas wurde ausgenommen der tephritischen Phonolithe in keiner Probe gefunden.

1. Gruppe: Tephritische Phonolithe des *Bellerbergs* und *Niedermendiger Lavastroms*

Die Proben der *Bellerberg*-Steinbrüche – ***Mayener Grubenfeld***, ***Kottenheimer Winfeld*** und ***Ettringer Lay*** sowie die des ***Niedermendiger Lavastroms*** unterscheiden sich deutlich von denen der übrigen Steinbrüche, zeigen aber keine deutliche Variation in Gefüge und Mineralbestand untereinander. Die Proben sind von porphyrischem Gefüge mit Phnokristallen von Klinopyroxen, vereinzelt treten Olivin, Amphibol, Phlogopit, Sanidin und Plagioklas als Phänokristalle auf. Die feinkörnige Grundmasse wird hauptsächlich aus Klinopyroxen und Nephelin neben Leucit in den Zwischenräumen aufgebaut. Es finden sich geringere Mengen von Plagioklas, Sanidin, opaken Fe-Ti-Oxiden und akzessorischem Apatit. Ein charakteristisches Merkmal dieser petrographischen Gruppe ist neben dem mikroskopisch deutlichen Vorhandensein von Feldspäten das Auftreten von akzessorischen Quarz-Xenokristallen, die mit der unterkieselten Schmelze randlich reagierten und von Glas und kleinen Leisten von Diopsid-Kristallen ummantelt werden. Im Anhang ist stellvertretend für die Lavaströme des *Bellerbergs* eine Probe aus dem *Kottenheimer Winfeld* (Anhang B, Abb. B1) dargestellt. Eine Probe aus dem *Niedermendiger Lavastrom* zeigt Abb. B2 im Anhang B. Duda & Schmincke (1978) bezeichnen die *Niedermendiger Lava* als „Tephrit“, anhand des erhöhten Gehalts an Sanidin lässt sich die *Niedermendiger Lava* jedoch eher in das Feld der „tephritischen Phonolithe“ im Streckeisen-Diagramm einordnen.

2. Gruppe: Feldspat-führende Basanite

Die beiden Osteifeler Laven der ***Mauerley*** (Anhang B, Abb. B3) und der ***Hohen Buche*** (Anhang B, Abb. B4) enthalten mehr als 10% Ol und werden deshalb als Basanite angesprochen. Sie sind von porphyrischem Gefüge mit großen (bis 5 mm im Falle der Hohen Buche) idiomorphen bis hypidiomorphen Phnokristallen von hauptsächlich Klinopyroxen, untergeordnet von Olivin und akzessorischem Amphibol. Im Gegensatz zur *Mauerley* finden sich in den Laven der *Hohen Buche* akzessorisch

Phlogopit-Phänokristalle, die stark alteriert sind. Die Grundmasse der Steinbrüche besteht hauptsächlich aus Klinopyroxen und Olivin, daneben finden sich Feldspäte, Nephelin, im Falle der *Mauerley* auch Leucit in den Zwischenräumen, und körnige opake Fe-Ti-Oxide. Die petrographische Analyse bestätigt die Einordnung der *Mauerley* („Veitskopf Lava“) und der *Hohen Buche* („Fornicher Kopf“) als Basanite von Duda & Schmincke (1978).

3. Gruppe: basanitische Foidite

Diese Gruppe wird aufgrund des geschtzten Ol-Gehalts von über 10% als „basanitisch“ bezeichnet.

a) mit Cpx als vorherrschendem Phänokristall

Diese Gruppe umfasst die Lava des **Hochsimmers** (Anhang B, Abb. B5), **Goosbergs** (Anhang B, Abb. B6) und des **Rother Kopfs** (Anhang B, Abb. B7). Alle Laven haben eine extrem feinkörnige Matrix, in der hauptsächlich Klinopyroxen- und untergeordnet Olivin-Phänokristalle eingebettet sind. In der Grundmasse finden sich hauptsächlich Klinopyroxen und Nephelin, desweiteren Apatit, Phlogopit und Fe-Ti-Oxide. Der Blasengehalt ist vergleichsweise gering; während die Lava des *Hochsimmers* massig ist, besitzen die Laven des *Goosbergs* und des *Rother Kopfes* einen Blasenanteil von ca. 5 %. Duda & Schmincke (1978) klassifizieren die Lava des *Hochsimmers* jedoch als „Tephrit“, was im Rahmen dieser Untersuchung aufgrund des erhöhten Ol-Gehalts und des hohen Gehalts an Nephelin in der Grundmasse abgelehnt wird. In seiner petrographischen Analyse konnte Mertens (1983) in der Grundmasse von *Goosberg-* und *Rother Kopf-*Lava Melilith feststellen und ordnet sie demnach in die Gruppe der „Melilith-haltigen Foidite“ ein. In der vorliegenden Untersuchung konnte das Auftreten von Melilith für die Laven dieser Gruppe nicht bestätigt werden, damit werden sie von der folgenden, Melilith-haltigen, Gruppe getrennt.

b) mit Cpx als vorherrschendem Phänokristall und Melilith in der Grundmasse

Das gemeinsame Merkmal der Laven vom **Herchenberg** (Anhang B, Abb. B8), **Robusch** (Anhang B, Abb. B9), **Eichholz** (Anhang B, Abb. B10), **Dietzenley** (Anhang B, Abb. B11), **Mühlenberg** (Anhang B, Abb. B12) und **Römerberg** (Anhang B, Abb.

B13 a und b) ist, dass Melilith sichtbar in der Matrix verteilt auftritt. Die Phänokristalle sind hauptsächlich Klinopyroxen (im Falle des Mühlenbergs ausschließlich) und wenig Olivin, außer im *Römerberg*, in dessen Lava der Olivin ungefähr die Hälfte aller Phänokristalle stellt. Die Grundmasse besteht aus Klinopyroxen, Nephelin, Phlogopit, Erzmineralen, Apatit, Perovskit und Melilith, der im einfach polarisierten Licht deutlich honiggelb und stark beansprucht erscheint und bei gekreuzten Nicols opak ist. Nur in der Lava des *Römerberges* tritt er als leistenartiges, durchscheinendes Mineral mit Mittelnaht und typischer „Pflockstruktur“ auf, das unter gekreuzten Nicols niedrige bis leicht anomal blaue Interferenzfarben zeigt (Anhang B, Abb. B13 b). Eine weitere Besonderheit des *Römerberg*-Steinbruchs ist das Auftreten großer (bis zu 8 mm), frischer Olivin-Xenokristalle. Dadurch, dass die Matrix des *Robschs* etwas grobkörniger ist, als die der anderen Steinbrüche in dieser Gruppe, konnte dort im Gegensatz zu den anderen Steinbrüchen dieser Gruppe Leucit beobachtet werden. Die Blasengehalte liegen meist zwischen 15 und 20 %, variieren aber auch innerhalb der einzelnen Steinbrüche stark; extreme Beispiele sind dafür *Eichholz* und *Dietzenley*, die einen Blasengehalt von 0 bis 20 % aufweisen. Diese Beobachtungen decken sich mit denen von Mertes (1983), der *Roßbüsch*, *Eichholz*, *Dietzenley*, *Mühlenberg* und *Römerberg* als „Melilith-haltige Foidite“ bezeichnet. Bednarz & Schmincke (1990) bezeichnen die Lava des *Herchenbergs* als „Hauyn-führende Melilith-Nephelinite“. Hauyn konnte im Gegensatz dazu in dieser Untersuchung in der *Herchenberg*-Lava jedoch nicht beobachtet werden.

c) mit Ol als vorherrschenden Phänokristall

Diese Gruppe besteht nur aus den Vorkommen des ***Mosenbergs*** (Anhang B, Abb. B14). Olivine bilden die Masse der Phänokristalle, Klinopyroxene treten im Gegensatz zu den übrigen Steinbrüchen als Phänokristalle nur akzessorisch auf, bilden aber die vorherrschenden Mikroeinsprenglinge der Grundmasse. Die Matrix wird neben den Klinopyroxen-Mikroeinsprenglingen vornehmlich aus Nephelin, häufig Phlogopit, Leucit, Fe-Ti-Oxiden und Apatit aufgebaut. Melilith konnte nicht beobachtet werden. Die Klassifizierung des *Mosenbergs* als eigene Gruppe stimmt mit der Klassifizierung des *Mosenbergs* als „Olivin-Nephelinit“ von Mertes (1983) berein. Orthopyroxen-Xenokristalle, wie sie von Mertes (1983) für den *Mosenberg* beschrieben wurden, konnten in den vorliegenden Proben nicht entdeckt werden.

Anhand der Röntgendiffraktometrie soll die Möglichkeit überprüft werden, die einzelnen petrographischen Gruppen anhand ihres Phasenbestandes weiter zu unterscheiden. Dazu werden die Diffraktogramme einzelner Proben aus den unterschiedlichen Abbaustellen, die zu einer petrographischen Gruppe zusammengefasst werden konnten, miteinander verglichen. Es zeigt sich jedoch in allen Diffraktogrammen, dass im Vergleich unter den einzelnen Abbaustellen keine Intensittsspeaks zu finden sind, die auf eine für eine bestimmte Abbaustelle charakteristische Phase schließen lassen könnten. Vergleicht man die petrographischen Gruppen anhand der Diffraktogramme untereinander, zeigt sich, dass der reine Mineralbestand der analysierten Vulkanite, unabhängig von den Mengenanteilen, so ähnlich ist, dass Analysen mittels Röntgendiffraktometrie keine Möglichkeit zur Charakterisierung der einzelnen Steinbrüche liefern.

3.4.2 Gesamtgesteinschemie: Haupt- und Spurenelemente

Die Ergebnisse der Haupt- und Spurenelementanalyse mit RFA sowie die Berechnung des normativen Mineralbestandes sind im Tabellenanhang, Tabelle 1 zusammengestellt. Da der modale Mineralbestand mikroskopisch nicht eindeutig festgelegt werden kann, werden die Steinbrüche nach geochemischen Kriterien klassifiziert. Entsprechend den Empfehlungen des IUGS erfolgt die Nomenklatur gemäß der Einordnung ins TAS (total alkali silica)-Diagramm nach Le Bas et al. (1986) (Abb. 18). Demnach lassen sich die untersuchten Laven in drei Gruppen gliedern:

- Gruppe 1: Phonotephrite

Diese Gruppe umfasst ausschließlich die Osteifeler Abbaustellen des *Bellerbergs* (*Mayener Grubenfeld*, *Ettringer Lay* und *Kottenheimer Winfeld*) und des *Niedermdiger Lavastroms*.

- Gruppe 2: Melanephelinite

Die zweite große Gruppe liegt im Übergang zum Tephrit/Basanit- zum Foidit-Feld. Diese Gruppe unterscheidet sich markant von der ersten Gruppe durch einen deutlich niedrigeren Gehalt an SiO₂ und einen geringeren Gehalt an Alkalien. Sie umfasst alle Westeifel-Steinbrüche, sowie die Steinbrüche der *Hohen Buche*, *Mauerley* und des *Herchenbergs* aus der Osteifel. Entsprechend der Berechnung des C.I.P.W.-normativen Mineralgehalts (Tabellenanhang, Tabelle 1) enthalten alle Proben aus dieser Gruppe mehr als 10% Olivin. Damit werden die Laven aus dem Tephrit/Basanit-Feld

als Basanite bezeichnet. Dem Basanit-Feld zuzuordnen sind **Hohe Buche**, **Mauerley**, **Roßbüsch** und **Eichholz**, wobei sich die Osteifel-Basanite von denen der Westeifel durch einen leicht erhöhten SiO₂-Gehalt unterscheiden. Im Foidit-Feld liegen **Römerberg**, **Rother Kopf** und **Herchenberg**. Die übrigen Abbaustellen dieser Gruppe, **Dietzenley**, **Mosenberg**, **Mühlenberg** und **Goosberg**, zeichnen im Übergang von Basanit zu Foidit. Le Bas (1989) und Le Bas & Streckeisen (1991) behandeln das Problem der fehlenden Abgrenzung der Foidite zu den Basaniten und schlagen vor, zur chemischen Definition von Laven, die in diesem Bereich zeichnen, den Gehalt an normativem Albit und Nephelin heranzuziehen. Keine Probe dieser Gruppe enthält normativen Albit und mehr als 20% normativen Nephelin; damit können sie als „Melanephelinite“ bezeichnet werden.

- Gruppe 3: Nephelinite

Durch einen deutlich erhöhten Alkali-Oxid- und leicht höheren SiO₂-Gehalt grenzt sich die nephelinitische Abbaustelle des *Hochsimmers* von der großen Gruppe der Melanephelinite ab. Mit > 20% normativem Nephelin als dominierendem Foid und ohne normativen Albit wird der *Hochsimmer* nach Le Bas (1989) und (Le Bas & Streckeisen 1991) als „Nephelinit“ bezeichnet. Demnach lässt sich die Abbaustelle *Hochsimmer* bereits durch die Lage im TAS-Diagramm von den übrigen Abbaustellen separieren und kann damit als eindeutig charakterisiert angesehen werden.

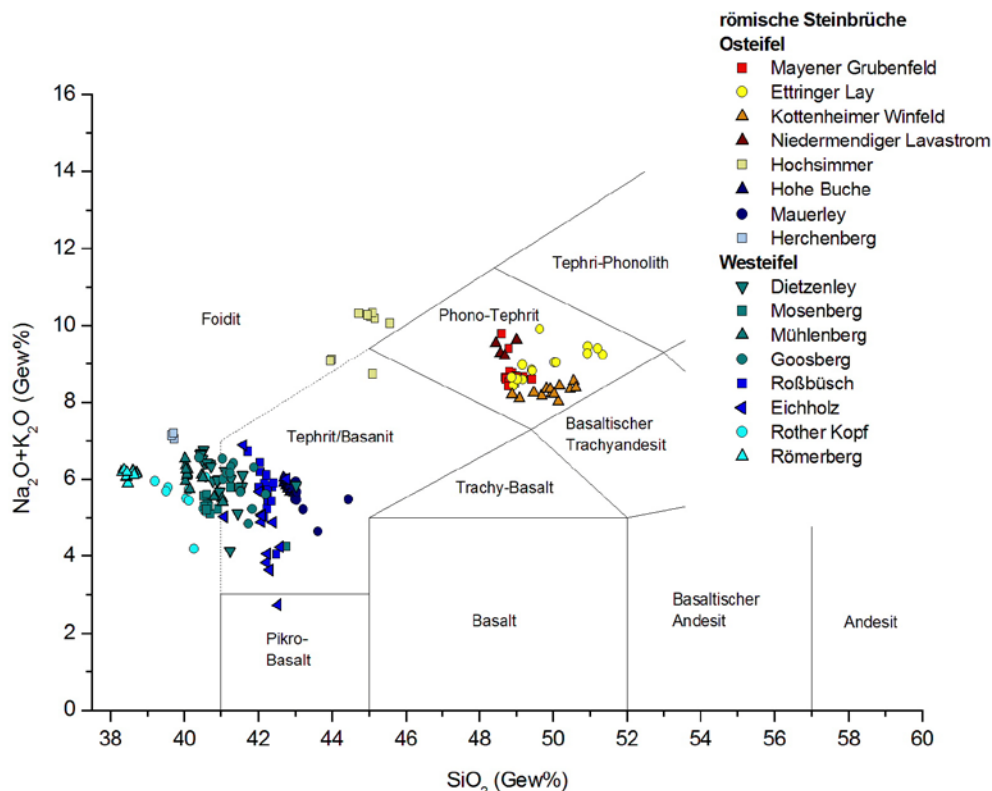


Abb. 18: Die römischen Steinbrüche der Ost- und Westeifel im TAS-Diagramm nach Le Bas et al. (1986).

Die Gruppen, die im TAS-Diagramm etabliert werden können, werden im Folgenden entsprechend ihrer Klassifizierung getrennt behandelt. Die Lava des *Hochsimmers* wird aufgrund des erhöhten Gehalts an Alkali-Oxiden mit der großen Gruppe der Phonotephrite verglichen. Da die Spanne an SiO₂-Gehalten in den Laven relativ gering ist, wird der MgO-Gehalt als x-Achse gewählt. Mg ist ein wichtiger Bestandteil der festen Phasen, die im Gleichgewicht mit einer mafischen Schmelze stehen und kann durch den Zusammenbruch von Mg-reichen Phasen bei der partiellen Schmelze oder durch deren Ausfllung bei der Kristallfraktionierung einer breiten Streuung unterliegen (Rollinson 1993).

1. Gruppe: Phonotephrite und Hochsimmer-Nephelinit

Abb. 19a/b zeigt das MgO-Variationsdiagramm der Hauptelement-Oxide der Phonotephrite und des *Hochsimmer*-Nephelinites. Die drei Lavaströme des *Bellerberg*-Vulkans bewegen sich in ihrem MgO-Gehalt zwischen 4,3 und 5,6%, lassen aber trotz Überlappungen Unterschiede im MgO-Gehalt erkennen, die Hinweise auf eine Differentiation sein können: Der *Ettringer Lavastrom* enthält weniger MgO als der *Mayener*, und dieser wiederum weniger als der *Kottenheimer*. Die MgO-Werte sind innerhalb der *Bellerberg*-Lavaströme positiv korreliert mit TiO₂, CaO und Fe₂O₃, negativ korreliert mit Al₂O₃, Na₂O und K₂O, P₂O₅ und SiO₂ bleiben hingegen weitgehend konstant. Abb. 20a/b zeigt die MgO-Variationsdiagramme mit den Spurenelementen; Cr, Ni, Co und V sind ebenfalls positiv mit dem MgO-Gehalt korreliert, Zn, die HFS-Elemente Zr und Nb bleiben innerhalb der *Bellerberg*-Lavaströme konstant, ebenso wie Sr und Ba. In Abb. 21 wird erkennbar, dass sich der *Kottenheimer* Lavastrom im Vergleich zu den übrigen *Bellerberg*-Lavaströmen durch einen geringeren Nb-Gehalt auszeichnet.

Der MgO-Gehalt des *Niedermendiger* Lavastrom korrespondiert mit dem des *Ettringer* Lavastroms des *Bellerbergs* und zeigt, dass die *Niedermendiger* Lava entsprechend differenziert ist. Bei gleichem Mg-Gehalt ähneln die Werte von Al₂O₃, K₂O- und Na₂O denen der *Ettringer* Lava, der P₂O₅, Fe₂O₃- TiO₂- und CaO-Gehalt ist jedoch höher, SiO₂ niedriger (Abb. 19a/b). Vergleicht man die Laven auf Basis der C.I.P.W.-Norm zeigt sich, dass die *Niedermendiger* mehr normativen Apatit, Nephelin und weniger Albit als die *Bellerberg*-Laven enthält, aber vergleichbare Anteile an den übrigen normativen Mineralen. Bei Betrachtung der Spurenelemente ist auffällig,

3. Provenienzanalyse

3.4 Analyse der Mühlsteinbrüche: Ergebnisse und Charakterisierung

3.4.2 Gesamtgesteinschemie: Haupt- und Spurenelemente

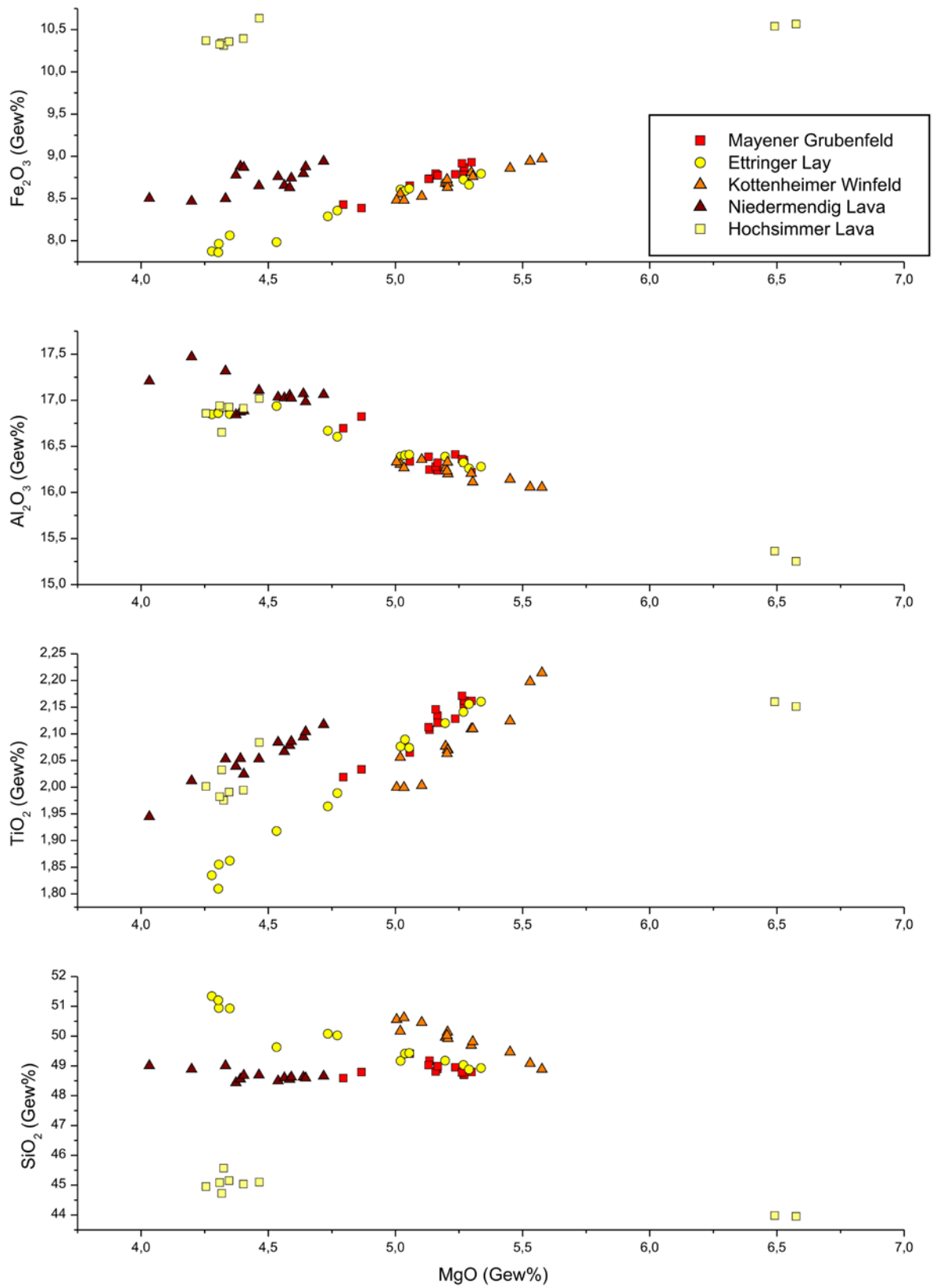


Abb. 19a: MgO-Variationsdiagramm der Hauptelemente (Fe₂O₃, Al₂O₃, TiO₂, SiO₂) der Phonotephrite und des Hochsimmers.

3. Provenienzanalyse

3.4 Analyse der Mühlsteinbrüche: Ergebnisse und Charakterisierung

3.4.2 Gesamtgesteinschemie: Haupt- und Spurenelemente

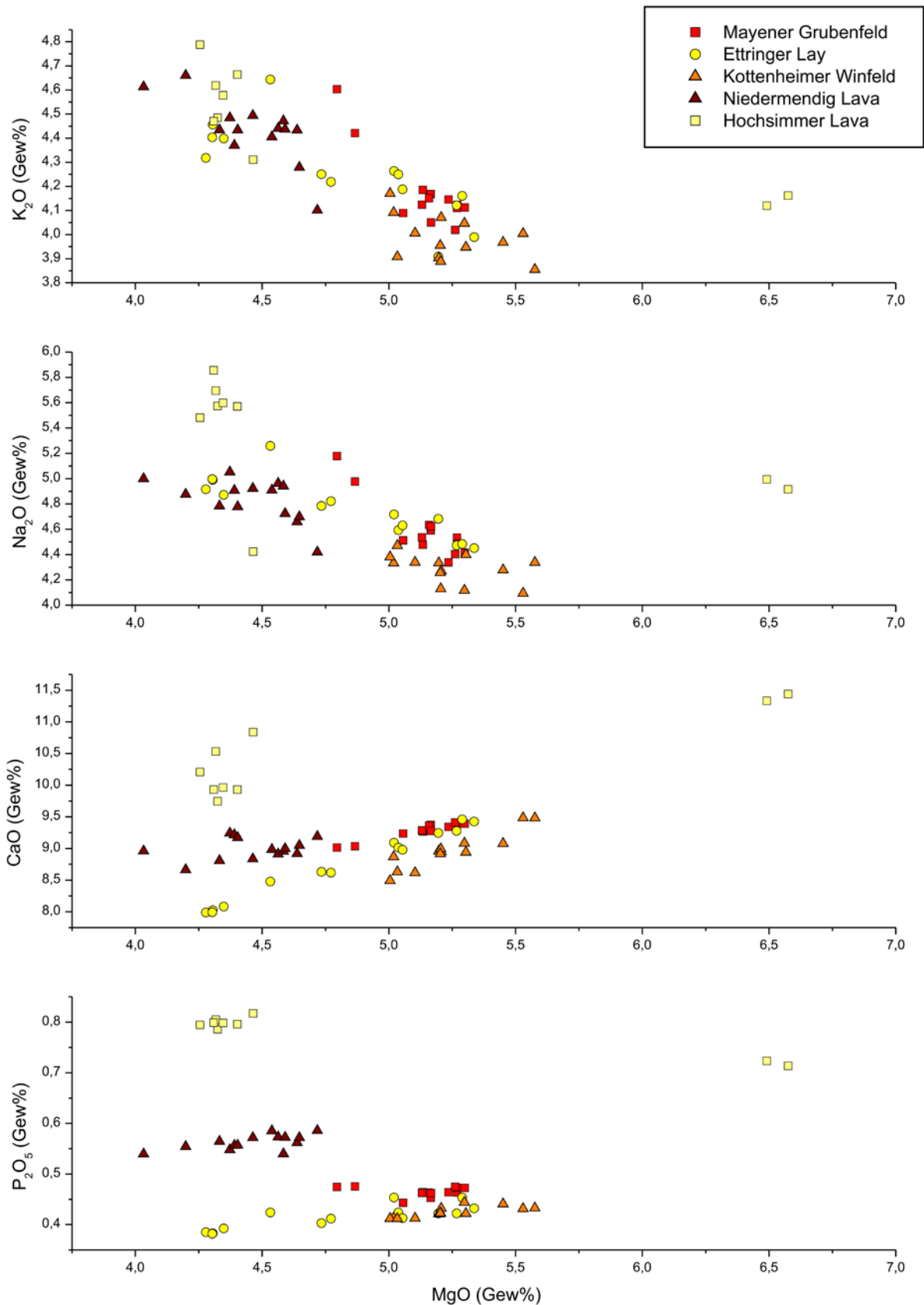


Abb. 19b: MgO-Variationsdiagramm der Hauptelemente (K₂O, Na₂O, CaO, P₂O₅) der Phonotephrite und des Hochsimmers.

3. Provenienzanalyse
3.4 Analyse der Mühlsteinbrüche: Ergebnisse und Charakterisierung
3.4.2 Gesamtgesteinschemie: Haupt- und Spurenelemente

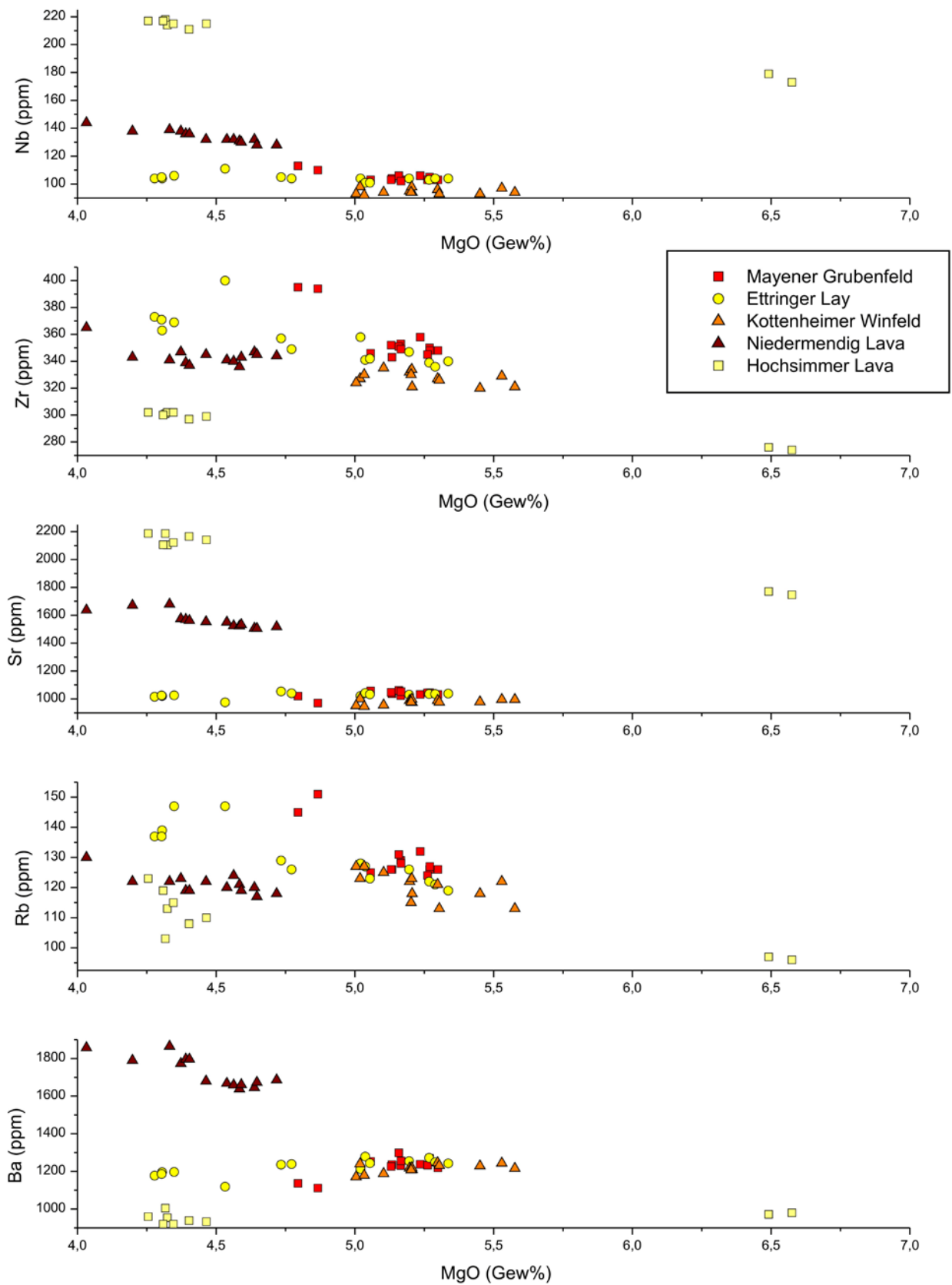


Abb. 20a: MgO-Variationsdiagramm der Spurenelemente (Nb, Zr, Sr, Rb, Ba) der Phonotephrite und des Hochsimmers.

3. Provenienzanalyse
3.4 Analyse der Mühlsteinbrüche: Ergebnisse und Charakterisierung
3.4.2 Gesamtgesteinschemie: Haupt- und Spurenelemente

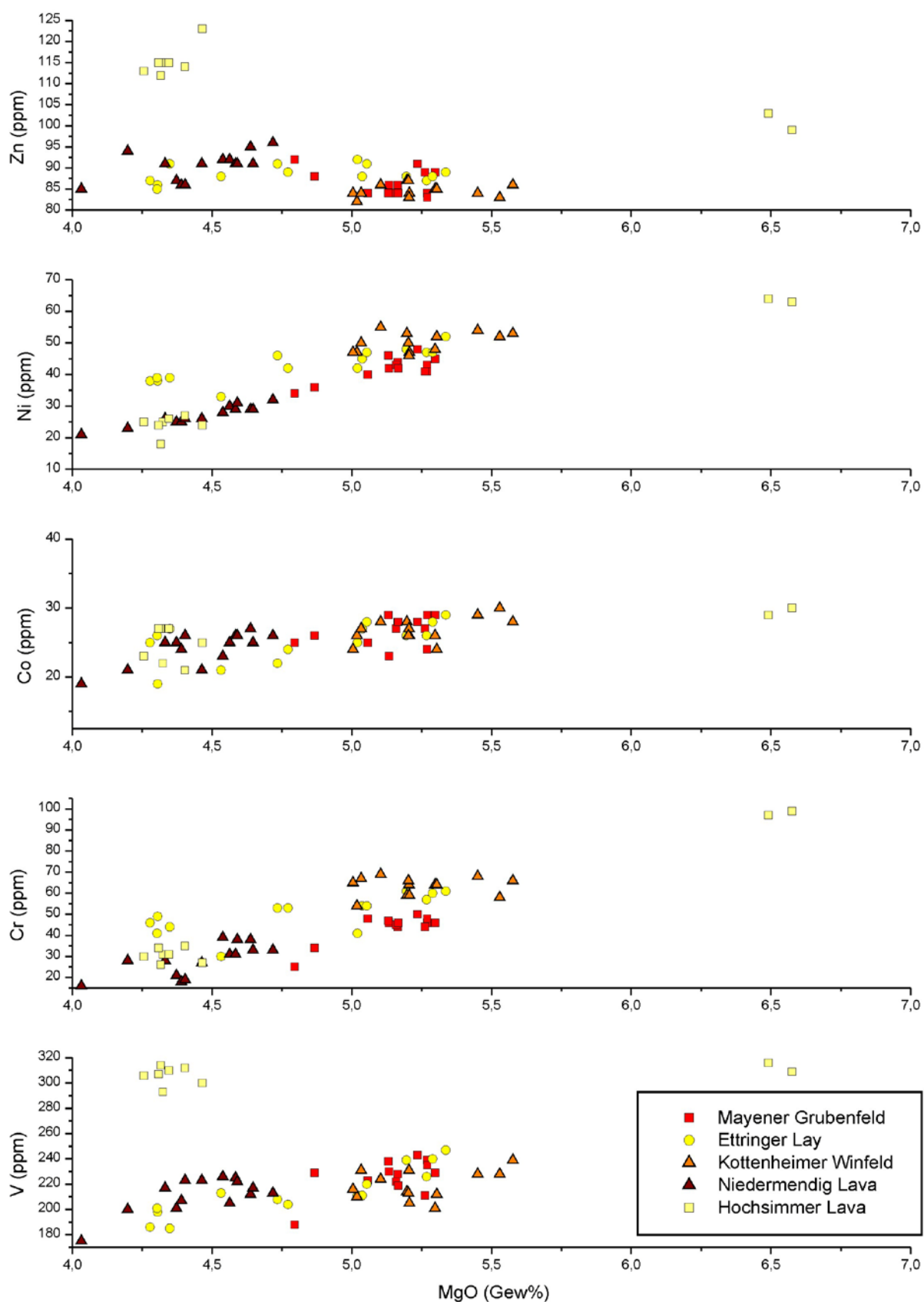


Abb. 20b: MgO-Variationsdiagramm der Spurenelemente (Zn, Ni, Co, Cr, V) der Phonotephrite und des Hochsimmers.

dass trotz vergleichbarem MgO-Gehalts die *Niedermendiger* Lava deutlich weniger Cr, Ni, Zr und Rb als die *Ettringer* Lava enthält, während die Zn-, Co- und V-Werte wiederum übereinstimmen (Abb. 20a/b). In den Spurenelementen unterscheidet sich die *Niedermendiger* Lava von den Laven des *Bellerbergs* in erster Linie durch den deutlich höheren Gehalt an Nb, Ba und Sr. Eine eindeutige Abgrenzung der *Niedermendiger* Lava von den *Bellerberg*-Phonotephriten lässt sich anhand der deutlich höheren Gehalte von P₂O₅ und Nb erreichen (Abb. 21).

Da die MgO-Werte ähnlich sind, werden in Abb. 19a/b und 20a/b die nephelinitischen *Hochsimmer*-Proben den Phonotephriten gegenüber gestellt. Wie aus der Einordnung im TAS-Diagramm zu erwarten, zeichnet sich die Lava des *Hochsimmers* bereits in den Hauptelementen durch niedrigere Gehalte an SiO₂ und höheren Gehalten an FeO, CaO, Na₂O und P₂O₅ von den Laven der Phonotephrite deutlich ab. Auffällig an den *Hochsimmer*-Proben ist, dass sich die proximal zum Schlackenkegel genommenen Proben HL1 und HL2 durch einen deutlich höheren MgO-Gehalt als die übrigen *Hochsimmer*-Proben auszeichnen, einhergehend mit einem leicht erhöhten Gehalt an TiO₂, CaO, aber einem geringeren Gehalt an Al₂O₃, Na₂O, K₂O und P₂O₅. Der Fe₂O₃- und SiO₂-Gehalt ist gleich. Entsprechend verhalten sich die beiden Magmensuiten in der Verteilung der Spurenelemente: HL1 und HL2 enthalten mehr Cr, Ni, Co und Cu, aber geringfügig weniger Zn, Sr, Zr, Nb, Y und Rb. Der Gehalt an Ba und V ist gleich. Abb. 21 zeigt, dass mittels P₂O₅- und Nb-Gehalten eine eindeutige Charakterisierung wie für die *Niedermendig* Lava auch für den *Hochsimmer*-Nephelinit erreicht ist.

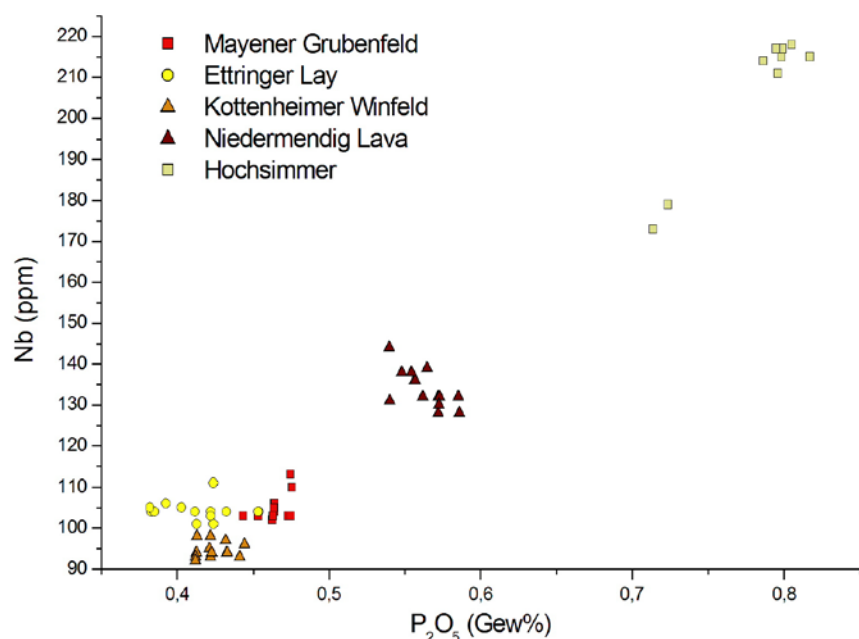


Abb. 21: P₂O₅-Nb-Variationsdiagramm für die Phonotephrite und den Hochsimmer-Nephelinit.

2. Gruppe: Melanephelinite

Die Hauptelement-Zusammensetzungen der Melanephelinite im Vergleich zum MgO-Gehalt sind in Abb. 22a/b dargestellt, die Spurenelemente in Abb. 23a/b. Die Mehrzahl der Abbaustellen bewegen sich in einem Bereich von 8 bis 12% MgO; die vier Proben von der Abbaustelle *Dietzenley/Flemmingshöhe* zeichnen sich durch einen leicht erniedrigten, zwei Abbaustellen, *Römerberg* und *Mosenberg*, durch einen erhöhten MgO-Gehalt aus, anhand dessen sie sich deutlich von den übrigen Abbaustellen abgrenzen.

Im Falle des *Mosenbergs* (petrographisch als „basanitischer Foidit mit Ol als vorherrschendem Phänokristall“ bezeichnet, im TAS im Übergang Foidit-Basanit) bildet sich der hohe Gehalt an MgO in dem hohen Anteil an Ol im Mineralbestand ab. Der Gehalt an Ca im *Mosenberg* ist deutlich erniedrigt und entspricht eher dem der Osteifel-Melanephelinite *Hohe Buche* und *Mauerley*, was auf das Fehlen von Melilith zurückgeführt werden kann. Der *Mosenberg* zeigt im Vergleich zu den anderen Westeifel-Melanepheliniten eine Verarmung an TiO_2 und K_2O und eine leichte Anreicherung von Na_2O . Neben der Verarmung an K_2O und einem leicht verringerten SiO_2 -Gehalt weisen die Spurenelement-Gehalte darauf hin, dass die *Mosenberg*-Lava die primitivste aller untersuchten Melanephelinit-Abbaustellen ist. Dies wird insbesondere an den extrem hohen Werte von Ni, Cr und den erhöhten Werten von Co deutlich. Der V-Gehalt (nicht abgebildet) ist entsprechend dem TiO_2 niedrig, ebenso Rb und Ba entsprechend dem Gehalt von K_2O , was von dem Fehlen von Phlogopit in der Grundmasse widerspiegelt wird. Es ist möglich, dass diese Elemente von residualem Phlogopit im Mantel zurückgehalten wurden.

Insbesondere der *Römerberg* zeigt bei erhöhten MgO-Gehalten, die wie beim *Mosenberg* auf die hohen Anteile an Ol zurückzuführen sind, einen erhöhten Na_2O - und P_2O_5 -Gehalt, der sich im hohen Anteil an Nephelin bzw. Apatit widerspiegelt. In den Spurenelementen findet der hohe Apatit-Anteil des *Römerbergs* im stark erhöhten Gehalt an Y (nicht abgebildet) seinen Ausdruck, das vorzugsweise in Apatit einbaut wird. Von allen Melanepheliniten ist der *Römerberg* der am stärksten unterkieselte und enthält dementsprechend den höchsten Gehalt an normativem Nephelin und „Ca-Orthosilikat“, das in der CIPW-Norm stellvertretend für den hohen Gehalt an

3. Provenienzanalyse
 3.4 Analyse der Mühlsteinbrüche: Ergebnisse und Charakterisierung
 3.4.2 Gesamtgesteinschemie: Haupt- und Spurenelemente

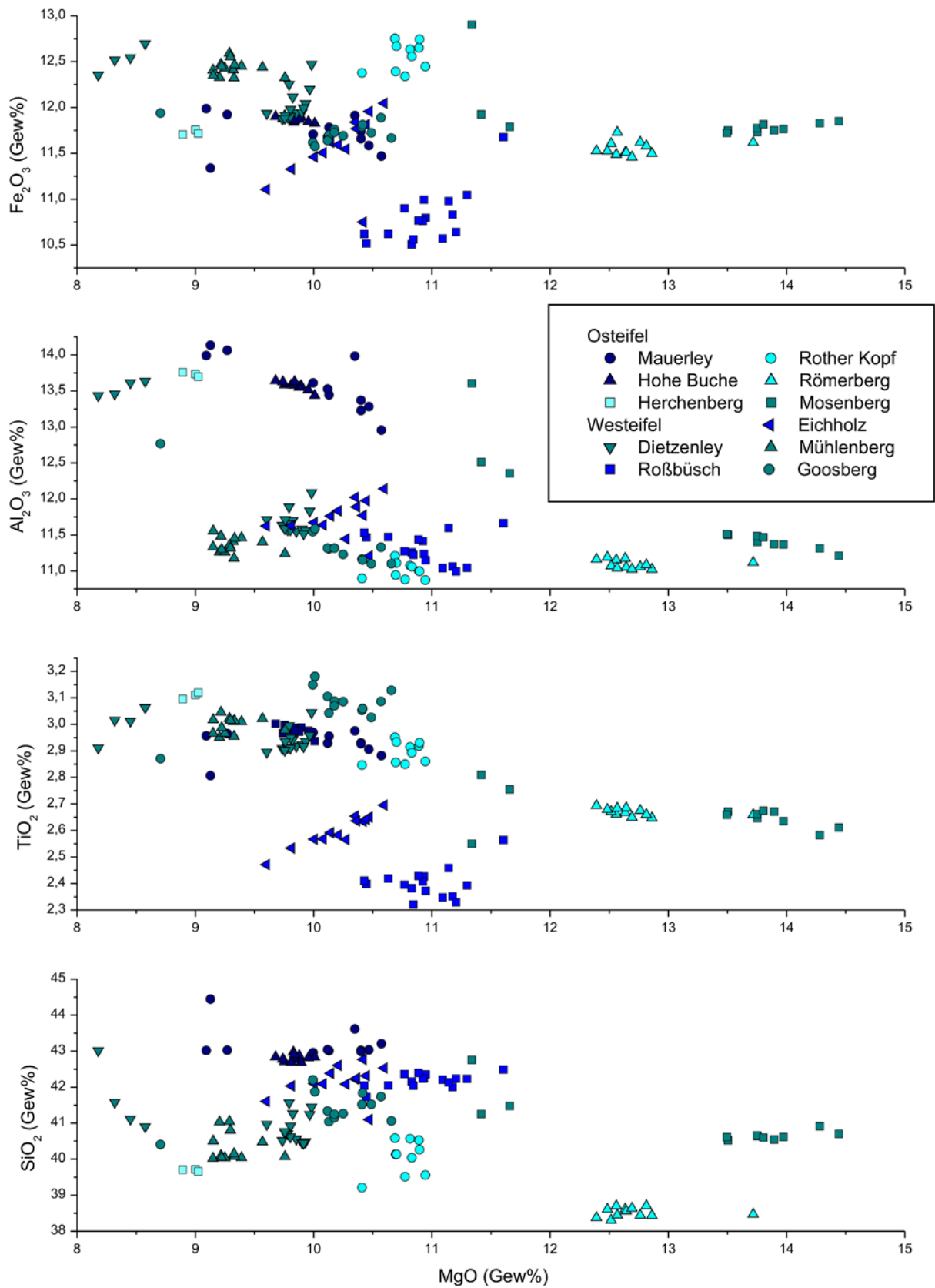


Abb. 22a: MgO-Variationsdiagramm der Hauptelemente (Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2) der Melanephelinites.

3. Provenienzanalyse

3.4 Analyse der Mühlsteinbrüche: Ergebnisse und Charakterisierung

3.4.2 Gesamtgesteinschemie: Haupt- und Spurenelemente

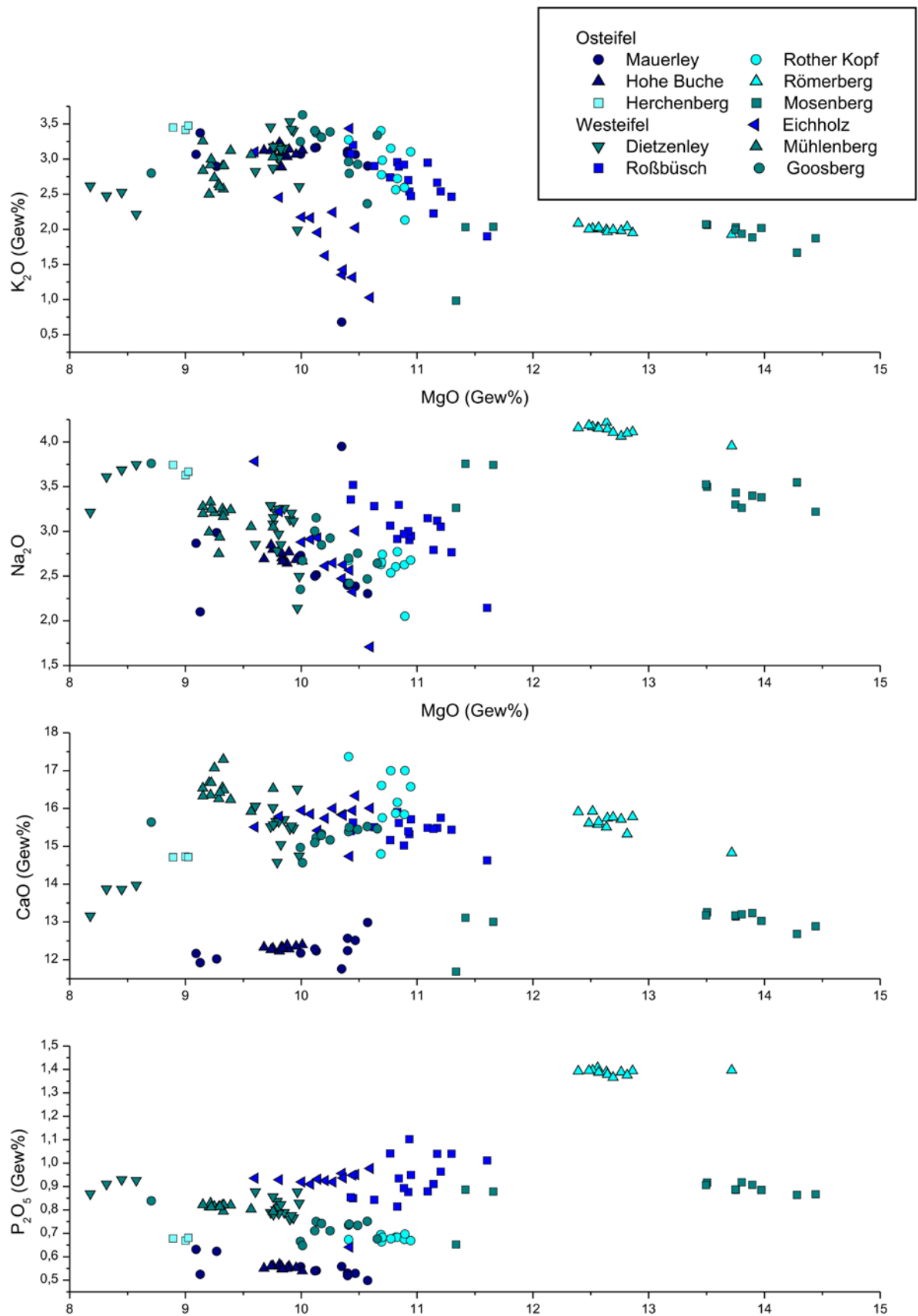


Abb. 22b: MgO-Variationsdiagramm der Hauptelemente (K₂O, Na₂O, CaO, P₂O₅) der Melanephelinites.

3. Provenienzanalyse

3.4 Analyse der Mühlsteinbrüche: Ergebnisse und Charakterisierung

3.4.2 Gesamtgesteinschemie: Haupt- und Spurenelemente

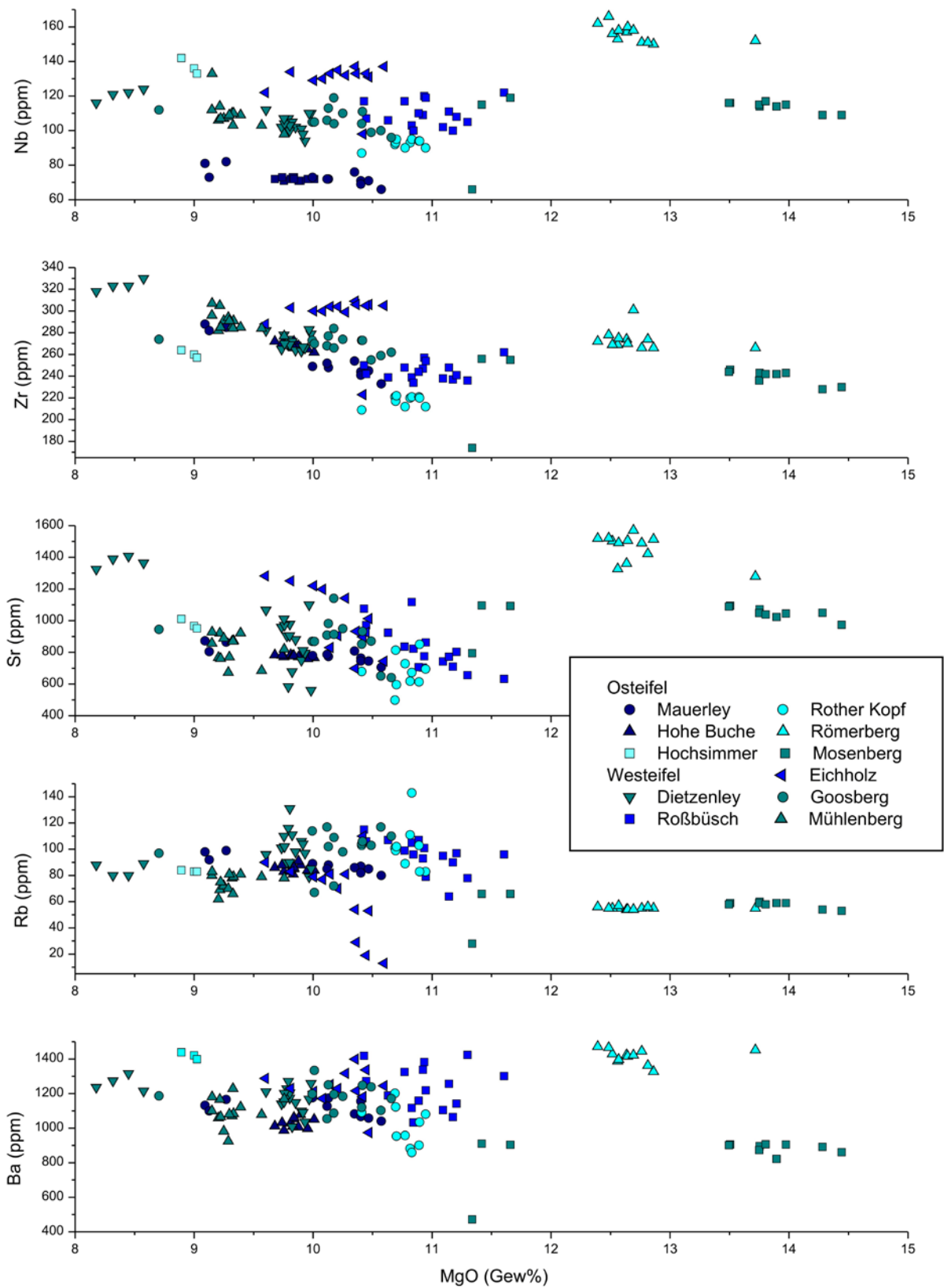


Abb. 23a: MgO-Variationsdiagramm der Spurenelemente (Nb, Zr, Sr, Rb, Ba) der Melanepheliniten.

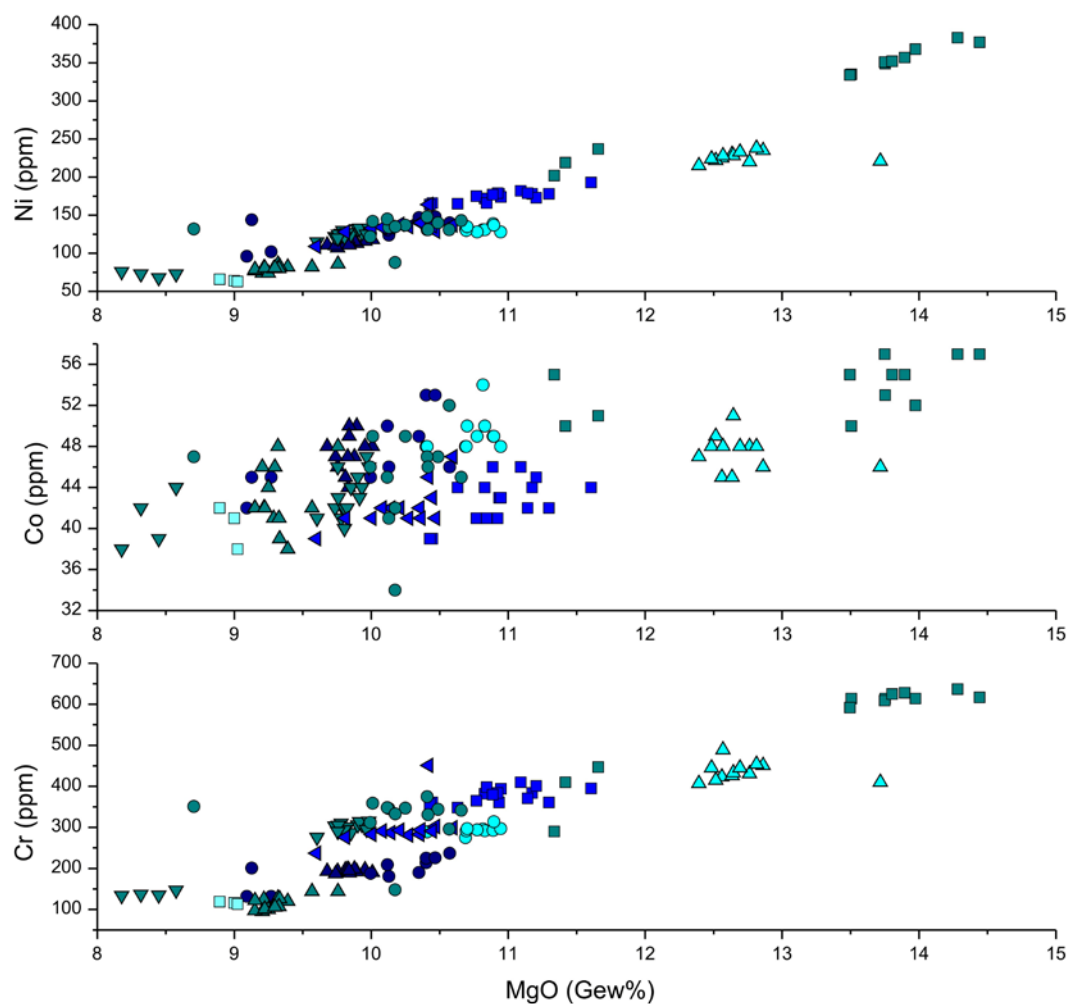


Abb. 23b: MgO-Variationsdiagramm der Spurenelemente (Ni, Co, Cr) der Melanephelinite (Legende wie in 23a).

modalem Melilith steht. In seinen Verhältnissen von TiO_2 , Al_2O_3 , K_2O und Rb entspricht die *Römerberg*-Lava der des *Mosenbergs*. Im Differenziationstrend, am deutlichsten erkennbar an Cr, Ni und Co, liegt der *Römerberg* zwischen *Mosenberg* und der übrigen Melanepheliniten. Auffällig ist der hohe Gehalt an Ba und Sr trotz geringem K_2O - und Rb-Gehalten. Wie im Falle des *Mosenbergs* könnten K_2O und Rb von Phlogopit in der Mantelquelle zurückgehalten worden sein. Auch im hohen Nb-Gehalt zeichnet sich der *Römerberg* deutlich von den übrigen westeifeler Abbaustellen ab. Insgesamt ist der *Römerberg* die einzige Melanephelinit-Abbaustelle, die sich von den übrigen anhand der Haupt- (insb. SiO_2 , CaO, P_2O_5), und Spurenelemente (Nb, Ba) klar charakterisieren lässt.

Die größte Gruppe mit einem MgO-Gehalt von 8 – 12% setzt sich zusammen aus den osteifeler Melanepheliniten *Hohe Buche*, *Mauerley* und *Herchenberg* und den

westeifeler Melanepheliniten *Roßbüsch*, *Eichholz*, *Rother Kopf*, *Dietzenley*, *Mühlenberg* und *Goosberg*. Innerhalb dieser Gruppe zeigen sich im Vergleich zu den Na₂O-Gehalten die beiden Osteifel-Laven *Hohe Buche* und *Mauerley* sowie die Westeifel-Lava des *Rother Kopfes* und des Goosbergs an K₂O leicht angereichert; zumindest im Falle der Osteifel-Laven spiegelt sich diese Anreicherung an K₂O in modalem Leucit in der Grundmasse wieder. Der P₂O₅ - sowie der CaO-Gehalt der Osteifel-Melanephelinite *Hohe Buche* und *Mauerley* im Vergleich zu den übrigen Abbau-stellen erniedrigt, der Gehalt an Al₂O₃ jedoch erhöht. Von den übrigen Melanephe-liniten grenzen sich *Mauerley* und *Hohe Buche* insbesondere in ihrem deutlich niedri-geren Nb-Gehalt ab. Einen erhöhten Gehalt an Al₂O₃ zeigt auch der *Herchenberg*. *Rother Kopf* und *Goosberg*, die petrographisch als „basanitische Foidite mit Cpx als vorherrschendem Phänokristall“ beschrieben wurden, ähneln sich sehr in ihrer Hauptelementzusammensetzung, bewegen sich aber stets im Bereich der basani-tischen Foidite, in denen modaler Melilith in der Matrix auftritt und lassen sich, im Ge-gensatz zu den Feststellungen von Mertes & Schmincke (1985), geochemisch von den Melilith-haltigen Laven nicht abgrenzen. *Eichholz* und *Roßbüsch* unterscheiden sich von den übrigen Abbaustellen durch einen erniedrigten Gehalt an TiO₂. In den positiven Korrelationen von Cr, Ni und auch Co mit dem Gehalt an MgO werden auch innerhalb der großen Melanephelinit-Gruppe Unterschiede im Grad der Differen-ziation deutlich.

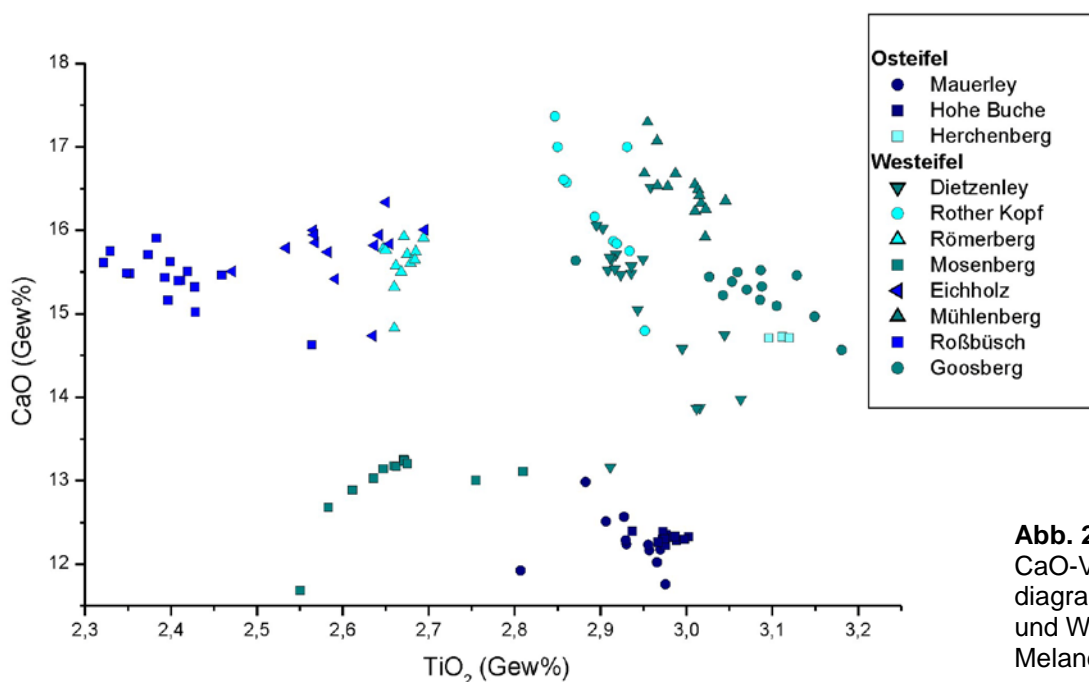


Abb. 24: TiO₂-CaO-Variationsdiagramm der Ost- und Westeifeler Melanephelinite.

Zusammenfassend zeichnen sich die groten Unterschiede zwischen den einzelnen Abbaustellen im CaO- und TiO₂-Gehalt ab, gegenübergestellt in Abb. 24. Der sonst ausreichend charakterisierte *Römerberg* berschneidet sich in diesen Elementen wiederum mit dem *Eichholz*; die melanephelinitischen Abbaustellen *Roßbüsch*, *Mosenberg*, *Mühlenberg* und, abgesehen von einer Probe, *Goosberg* zeigen gewisse Differenzen zu den übrigen. Aufgrund der großen Variabilität innerhalb der Abbaustellen lässt sich aber eine eindeutige Abgrenzung der Abbaustellen zueinander nicht verlässlich ziehen.

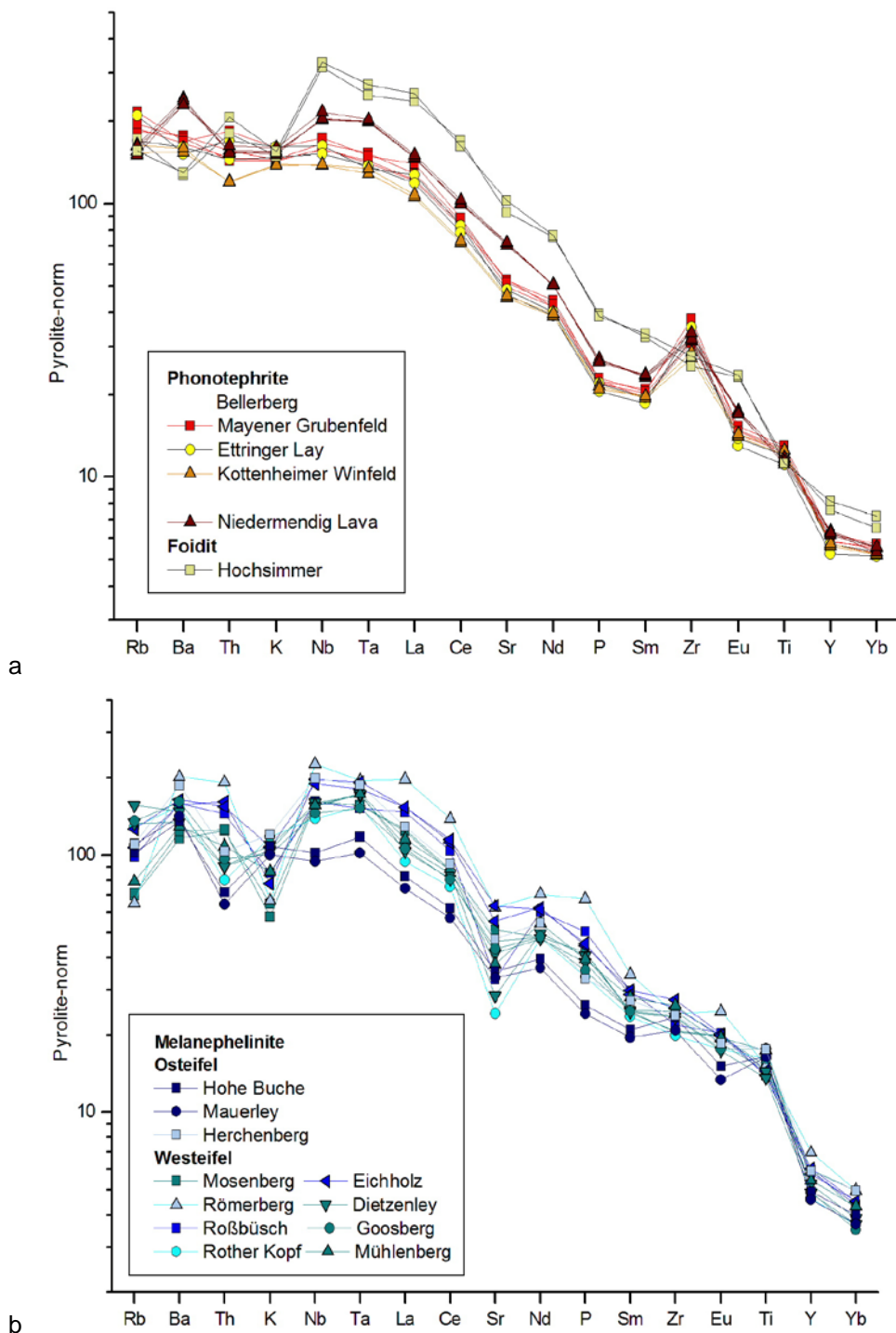


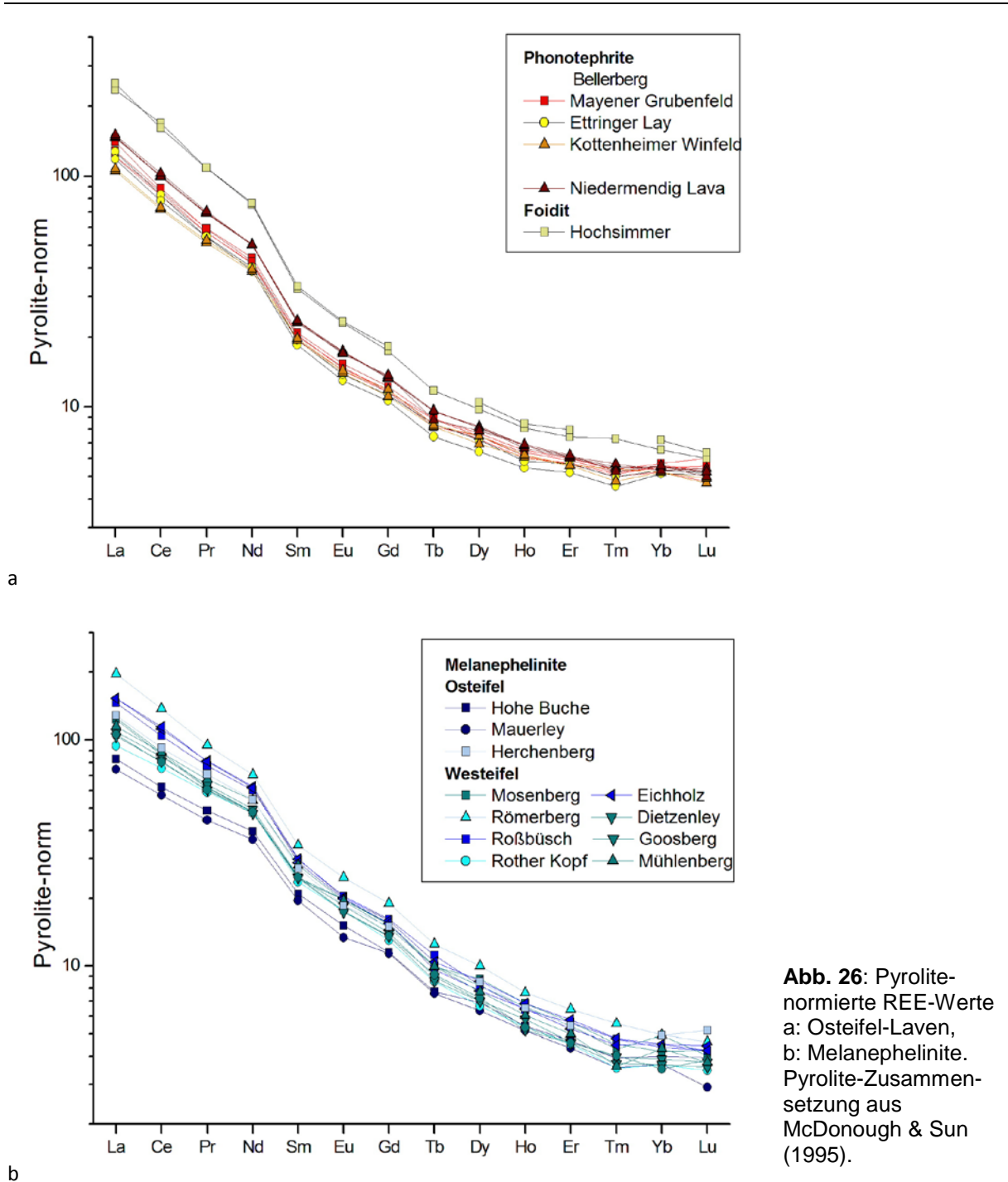
Abb. 25: Pyrolit-normiertes Spurenelement-Variationsdiagramm; a: Osteifel-Phonotephrite und Foidit, b: Melanephelinite. Pyrolite-Zusammensetzung nach McDonough & Sun (1995). Die Reihenfolge der Elemente, der empfohlene Pb-Wert zur Normalisierung aus Sun & McDonough (1989).

Die Resultate der ICP-MS-Spurenelement- und Seltene Erden-Analysen finden sich im Tabellenanhang, Tabelle 2. Die Spurenelement-Variationsdiagramme sind in Abb. 25a für die Phonotephrite und den *Hochsimmer*-Nephelinit und in Abb. 25b für die Melanephelinite der Ost- und Westeifel dargestellt. Phonotephrite, Nephelinit und Melanephelinite ähneln sich sehr stark in ihren Spurenelement-Mustern.

Ab Nb bei den Phonotephriten/Nephelinit bzw. ab Ta bei den Melanepheliniten nimmt die Anreicherung gleichmäßig ab, bis auf eine deutlich negative Sr-Anomalie bei den Melanepheliniten und positive Zr-Anomalien bei den Phonotephriten, die bei den Melanepheliniten deutlich schwächer ausfällt. Die *Niedermendig*-Lava zeigt höhere Gehalte an Ba sowie Nb und Ta. Der *Hochsimmer*-Nephelinit zeichnet sich ab Nb durch stark erhöhte Gehalte an Spurenelementen aus, zeigt aber im Gegensatz zu den Phonotephriten keine Anreicherung von Zr. In der Gruppe der Melanephelinite in Abb. 25b ist hat der *Römerberg* die höchsten Gehalte an Spurenelementen; die Melanephelinite der Osteifel, *Hohe Buche* und *Mauerley*, zeigen niedrigere Spurenelement-Gehalte als die der Westeifel, während der Osteifeler *Herchenberg* in seinen Gehalten den Westeifeler Laven entspricht. Die Melanephelinite zeichnen sich durch einen geringeren K-Gehalt aus, mit einer negativen K-Anomalie in *Mosenberg*, *Römerberg*, *Eichholz*, *Mühlenberg* und *Roßbüsch*. Diese Laven, insbesondere *Römerberg*, *Eichholz* und *Roßbüsch*, besitzen als weiteres Merkmal höhere Gehalte an den mittleren inkompatiblen Elementen von Nb bis P. Einige Laven zeigen entsprechend den Osteifel-Melanepheliniten eine leicht negative Th-Anomalie (*Dietzenley*, *Goosberg* und *Rother Kopf*).

Die REE-Muster der Phonotephrit- und Foidit-Laven (Abb. 26a) sowie der Melanephelinite (Abb. 26b) verlaufen sehr homogen, die Unterschiede liegen hauptsächlich in den Konzentrationen; so ist der Gehalt an REE im *Hochsimmer*-Nephelinit am höchsten, in den Osteifel-Melanepheliniten *Hohe Buche* und *Mauerley* am niedrigsten. Alle übrigen Laven bewegen sich innerhalb dieses Bereichs. Die Laven sind stark angereichert an LREE, das Muster fällt ohne auffällige Anomalien zu den HREE ab. Alle Laven zeigen nach einem steileren Abfall der Muster im Bereich der LREE bis mittleren REE eine Verflachung des Musters von Dy bis Lu; trotzdem ist das leichtere Element (außer im Fall von Tm und Yb) stets über das schwerere angereichert.

3. Provenienzanalyse
 3.4 Analyse der Mühlsteinbrüche: Ergebnisse und Charakterisierung
 3.4.2 Gesamtgesteinschemie: Haupt- und Spurenelemente



3.4.3 Multivariate Methoden

3.4.3.1 Datenvorbereitung: Transformation und Test auf Normalverteilung

Ein gängiges Problem in der Petrologie bzw. Geochemie ist das des sog. „geschlossenen Zahlenraums“. Es tritt immer dann auf, wenn eine Zusammensetzung durch Daten beschrieben wird, die in irgendeiner Form von Anteilen einer fixen Gesamtsumme ausgedrückt werden. In der Geochemie wird die Gesteinszusammensetzung immer als Prozent von Oxiden oder als z.B. „ppm“ ausgedrückt. Damit enthalten diese Daten nur relative Informationen. Es sind immer positive Werte, die von 0 bis 100 oder bis zu einer anderen Konstante reichen. Wenn also eine Komponente in einer Zusammensetzung erhöht oder erniedrigt wird, verringern oder erhöhen sich die übrigen Komponenten, ohne dass unbedingt eine genetische Beziehung zwischen ihnen besteht. Damit werden negative oder positive Korrelationen vorge-täuscht, die nicht existieren müssen. Statistische Verfahren sind jedoch auf Daten ausgelegt, die unabhängig voneinander sind und sich „frei“ von $-\infty$ bis $+\infty$ bewegen. Verschiedene Möglichkeiten, den „geschlossenen“ Zahlenraum in einen „offenen“ umzuwandeln, werden in der Literatur vorgeschlagen (grundlegend dazu Aitchinson 1986). In der vorliegenden Arbeit erwies sich die einfache log-normale Transformation (z.B. Baxter 1995 oder Templ et al. 2008) der Daten als geeignet, d.h. die Rohdaten werden 10er logarithmiert. Die auf diese Weise behandelten vorliegenden Daten zeigen die zweite Eigenschaft, die als wichtige Voraussetzung zur Anwendung bestimmter statistischer Verfahren gilt: Sie sind (meist) normalverteilt. Darüber hinaus neigt die logarithmische Transformation dazu, die Varianz der Variablen zu stabilisieren und gibt ihnen in einem statistischen Verfahren, das nicht-standardisierte Werte verwendet (wie die Diskriminanzanalyse), gleichwertiges Gewicht (Baxter 1995). Alle folgenden statistischen Verfahren werden mit SPSS 16.0 für Windows gerechnet.

Ob eine Normalverteilung vorliegt, lässt sich statistisch-mathematisch durch den „Kolmogorov-Smirnov“-Test (K-S-Test) berprfen. Er eignet sich besonders für kleine Probenumfänge. Im K-S-Test werden die lg-Werte der Haupt- und Spurenelemente (im Folgenden: Variablen) mit einer hypothetischen Normalverteilungskurve verglichen. Wenn eine bestimmte flächenmäßige Abweichung von der Normalverteilungskurve überschritten wird, muss die Annahme einer Normalverteilung verworfen werden. Im K-S-Test wird also eine konkrete Abweichung errechnet, die dann für

jede Variable mit den vom Probenumfang abhängigen Tabellenwerten (diese Tabellen stehen in der entsprechenden Literatur zur Verfügung) für den K-S-Test verglichen wird. Der Test wird auf dem 0,05 Signifikanzniveau gerechnet, d.h. die Irrtumswahrscheinlichkeits-Grenze liegt bei 5%. berschreitet die „extremste Differenz“ (Bezeichnung in der SPSS-Ausgabe) für die einzelnen Variable den Tabellenwert, liegt mit 95%iger Wahrscheinlichkeit keine Normalverteilung vor. Im Falle einer Normalverteilung muss der Wert für die „asymptotische Signifikanz $> 0,05$ sein.

Die Ergebnisse der K-S-Tests für die Variablen jeder einzelnen Abbaustelle sind im Tabellenanhang, Tabelle 3 aufgeführt. Die Abweichung von der Normalverteilung beschreibt in dieser Tabelle der Wert für die „extremste Differenz“. Dabei stellt sich heraus, dass einige Variablen nicht normalverteilt sind (in der Tabelle fett-kursiv markiert). Die Variablen, für die die Annahme einer Normalverteilung abgelehnt werden muss, werden aus den folgenden multivariaten Analysemethoden ausgeschlossen. Sie sind in der jeweiligen Tabelle markiert. Zeigen sich innerhalb einzelner Abbaustellen Variablen als nicht normalverteilt, die aber in den übrigen Abbaustellen stets eine Normalverteilung aufweisen, wird im Abgleich mit den geochemischen Rohdaten überprüft, ob die Abweichung von der Normalverteilung auf Ausreißern beruht. Bestätigen die geochemischen Rohdaten diese Vermutung, werden die entsprechenden Proben aus der Analyse gestrichen und anschließend erneut überprüft, ob nun eine Normalverteilung unter Ausschluss des Ausreißers gegeben ist.

Anhand dieser Vorgehensweise wurden die Probe *EiHo2* aus der Abbaustelle *Eichholz* und drei Proben aus der Abbaustelle *Mosenberg* (*Mos1-1*, *Mos2-1*, *Mos3-2*) als Ausreißer gedeutet und aus den Analysen herausgenommen. In der Obergruppe der Phonotephrite (inkl. *Hochsimmer-Foidit*) erweisen sich die Variablen MnO in den Gruppen *Mayener Grubenfeld* und *Kottenheimer Winfeld*, Cr im *Mayener Grubenfeld* und Ga in der *Niedermendig-Lava* als nicht normalverteilt und werden nicht in den folgenden Berechnungen eingesetzt. Für die Melanephelinite weichen die Variablen MnO in den Gruppen *Hohe Buche* und *Dietzenley*, K₂O in der *Mauerley-Gruppe* und Ga in der *Dietzenley* zu stark von der Normalverteilung ab und werden von den folgenden multivariaten Analysen ausgeschlossen.

3.4.3.2 Clusteranalyse

Das Ziel der Clusteranalyse ist, eine heterogene Gesamtheit von Objekten zu homogenen Gruppen zusammenzufassen. Die Mitglieder einer Gruppe sollen grstmgliche Ähnlichkeit zeigen, zwischen den einzelnen Gruppen soll aber möglichst keine Ähnlichkeit bestehen. Alle vorliegenden Eigenschaften, hier die einzelnen Variablen, werden gleichzeitig zur Gruppenbildung herangezogen. Obwohl mit den einzelnen Abbaustellen die Herkunft der jeweiligen Probe bekannt ist, werden die einzelnen Objekte (Proben) der beiden hier vorliegenden Grundgesamtheiten (Phonotephrite/Nephelinit und Melanephelinite) in der Clusteranalyse so „neutral“ behandelt, als sei ihre Gruppenzugehörigkeit unbekannt. Es wird überprüft, ob die aus der Clusteranalyse der Phonotephrite/Nephelinit und der Melanephelinite resultierenden Untergruppen die unterschiedlichen Quellen der Proben, also die einzelnen Abbaustellen, repräsentieren. Dies ist wichtig für die spätere Mühlstein-Provenienzanalyse, denn die Mhlsteinprobe muss stets so behandelt werden, als sei ihre Herkunft unbekannt. Ein Vorteil der Clusteranalyse ist zudem, dass sich eventuelle Ausreißer identifizieren lassen.

Die Clusteranalyse wird in drei Schritten durchgeführt:

1. Ermittlung der Ähnlichkeiten unter den Objekten

Die hier vorliegenden Merkmalswerte (10er logarithmierte Werte der chemischen Elemente) sind Resultate von Messungen, damit sind sie metrischer Natur. Daher werden zur Ermittlung der Ähnlichkeiten Distanzen verwendet. Zwei Objekte gelten als ähnlich, wenn die Distanz zwischen ihnen sehr klein ist. Hier wird die *quadrierte Euklidische Distanz* als Distanzma herangezogen. Die Euklidische Distanz ist:

$$d_{k,l} = \left[\sum_{j=1}^J |x_{kj} - x_{lj}|^2 \right]^{1/2}$$

mit $d_{k,l}$ = Distanz der Objekte k und l

x_{kj}, x_{lj} = Wert der Variablen j bei Objekt k, l (j = 1, 2, ..., J)

Durch das Quadrieren der Distanz werden groſſe Differenzwerte bei der Berechnung der Distanz zwischen den Objekten stärker berücksichtigt. Die Roh-

datenmatrix wird somit in eine Distanzmatrix überführt, die die Rechenbasis für die Fusionierungsalgorithmen bildet.

2. Der Fusionierungsalgorithmus

Im vorliegenden Fall wird ein „agglomeratives“ Clusterverfahren verwendet. Ein solches Verfahren geht im ersten Schritt davon aus, dass alle Objekte ein eigenes Cluster darstellen. Es werden dann die Cluster gesucht und zu einer Gruppe zusammengefasst, die die geringste Distanz zueinander aufweisen. Nach jeder Zusammenfassung zu einer Gruppe (die Gruppenanzahl nimmt damit kontinuierlich ab) werden die Abstände zwischen den Gruppen neu berechnet und eine neue, reduzierte Distanzmatrix erstellt. Am Ende der Fusionierung liegt eine Großgruppe vor. Der hier gewählte Fusionierungsalgorithmus ist das sog. *Ward-Verfahren*. Das Ziel des Ward-Verfahrens ist es nicht, die Gruppen zusammenzufassen, die die geringste Distanz aufweisen, sondern es werden nur die Objekte oder Cluster vereinigt, die die Varianz innerhalb einer Gruppe möglichst wenig erhöhen.

3. Anzahl der Cluster

Die Anzahl der Cluster ist in diesem Fall durch die Anzahl der Abbaustellen vorgegeben; im Fall der Phonotephrite/Nephelinit sollten fünf (*Mayener Grubenfeld, Ettringer Lay, Kottenheimer Winfeld, Niedermendig-Lava* und *Hochsimmer-Lava*), im Falle der Melanephelinite 12 (*Hohe Buche, Mauerley, Herchenberg, Mosenberg, Römerberg, Goosberg, Eichholz, Roßbüsch, Dietzenley, Dietzenley-Flemmingshöhe, Roßbüsch, Mühlenberg*) Cluster erkennbar sein.

Für die Clusteranalyse ist eine Normalverteilung der einzelnen Merkmalsvariablen keine Voraussetzung. Trotzdem werden die Variablen aus der Berechnung ausgeschlossen, die keine Normalverteilung aufweisen, damit die Merkmalsvariablen, die für die Clusteranalyse herangezogen werden, die selben sind wie die zur späteren Diskriminanzanalyse. Die Daten werden z-standardisiert, um die Verteilungen vergleichbar zu machen:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s}$$

mit z_i = z-standardisierter Wert
 x_i = Wert

\bar{x} = Mittelwert

s = Standardabweichung

Durch die z-Transformation liegt der neue Mittelwert immer bei 0 (sog. Mittelwertzentrierung) und die Standardabweichung für die Verteilung der z-Werte ist 1. So wird die Streuung nicht mehr über die Standardabweichung interpretiert, sondern nur noch über die jeweiligen z-Werte.

Die Ergebnisse der Clusteranalyse der Phonotephrite-Foidite sowie der Melanephelinite sind im Tabellenanhang, Tabelle 4 zusammengestellt.

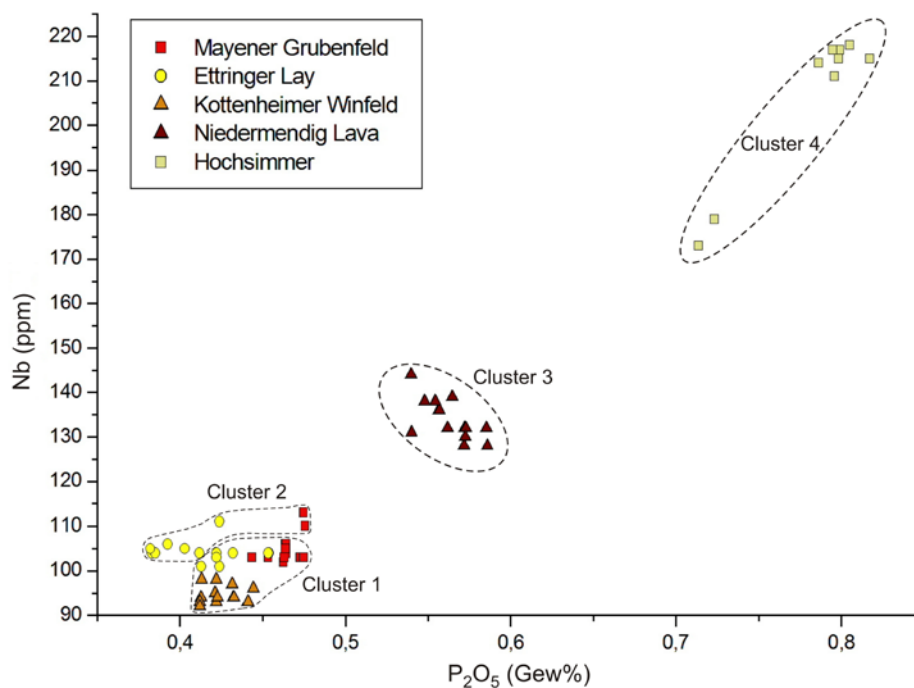


Abb. 27a: Resultat der Clusteranalyse der Phonotephrite/Nephelinit.

a) Cluster-Analyse der Phonotephrite und des Hochsimmer-Nephelinit

Die nicht-normalverteilten Merkmale MnO, Cr und Ga (siehe Kap. 3.4.3.1) fließen nicht in die Berechnung ein. Ausgehend davon, dass die Clusteranalyse die fünf Abbaustellen unterscheiden kann, wird überprüft, ob die 63 Proben in fünf korrekte Cluster eingeordnet werden. Die Tabelle „Cluster-Zugehörigkeit“ (Tabellenanhang, Tabelle 4a) zeigt, dass auf dem Niveau von fünf Clustern nicht zwischen den *Bellerberg*-Steinbrüchen *Mayener Grubenfeld*, *Ettringer Lay* und *Kottenheimer Winfeld* unterschieden wird, sondern diese Proben einem Cluster 1 bzw. Cluster 2 zuge-

ordnet werden. Die *Niedermendig* Lava wird als eigene Gruppe 3 erkannt. Die *Hochsimmer*-Lava wird in eine Gruppe 4 bzw. Gruppe 5 eingeteilt, wobei die beiden Proben der Gruppe 5 diejenigen sind, die sich innerhalb der Hochsimmer-Lava durch einen erhöhten MgO-Gehalt auszeichnen. Diese Proben werden jedoch in der Stufe von 4 Clustern mit den übrigen *Hochsimmer*-Proben zusammengefasst. Abb. 27a zeigt die Resultate der Clusteranalyse im Rahmen der P₂O₅-Nb-Zusammensetzung der Proben.

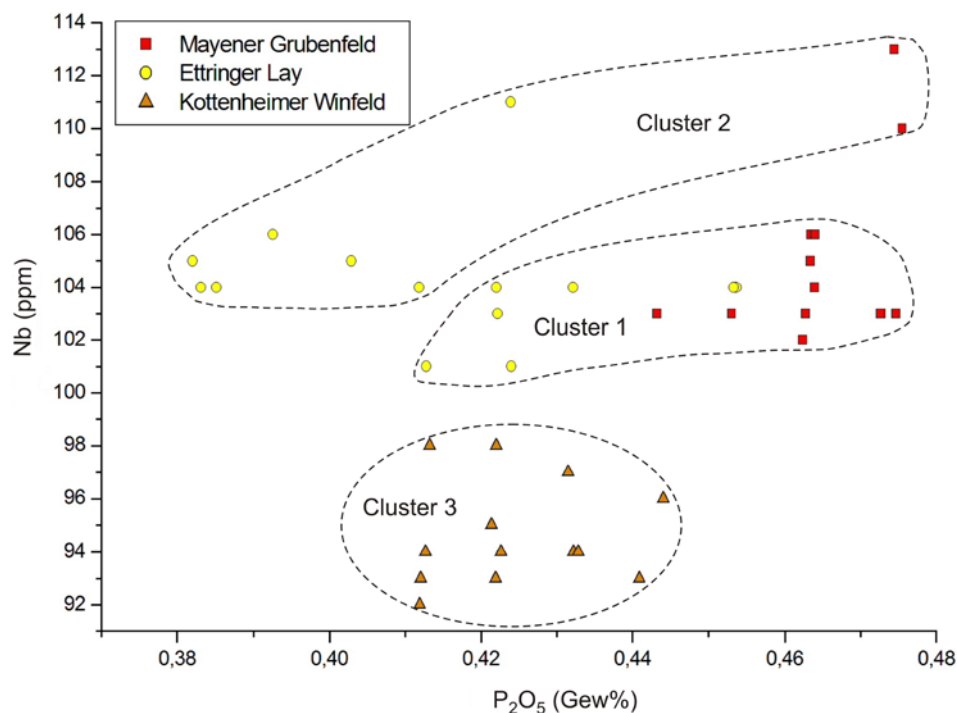


Abb. 27b: Resultat der Clusteranalyse der Bellerberg-Phonotephrite.

Rechnet man eine Clusteranalyse ausschließlich für die drei *Bellerberg*-Lavaströme (Tabellenanhang, Tabelle 4b), zeigt sich, dass Mayener Grubenfeld und Ettringer Lay noch immer in ein Cluster 1 bzw. Cluster 2 eingeordnet werden, dass aber das im Kottenheimer Lavastrom gelegene Winfeld als eigenes Cluster 3 erkannt wird (Abb. 27b).

b) Cluster-Analyse der Melanephelinite

Die nicht-normalverteilten Variablen MnO, K₂O und Ga wurden nicht in die Berechnung einbezogen (siehe Kap. 3.4.3.1). 135 Melanephelinit-Proben werden „geclustert“. Da 12 Steinbrüche aus 12 Laven analysiert werden, muss als erstes überprüft werden, ob die Zuordnung in 12 Cluster den Abbaustellen entspricht. Das

Ergebnis ist im Tabellenanhang, Tabelle 4c dargestellt, grafisch im Rahmen der P_2O_5 - und CaO-Gehalte der Proben (Abb. 28). Auf der Ebene von 12 Clustern werden 7 Abbaustellen korrekt erkannt. Die Clusteranalyse kann jedoch nicht *Hohe Buche* von *Mauerley* und *Dietzenley* von *Goosberg* unterscheiden, sondern ordnet sie jeweils in eine Gruppe ein. Die Mosenberg-Abbaustelle wird als ein Cluster identifiziert, enthält aber einen Ausreißer. Die Abbaustelle *Eichholz* wird in zwei unterschiedliche Gruppen unterteilt. Erst auf dem Niveau von 10 Clustern werden die *Eichholz*-Proben alle einer Gruppe zugeordnet, jedoch wird in diesem Schritt nicht mehr zwischen den *Herchenberg*- und den *Dietzenley-Flemmingshöhe*-Proben unterschieden. Die Proben *EiHo2*, *Mos3-2* und *GooBeT3* werden als Ausreißer identifiziert, da sie auch in den nächsten folgenden Clusterschritten konsequent einer falschen Gruppe zugeordnet werden. Abb.28 zeigt die Resultate der Clusteranalyse der Melanephelinite auf einem Niveau von 12 Clustern im bivariaten Plot von CaO zu P_2O_5 .

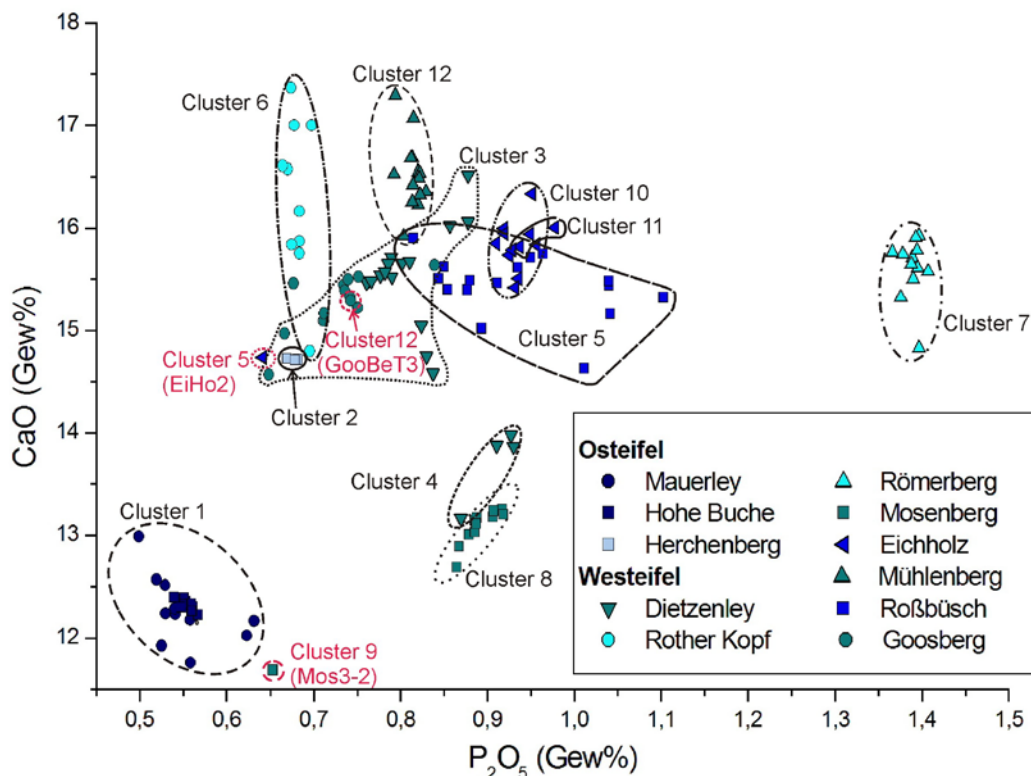


Abb. 28: Resultat der Clusteranalyse der Melanephelinite. Die rot markierten Proben werden als Ausreißer identifiziert und von der folgenden statistischen Auswertung ausgeschlossen.

3.4.3.3 Diskriminanzanalyse

Aufbauend auf den Resultaten der Clusteranalyse wird die Diskriminanzanalyse durchgeführt. Die Diskriminanzanalyse ist eine strukturprfende Methode zur Untersuchung von Gruppenunterschieden auf Basis einer Mehrzahl von Variablen. Die Voraussetzung zur Anwendung der Diskriminanzanalyse ist, dass die Merkmalsvariablen normalverteilt sind. Die Varianz-Kovarianz-Matrizen innerhalb der einzelnen Gruppen sollten im Vergleich zu denen der anderen Gruppen gleich gro sein. Außerdem darf jeder Fall nur zu einer Gruppe gehören, und alle Fälle müssen zu einer Gruppe gehören. Die Diskriminanzanalyse prüft zum einen, ob sich die vorgegebenen Gruppen hinsichtlich der Variablen signifikant voneinander unterscheiden, und zum anderen, welche Variablen zur Unterscheidung der Gruppen beitragen. Sie erklärt also die Abhängigkeit einer nominal skalierten Variablen (Gruppenzugehörigkeit) von metrisch skalierten Merkmalsvariablen. Die nominal skalierten Gruppenzugehörigkeiten entsprechen im vorliegenden Fall den einzelnen Abbaustellen, die metrischen Merkmalsvariablen sind die normalverteilten 10er logarithmierten Messwerte. Zudem ist es mittels der Diskriminanzanalyse möglich, ein neues Element, dessen Gruppenzugehörigkeit unbekannt ist, aufgrund seiner Merkmalsausprägung einer Gruppe zuzuordnen, hier also ein Mhlsteinfundstck zu seiner Abbaustelle. Wie auch die Clusteranalyse wird die Diskriminanzanalyse auf die beiden petrologischen Gruppen „Phonotephrite“ und „Melanephelinite“ getrennt durchgeführt. Dabei werden die Steinbrüche, die durch ihre geochemische Zusammensetzung bereits eindeutig charakterisiert sind, von der Diskriminanzfunktion ausgeschlossen: Dies gilt zum einen für den *Hochsimmer*-Nephelinit und die phonotephritische *Niedermendiger* Lava in der Osteifel, zum anderen für den *Römerberg*-Melanephelinit in der Westeifel.

Die Diskriminanzanalyse geht in zwei Schritten vor:

1. Schätzung der Diskriminanzfunktion

Die allgemeine Form der Diskriminanzfunktion lautet

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + \dots + b_n \cdot X_n$$

mit Y = Diskriminanzvariable

X_n = Merkmalsvariable ($n = 1, 2, \dots, N$)

b_n = Diskriminanzkoeffizient für Merkmalsvariable n

b_0 = Konstante

Im Mehr-Gruppen-Fall gibt es mehr als eine Diskriminanzfunktion. Bei G Gruppen resultieren G-1 Diskriminanzfunktionen.

Jede Gruppe hat einen mittleren Diskriminanzwert (Gruppenzentrumid):

$$\bar{Y}_g = \frac{1}{I_g} \sum_{i=1}^g Y_{gi}$$

mit I_g = Gruppengröße

Y_{gi} = Gruppenelemente

Die Schätzung der Diskriminanzkoeffizienten b_n verläuft so, dass optimal zwischen den Gruppen getrennt wird. Dazu wird das Diskriminanzkriterium Γ herangezogen, das die Unterschiedlichkeit zwischen den Gruppen „misst“. Das Diskriminanzkriterium berücksichtigt die Streuung einer Gruppe, denn die Unterscheidung zwischen den Gruppen fällt schlechter aus, sobald breite Streuung und damit große Überschneidungen vorliegen. Das Diskriminanzkriterium Γ lautet:

$$L = \frac{\sum_{g=1}^G I_g (\bar{Y}_g - \bar{Y})^2}{\sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^{I_g} (Y_{gi} - \bar{Y}_g)^2} = \frac{SS_b}{SS_w}$$

mit SS_b = sum of squares between, d.h. quadrierte Abweichung der Gruppenzentroiden vom Gesamtmittel. Darin der Faktor I_g , um unterschiedliche Gruppengröße zu berücksichtigen. SS_b ist die von der Diskriminanzfunktion „erklärte“ Streuung.

SS_w = sum of squares within. Quadrierte Abweichung der Gruppenelemente vom jeweiligen Gruppenzentrumid. SS_w entspricht der „nicht erklärten“ Streuung.

Das Ziel ist nun, die Diskriminanzfunktionskoeffizienten so zu wählen, dass Γ maximal wird, bzw. dass SS_w , die „nicht erklärte“ Streuung, minimal wird. Die Funktionswerte der einzelnen Gruppen werden sich dann möglichst deutlich voneinander unterscheiden.

2. Klassifizierung der Fälle

Grundannahme der Diskriminanzanalyse ist, dass ein Zusammenhang zwischen Gruppenzugehörigkeit und den Merkmalsvariablen besteht. Für die Fälle, die den einzelnen Gruppen zugeordnet werden, sollen je nach Gruppe möglichst unterschiedliche Funktionswerte resultieren. Es kann sich aber für jede der unterschiedlichen Gruppen ein und derselbe Funktionswert ergeben, jedoch für die jeweiligen Gruppen mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit. Die Fälle werden also entsprechend den unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten, mit denen sich ein Funktionswert für die verschiedenen Gruppen ergibt, zugeordnet. Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Fall mit dem Diskriminanzfunktionswert Y einer Gruppe G_i zugeordnet wird, wird als $P(G_i|Y)$ bezeichnet. Diese *a-posteriori*-Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zu einer Gruppe bei gegebenem Funktionswert wird für jeden Fall jeweils für jede der möglichen Gruppen berechnet. SPSS nutzt das *Bayes-Theorem* zur Berechnung der *a-posteriori*-Wahrscheinlichkeit. Sie setzt sich zusammen aus der *a-priori*-Wahrscheinlichkeit $P(G_i)$ und einer bedingten Wahrscheinlichkeit $P(Y|G_i)$:

- *a-priori*-Wahrscheinlichkeit $P(G_i)$: Wahrscheinlichkeit einer Gruppenzugehörigkeit ohne weitere Informationen; bei z.B. vier Gruppen liegt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fall i zu einer bestimmten Gruppe gehört bei $1/4$ bzw. 25%.
- bedingte Wahrscheinlichkeit $P(Y|G_i)$: Wahrscheinlichkeit eines Diskriminanzfunktionswertes Y für einen Fall, wenn dieser zu einer bestimmten Gruppe gehört.

Bayes-Theorem:
$$P(G_i|Y) = \frac{P(Y|G_i) \cdot P(G_i)}{\sum_{i=1}^g P(Y|G_i) \cdot P(G_i)}$$

Angesichts der Vielzahl der Merkmalsvariablen wird im vorliegenden Fall die schrittweise Diskriminanzanalyse angewendet. Dabei werden nur die Variablen in die Analyse aufgenommen, die sich zur Vorhersage der Gruppenzugehörigkeit am besten eignen. In der ersten Selektionsstufe wird aus allen Merkmalsvariablen eine ausgewählt, die ein bestimmtes Gtema optimiert. Im zweiten Schritt wird aus den bri-

gen Variablen eine neue gewählt, die wiederum das Selektionskriterium optimiert. Die zuvor aufgenommene Variable wird nun dahingehend überprüft, ob ihr Erklärungswert auch unter Einbeziehung der neuen Variable groß genug ist und ob sie in der Gleichung beibehalten wird. Genügt die Variable nicht mehr dem Selektionskriterium, wird sie aus der Gleichung gestrichen. Diese Prozedur wird fortgeführt, bis alle Merkmalsvariablen in das Modell aufgenommen sind, die übrigen nicht aufgenommenen Merkmalsvariablen dem Auswahlkriterium nicht entsprechen oder eine bestimmte Anzahl von Iterationsschritten erreicht ist. Als Auswahlkriterium wird hier Wilks' Lambda Λ angewendet. Wilks' Lambda ist der Quotient aus der Quadratsumme innerhalb der Gruppen und der gesamten Quadratsumme, ist also ein Maß für den Anteil der Streuung innerhalb der Gruppen an der gesamten Streuung. Wilks' Lambda ist ein inverses Gütemaß, d.h. kleine Werte bedeuten höhere Trennkraft der Diskriminanzfunktionen; bei der schrittweisen Selektion der Merkmalsvariablen werden also diejenigen gewählt, die das Auswahlkriterium Wilks' Lambda minimieren. F-Werte bestimmen die Aufnahme oder den Ausschluss einer Variable. Der F-Wert steht für die Signifikanz einer Variable hinsichtlich der Trennung zwischen den Gruppen. Die SPSS-Voreinstellungen der F-Werte zur Aufnahme (3,84) und Ausschluss (2,71) der Variablen werden beibehalten, nachdem sich gezeigt hat, dass eine Änderung der Werte die Diskriminanz nicht verbessert. Die wichtigsten Teile der SPSS-Ergebnisausgabe für die Diskriminanzanalyse der Phonotephrite sowie der Melanephelinite ist im Tabellenanhang, Tabelle 5, zusammengestellt. Eine kurze Erläuterung der Ergebnisausgabe findet sich in deren Anschluss.

Ob die Varianz-Kovarianz-Matrizen gleich sind, kann durch den Box'M-Test oder über Log-Determinanten der Kovarianzmatrix der Merkmalsvariablen (als Maß für die Streuung der Gruppen) geprüft werden. Da diese Tests aber als sehr von Stichprobenumfängen abhängig gelten und sehr sensibel auf eine nicht eingehaltene Normalverteilungs-Pflicht für die Variablen reagieren, werden zusätzlich die einzelnen Matrixelemente der gruppenspezifischen Varianz-Kovarianz-Matrizen verglichen. Die Varianz-Kovarianz der einen Gruppe soll die der anderen Gruppe nicht um mehr als das zehnfache übersteigen und die Vorzeichen sollten gleich sein.

a) Diskriminanzanalyse der *Bellerberg*-Phonotephrite

Die Ergebnisausgabe ist im Tabellenanhang in „Tabelle 5: Ergebnisse der Diskriminanzanalyse / a) *Bellerberg* Phonotephrite“ zusammengestellt. Die einzelnen Proben aus den jeweiligen Steinbrüchen bekommen folgende nominale Gruppierungsvariable (für ihre Gruppenzugehörigkeit) zugewiesen:

Mayener Grubenfeld = 1

Ettringer Lay = 2

Kottenheimer Winfeld = 3

Nb, P₂O₅, Sr, Rb und Zn werden in die beiden Diskriminanzfunktion aufgenommen (Tabelle „Variablen in der Analyse“). Die erste Diskriminanzfunktion repräsentiert 71,7% der Varianz, die zweite 28,3% (Tabelle „Eigenwerte“). Gemäß der Tabelle „Kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten“ lauten die beiden Diskriminanzfunktionen:

$$Y_{B1} = -533,59 + 26,805 \cdot P_2O_5 + 11,693 \cdot Zn + 34,574 \cdot Rb + 128,22 \cdot Sr + 31,154 \cdot Nb$$

$$Y_{B2} = 96,882 + 76,614 \cdot P_2O_5 - 48,259 \cdot Zn + 46,697 \cdot Rb + 30,021 \cdot Sr - 81,809 \cdot Nb$$

Die resultierenden Diskriminanzwerte für die beiden Funktionen finden sich in der Tabelle „Fallweise Statistiken“. Eine Grafik dieser beiden Diskriminanzfunktionen zeigt die gute Unterscheidung zwischen den *Bellerberg*-Steinbrüchen Mayener Grubenfeld, Ettringer Lay und Kottenheimer Winfeld (Abb. 29). Die Klassifizierungsergebnisse (siehe gleichnamige Tabelle) zeigen, dass 100% der ursprünglich gruppierten Fälle korrekt zugeordnet werden; die *a-posteriori*-Wahrscheinlichkeit $P(G=g|D=d)$ in der Tabelle „Fallweise Statistiken“ zeigt, dass ein Fall aus der Ettringer Lay mit der niedrigsten Wahrscheinlichkeit von nur 0,799 korrekt zugeordnet wurde, ein Fall mit 0,895 und einer mit 0,942. Drei Fälle wurden korrekt zugeordnet mit einer Wahrscheinlichkeit von $\geq 0,997$, der Rest mit 1,00. Die Kreuz validierung (d.h. jeder Fall wird einzeln klassifiziert, wobei er jeweils aus der Berechnung des Diskriminanzmodells ausgeschlossen wird) resultiert in 97,5% korrekte Klassifizierungen. Lediglich die Probe aus der Ettringer Lay mit der 0,799% Wahrscheinlichkeit wird fälschlicherweise dem Mayener Grubenfeld zugeordnet. Der Erklärungswert eines Merkmals für die Diskriminanz kann durch Korrelationskoeffizienten zwi-

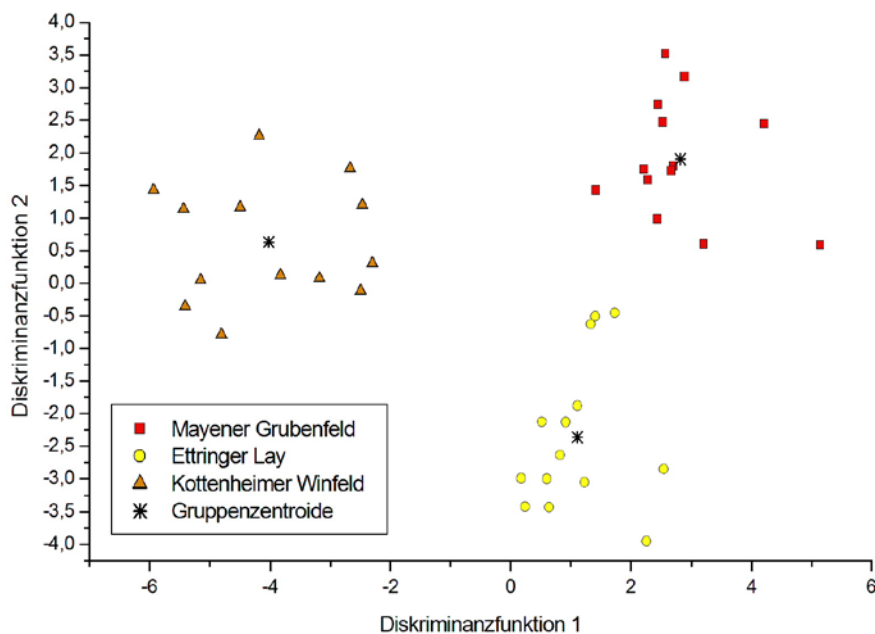


Abb. 29: Ergebnis der Diskriminanzanalyse der Bellerberg-Phonotephrite.

schen den einzelnen Merkmalen und den Diskriminanzfunktionen beschrieben werden. Die „Struktur-Matrix“ im Anhang führt diese Koeffizienten auf, die den Einfluss der einzelnen Elemente auf die Unterscheidung zwischen den Steinbrüchen widerspiegeln. Die Struktur-Matrix zeigt, dass die Elemente, die die Unterscheidung am meisten beeinflussen (in der Tabelle die Elemente mit dem höchsten Betrag), Nb in Funktion 1 und P₂O₅ in Funktion 2 sind. Bei der „Prüfung auf Gleichheit der Kovarianz-Matrizen“ zeigt sich, dass die Log-Determinanten relativ große Werte annehmen, d.h. dass die Gruppen recht variabel sind. Die Unterschiede zwischen den Log-Determinanten sind jedoch klein, geben also keinen Hinweis darauf, dass die Varianz-Kovarianz-Matrizen unterschiedlich sind. Der Box'M-Test hat jedoch eine Signifikanz von Null, d.h. bei einem Signifikanzniveau von 5% wird die Hypothese gleicher Varianz-Kovarianz-Matrizen abgelehnt. Bei dem Vergleich der Varianz-Kovarianz-Matrizen (nicht angegeben) zeigt sich, dass sich die Werte in ihren Vorzeichen sowie um mehr als das 10-fache unterscheiden, somit ist die Voraussetzung gleicher Varianz-Kovarianz-Matrizen nicht gegeben. Man kann jedoch überprüfen, wie sehr diese Abweichung von den Voraussetzungen das Diskriminanzmodell beeinflusst, indem man die Diskriminanzanalyse noch einmal auf Basis der gruppen-spezifischen Kovarianz-Matrizen rechnet und dann überprüft, ob sich die Ergebnisse von den ursprünglichen Berechnungen unterscheiden. Die Berechnung zeigt, dass die Klassifizierungsergebnisse die selben bleiben. Damit ist das Diskriminanzmodell trotz Ungleichheit der Varianz-Kovarianz-Matrizen anwendbar.

b) Diskriminanzanalyse der Melanephelinite

Die Ergebnisse sind im Tabellenanhang in „Tabelle 5: Ergebnisse der Diskriminanzanalyse / b) Melanephelinite“ aufgeführt. Insgesamt wird die Diskriminanzanalyse auf ein Set aus 120 Proben angewendet, die anhand der Clusteranalyse identifizierten Ausreißer EiHo2, Mos3-2 und GooBeT3 werden ausgeschlossen. Folgende nominale Gruppierungsvariablen wurden den einzelnen Steinbruchproben zugewiesen:

Hohe Buche = 1	Eichholz = 7
Mauerley = 2	Mühlenberg = 8
Dietzenley = 3	Goosberg = 9
Roßbüsch = 4	Herchenberg = 10
Rother Kopf = 5	Dietzenley/Flemmingshöhe = 11
Mosenberg = 6	

SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, CaO, P₂O₅, Cr, Ni, Cu, Zn, Sr, Zr, und Nb werden in die Diskriminanzfunktionen aufgenommen (Tabelle „Variablen in der Analyse“). Die erste Diskriminanzfunktion repräsentiert 43,3% der Varianz der Probenpopulation, die zweite 28,8% und die dritte 9,9% (Tabelle „Eigenwerte“). Die übrigen sieben Diskriminanzfunktionen repräsentieren insgesamt nur 18% der Varianz und können im Folgenden vernachlässigt werden. Die ersten drei Diskriminanzfunktionen lauten entsprechend Tabelle „Kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten“:

$$Y_{M1} = -111,11 - 18,469 \cdot \text{SiO}_2 - 21,999 \cdot \text{TiO}_2 + 153,453 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 64,163 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + \\ 112,791 \cdot \text{MgO} - 46,857 \cdot \text{CaO} - 3,271 \cdot \text{P}_2\text{O}_5 - 14,583 \cdot \text{Cr} - 0,891 \cdot \text{Ni} - 4,246 \cdot \text{Cu} \\ - 9,286 \cdot \text{Zn} + 8,768 \cdot \text{Sr} + 57,98 \cdot \text{Zr} - 53,838 \cdot \text{Nb}$$

$$Y_{M2} = 6,051 + 32,809 \cdot \text{SiO}_2 - 17,518 \cdot \text{TiO}_2 + 86,354 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 218,691 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + \\ 70,24 \cdot \text{MgO} - 7,028 \cdot \text{CaO} + 38,867 \cdot \text{P}_2\text{O}_5 + 3,669 \cdot \text{Cr} - 0,846 \cdot \text{Ni} - 0,871 \cdot \text{Cu} + \\ 6,148 \cdot \text{Zn} - 3,005 \cdot \text{Sr} - 7,747 \cdot \text{Zr} + 21,082 \cdot \text{Nb}$$

$$Y_{M3} = 151,136 - 35,805 \cdot \text{SiO}_2 + 111,241 \cdot \text{TiO}_2 - 47,937 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 43,598 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - \\ 72,943 \cdot \text{MgO} - 45,598 \cdot \text{CaO} + 20,292 \cdot \text{P}_2\text{O}_5 + 8,248 \cdot \text{Cr} + 26,863 \cdot \text{Ni} + 1,185 \cdot \text{Cu} \\ + 18,976 \cdot \text{Zn} + 12,361 \cdot \text{Sr} - 57,521 \cdot \text{Zr} - 10,96 \cdot \text{Nb}$$

Die Diskriminanzwerte der ersten beiden Diskriminanzfunktionen finden sich in der Tabelle „Fallweise Statistiken“. In Abb. 30 sind die beiden Funktionen aufgetragen;

es zeigt sich, dass sich die meisten Gruppen deutlich voneinander abgrenzen, die Gruppenzentroide von Gruppe 3 und 9 (*Dietzenley* und *Goosberg*) sowie die von Gruppe 1 und 2 (*Hohe Buche* und *Mauerley*) liegen jedoch sehr nahe beieinander. Dies spiegelt sich in den Klassifizierungsergebnissen wider: Insgesamt 98,3% der ursprünglich gruppierten Fälle wurden korrekt klassifiziert; eine Probe der *Mauerley* wurde fälschlicherweise der *Hohen Buche* zugeordnet und eine Probe vom *Goosberg* der *Dietzenley*. Eine Probe wurde mit einer Wahrscheinlichkeit von „nur“ 0,972 korrekt klassifiziert, eine mit 0,998 und zwei mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,999. Die übrigen 115 Proben wurden mit 100%iger Wahrscheinlichkeit richtig zugeordnet. In der Kreuzvalidierung wurden 97,5% der Fälle korrekt klassifiziert. Zwei der *Mauerley*-Proben wurden der *Hohen Buche* zugeordnet und wiederum eine *Goosberg*-Probe zur *Dietzenley*. Die „Struktur-Matrix“ zeigt, dass CaO den höchsten diskriminatorischen Einfluss in Funktion 1 besitzt, TiO₂ in Funktion 2 und Cr in Funktion 3.

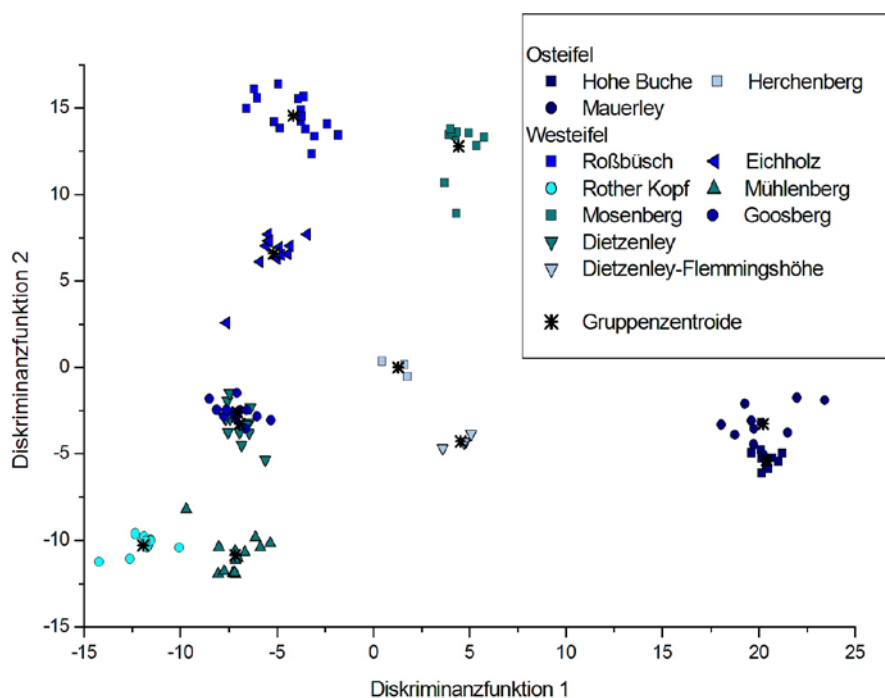


Abb. 30:
 Ergebnis der
 Diskriminanz-
 analyse der
 Melanephelinite.

Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl der Fälle innerhalb der einzelnen Gruppen eignen sich im Falle der Melanephelinite weder der Box'M-Test noch die Log-Determinanten zur Überprüfung der Gleichheit der Varianz-Kovarianz-Matrizen. Es bleibt nur der direkte Vergleich der Varianz-Kovarianz-Matrizen (nicht angegeben) bezüglich der Vorzeichen und der Dimension der Werte. Es zeigt sich auch hier, dass die Matrizen nicht gleich sind. Die Kontrollberechnung der Diskriminanzanalyse mittels gruppenspezifischer Kovarianz-Matrizen zeigt aber, dass sich die Klassifizierungser-

gebnisse nicht bedeutend verändert haben und der Einfluss der Ungleichheit der Varianz-Kovarianz-Matrizen vernachlässigbar ist. Demnach wird auf die Berechnung auf Basis der gruppenspezifischen Kovarianz-Matrizen verzichtet und auch im Falle der Melanephelinite das oben beschriebene Diskriminanzmodell beibehalten.

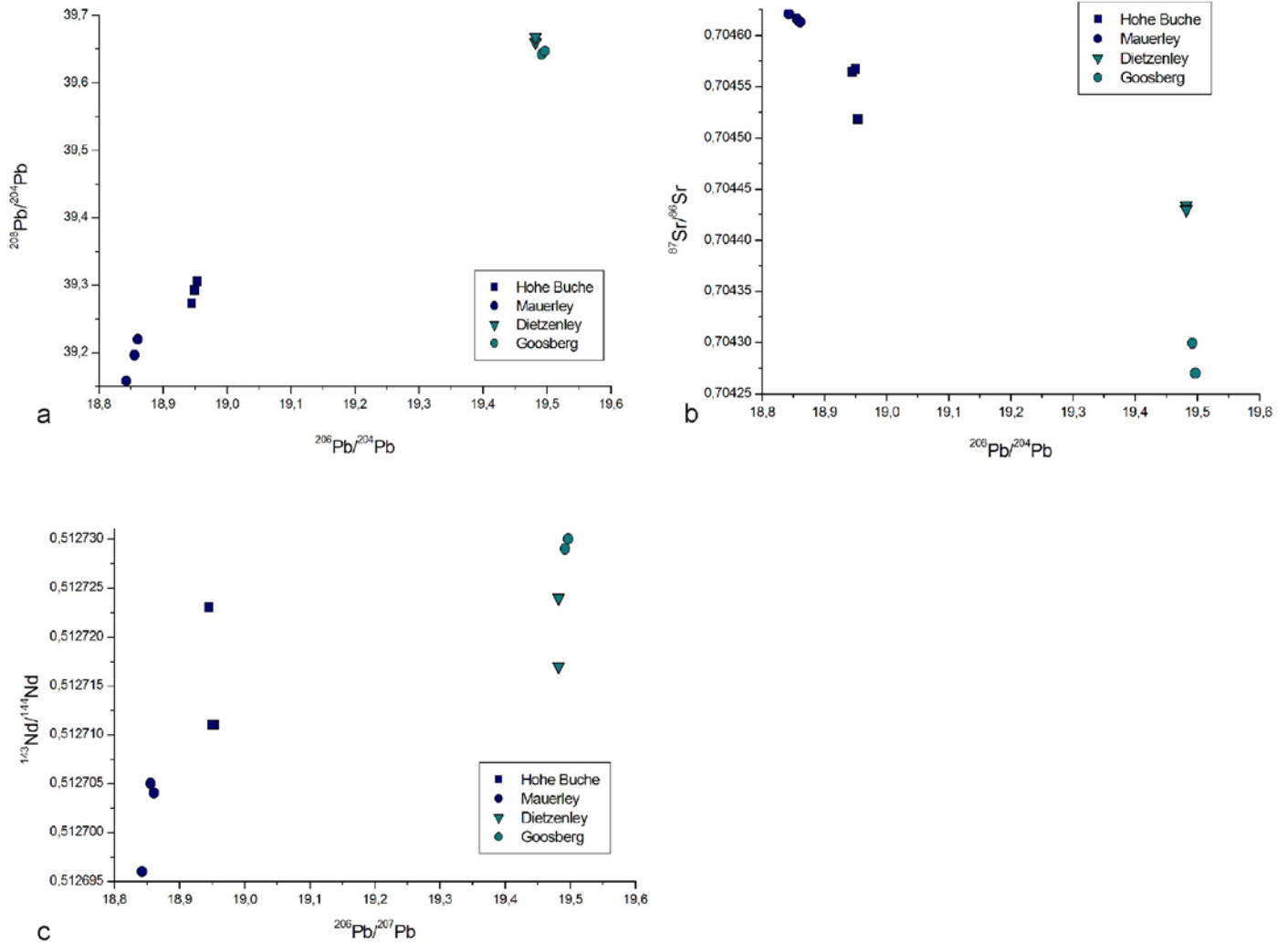
3.4.4 Sr-, Nd-, Pb-Isotopie

Eine Bestimmung der Isotopenverhältnisse wurde für die Abbaustellen vorgenommen, für die durch die Cluster- sowie Diskriminanzanalyse keine eindeutige Unterscheidung möglich ist. Während man die *Bellerberg*-Abbaustellen durch die vorgenommene Kombination der Analysemethoden als eindeutig charakterisiert betrachten kann, ist die für bestimmte Melanephelinit-Abbaustellen nicht der Fall. Es handelt sich dabei zum einen um *Mauerley* und *Hohe Buche* aus der Osteifel sowie *Dietzenley* und *Goosberg* aus der Westeifel. Die Clusteranalyse konnte diese Abbaustellen nicht unterscheiden, und in der Diskriminanzanalyse fanden unter diesen Abbaustellen jeweils die Fehlklassifizierungen statt. Um auch für diese Steinbrüche eine eindeutige Unterscheidung zu erreichen, wurde eine Sr-, Nd- und Pb-Isotopen-Bestimmung vorgenommen. Von *Mauerley* und *Hohe Buche* wurden jeweils 3, von *Dietzenley* und *Goosberg* jeweils zwei Proben analysiert. Die Resultate finden sich im Tabellenanhang, Tabelle 6. Abb. 31a zeigt, dass *Hohe Buche* und *Mauerley* hinsichtlich ihrer Pb-Isotopen-Zusammensetzung zwei unterschiedliche Gruppen bilden, wobei die *Hohe Buche*-Lava mehr radiogenes Blei enthält als die *Mauerley*. *Dietzenley* und *Goosberg* unterscheiden sich jedoch nicht deutlich in ihrer Pb-Isotopie. Anders ist dies in Abb. 31b: Bei ähnlicher Pb-Isotopenzusammensetzung lassen sich *Dietzenley* und *Goosberg* eindeutig anhand ihrer Sr-Isotopenzusammensetzung voneinander abgrenzen, wobei die *Dietzenley* einen höheren radiogenen Sr-Gehalt aufweist als der *Goosberg*. Entsprechendes gilt, wenn auch nicht so deutlich, für *Mauerley* und *Hohe Buche*, wobei sich letztere durch einen geringeren radiogenen Sr-Gehalt von der *Mauerley* abhebt. Im Rahmen ihrer Nd-Isotopenzusammensetzung (Abb. 31c) zeigen *Mauerley*, *Hohe Buche* und *Dietzenley* tendenziell eine größere „Streuung“ - sofern man bei dieser geringen Probenzahl davon sprechen kann - ihrer Zusammensetzung, zeigen aber, dass die *Hohe Buche*-Lava mehr radiogenes Nd enthält als die *Mauerley*-Lava, bzw. die *Goosberg*-Lava mehr als die Lava der *Dietzenley*. Insgesamt lässt sich feststellen, dass sich die Abbaustellen spätestens

3. Provenienzanalyse

3.4 Analyse der Mühlsteinbrüche: Ergebnisse und Charakterisierung

3.4.4 Sr-, Nd-, Pb-Isotopie



anhand ihrer Sr- und Pb- Zusammensetzung, aber weniger gut mittels ihrer Gehalte an radiogenem Nd charakterisieren lassen.

3.5 Analyse der Mühlsteine: Ergebnisse und Provenienz

3.5.1 Zuordnung der Fundstücke

3.5.1.1 Gesamtgesteinschemie

Insgesamt wurden 68 Mühlsteinfundstücke beprobt und analysiert. Die Fundstücke mit Herkunft und Datierung sind im Anhang D aufgelistet, die Resultate finden sich im Tabellenanhang, Tabelle 7. Im TAS-Diagramm (Abb. 32) zeigt sich, dass die meisten der Mühlsteine im Feld der Phono-Tephrite liegen, wobei einige im bergangsbe- reich zu basaltischem Trachyandesit zeichnen. Bei jeweils einer Probe handelt es sich um einen Phonolith, einen relativ Alkali-reichen Basanit und einen Pikrobasalt im Übergang zum Tephrit/Basanit. Drei Mühlen liegen im Basalt-Feld und eine Reihe von Proben scheint einen Trend von Trachybasalt bis Trachyandesit nachzuzeich- nen. Die Problematik der eindeutigen Zuordnung der Fundstücke zu ihren Abbaustel- len anhand bivariater Vergleiche wird in den Abbildungen 33a-d für die Hauptelemen- te sowie 34a-d für die Spurenelemente deutlich. Während das TAS-Diagramm zeigt, dass beispielsweise eine Westeifeler Herkunft für den Mühlstein am Übergang Teph- rit/Basanit zu Pikrobasalt möglich sein kann, schließt z.B. der CaO- oder Zn-Gehalt der Eifel-Melanephelinite eine Westeifeler Herkunft für alle beprobten Mühlsteine aus. Ein weiteres Beispiel, an dem das Problem der Zuordnung gut nachvollziehbar ist, ist Mühlstein NWSt2-188(2), in den Abbildungen 32-34 rot markiert. Im TAS- Dia- gramm liegt die Probe genau im Übergang von Phonotephrit zu basaltischem Trachyandesit. In ihrer übrigen Haupt- und Spurenelement-Zusammensetzung käme allerdings eine Zuordnung zu den Phonotephriten durchaus in Frage, da sie, wenn auch nie inmitten des Felds, unmittelbar bei diesen liegt. Eine sichere Zuordnung des Stücks NWSt2-188(2) auf dieser Basis ist nicht möglich. Betrachtet man sich zudem die Fundstück-Proben, die in den Haupt- und Spurenelementen in der Umgebung der Eifeler Phonotephrite zeichnen, ist es unmöglich festzustellen, welche der Mühlstein- Proben dem Eifel-Feld noch hinzugezählt werden dürfen oder ab wann das Fund- stück zu sehr abweicht und eine entsprechende Herkunft ausgeschlossen werden muss. Selbst für den Fall, dass die Mühlstein-Proben einem Eifeler Gesteinstyp im TAS-Diagramm zuzuordnen sind oder in einem der in den Abbildungen 33 und 34 markierten Eifeler Haupt- oder Spurenelement-Felder liegen, ist nicht sicher, ob sie wirklich aus der Eifel stammen oder ihren Ursprung in einem Lavavorkommen aus

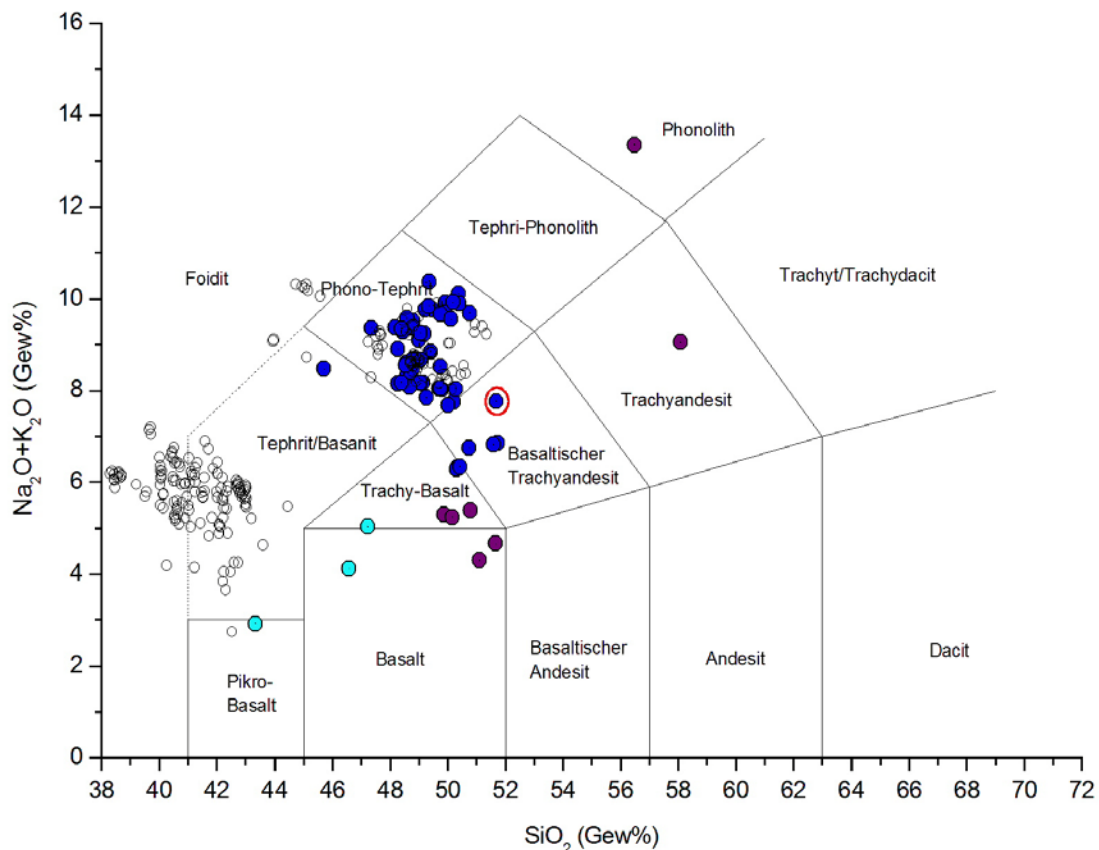


Abb. 32: Einordnung der Mühlstein-Fundstücke (farbige Punkte) ins TAS-Diagramm. Zum Vergleich sind die Werte der Eifeler Abbaustellen (ungefüllte Kreise) angegeben. Anhand der rot markierten Mühlsteinprobe soll die Problematik der Zuordnung demonstriert werden. Dunkelblaue Markierung: Clusteranalyse mit den Phonotephrit-Steinbrüchen. Hellblaue Markierung: Clusteranalyse mit den Melanephelinit-Steinbrüchen. Violette Markierung: Eifeler Herkunft ausgeschlossen, es wird keine Clusteranalyse vorgenommen.

einer anderen Region haben, das aufgrund einer ähnlichen chemischen Zusammensetzung in den entsprechenden Diagrammen die selben Felder belegt. Selbst wenn eine Eifeler Herkunft gesichert wäre, wäre aufgrund der Überschneidungen der meisten Vorkommen in ihrer geochemischen Zusammensetzung eine eindeutige Zuordnung eines Fundstückes zu seiner Abbaustelle so nicht möglich. Die Auswertung der Mühlsteinproben im TAS-Diagramm, ggf. ergänzt durch einen Abgleich mit den Eifeler Abbaustellen anhand weiterer chemischer Komponenten ist jedoch unerlässlich für die weiterführenden Schritte zur Provenienzanalyse. Im TAS-Diagramm wird überprüft, ob für das Fundstück überhaupt eine Eifeler Herkunft in Frage kommt, ob es dann den Phonotephrit-Abbaustellen oder den Melanephelinit-Abbaustellen entspricht, oder ob es aus einem Gesteinstyp besteht, der nicht in der Eifel vorkommt oder aus dem keine der Abbaustellen zusammengesetzt ist.

3. Provenienzanalyse
 3.5 Analyse der Mühlsteine: Ergebnisse und Provenienz
 3.5.1 Zuordnung der Fundstücke
 3.5.1.1 Gesamtgesteinschemie

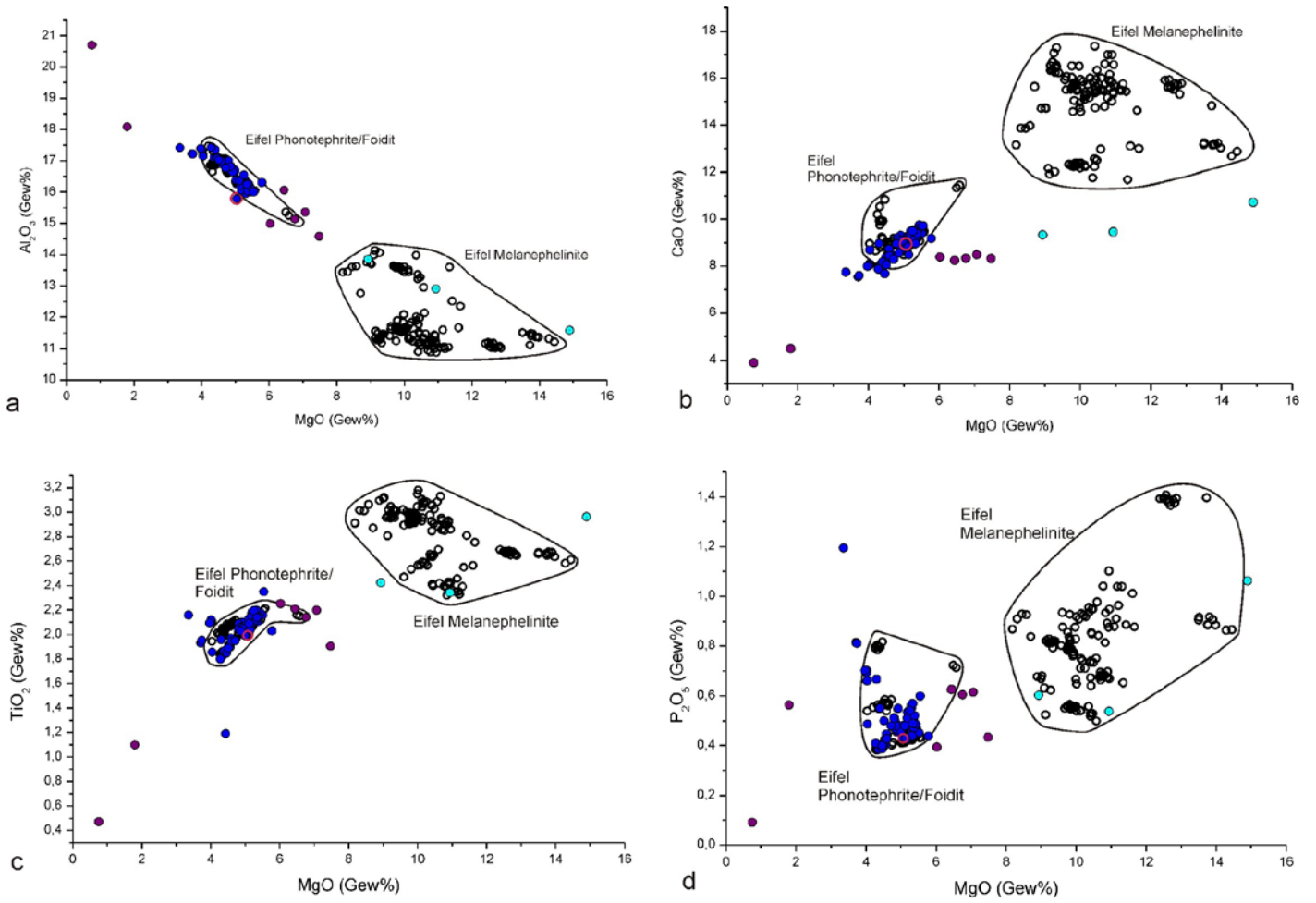
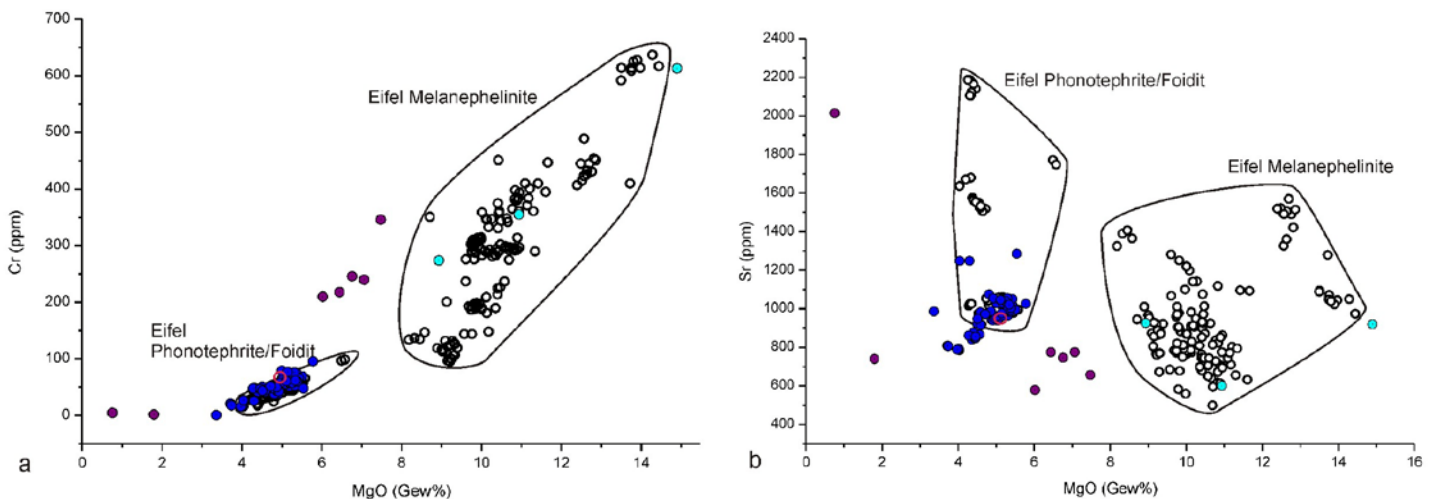


Abb. 33 a-d: Hauptelement-Zusammensetzung der Mühlstein-Fundstücke (dunkelblaue Markierung: Clusteranalyse mit Phonotephriten, hellblaue Markierung: Clusteranalyse mit Melanepheliniten, violette Markierung: Eifeler Herkunft nach TAS ausgeschlossen) im Vergleich zu den Eifeler Abbaustellen (schwarze Kreise).



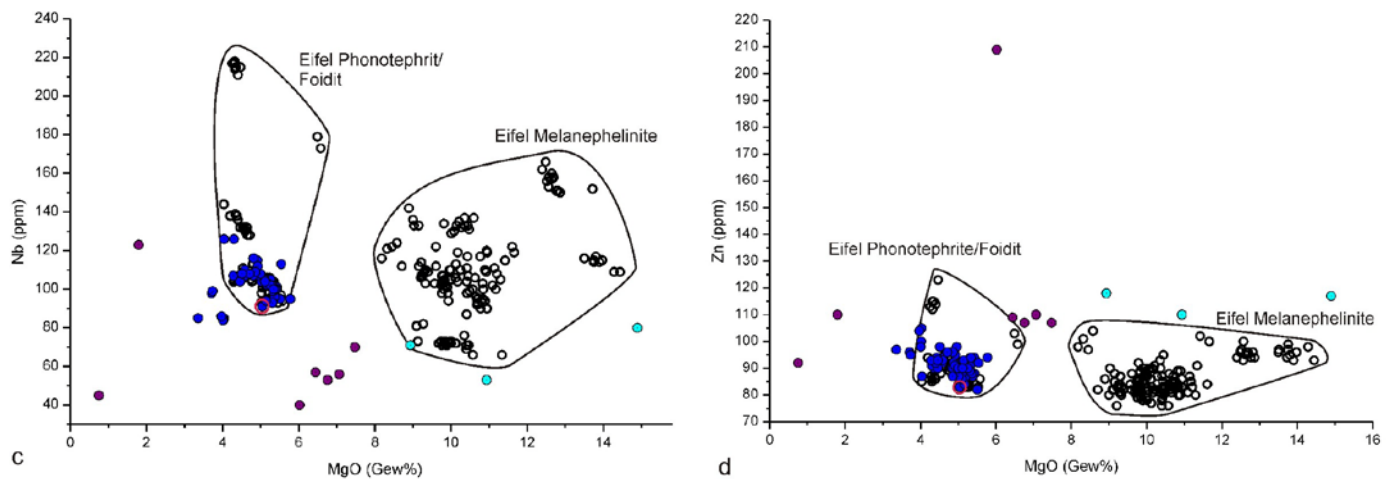


Abb. 34 a-d (a und b vorige Seite): Spurenelementzusammensetzung der Mühlsteine (dunkelblaue Markierung: Clusteranalyse mit Phonotephriten, hellblaue Markierung: Clusteranalyse mit Melanepheliniten, violette Markierung: Eifeler Herkunft nach TAS ausgeschlossen) im Vergleich zu den Eifeler Abbaustellen (schwarze Kreise).

3.5.2.1 Clusteranalyse

Wenn gemäß dem TAS-Diagramm eine Eifeler Herkunft in Frage kommt, wird im ersten Schritt der Zuordnung durch multivariate Methoden die Clusteranalyse durchgeführt. Die Clusteranalyse gewährleistet, dass das Mühlstein-Fundstück so behandelt wird, als sei seine Herkunft unbekannt. Anhand der Clusteranalyse kann überprüft werden, ob das Mühlstein-Fundstück zu einem der existierenden Cluster der Eifel-Abbaustellen gezählt werden kann, oder ob es einen eigenen Cluster bildet, was bedeutet, dass es zu keinem der untersuchten Abbaustellen gehört und demnach nicht aus der Eifel kommt.

Die Cluster-Methoden entsprechen den in Kapitel 3.4.3.2 beschriebenen: Als Distanzma dient die quadrierte Euklidische Distanz, der Ward-Algorithmus wird als Fusionierungsalgorithmus herangezogen, die Werte werden zuvor z-transformiert. Die 10er log-Werte der Mühlstein-Proben werden jeweils einzeln zusammen mit der Untergruppe der Phonotephrite/Nephelinit oder der Melanephelinite „geclustert“, je nachdem, welcher sie entsprechend dem TAS-Diagramm zugeordnet werden. Mit welcher Untergruppe welche Mühlsteine gemeinsam „geclustert“ werden, ist im TAS-Diagramm in Abb. 32 markiert. Dabei ist zu beachten, dass das Feld für die Stücke, für die eine Clusteranalyse durchgeführt wird, sehr weit gespannt ist und auch Mühlsteine umfasst, die nicht mehr als Phonotephrite bzw. Melanephelinite gelten.

Damit werden zur Sicherheit mittels Clusteranalyse auch die Fundstücke auf eine Eifeler Herkunft überprüft, die im TAS bereits eine deutliche Abweichung von den Abbaustellen zeigen.

a) Clusteranalyse der „phonotephritischen“ Mühlstein-Fundstücke

Für die Gruppe der Phonotephrite und des *Hochsimmer*-Nephelinits wird entsprechend der Resultate der Clusteranalyse der Abbaustellen in Kap. 3.4.3.2 im ersten Schritt die Zuordnung der jeweiligen Mhlsteinprobe auf einer Ebene von 4 Clustern (dabei repräsentieren Mayener Grubenfeld, Ettringer Lay und Kottenheimer Winfeld Cluster 1 bzw. 2, Niedermendig Lava Cluster 3, Hochsimmer Cluster 4) berprft. Damit wird die Clusteranalyse jedes Mal für 63 Steinbruchproben und eine Mhlsteinprobe durchgeführt. Die folgende Tabelle „Clusteranalyse“ (S. 97/98) fasst die Ergebnisse zusammen, graphisch dargestellt sind die Ergebnisse in Abb. 35a. Die Auswertung der Clusteranalyse ergibt, dass für einige Mühlsteine eine Herkunft aus den Steinbrüchen *Mayener Grubenfeld*, *Ettringer Lay*, *Kottenheimer Winfeld*, *Niedermendig* und *Hochsimmer* ausgeschlossen werden kann. Es handelt sich dabei um die Probe aus Bassou, Meta und Catillus aus Burgile, den Mühlstein aus Longwic und die Bibracte-Proben 28.57, 538.8 und 984.2. Alle anderen Proben werden zu Cluster 1 oder Cluster 2 geordnet, die undifferenziert die *Bellerberg*-Abbaustellen

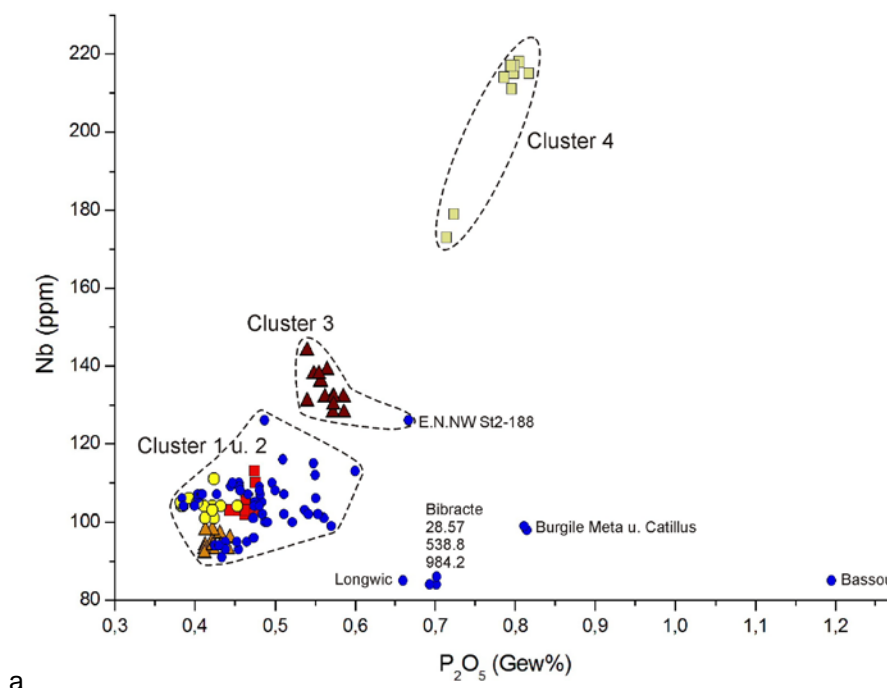
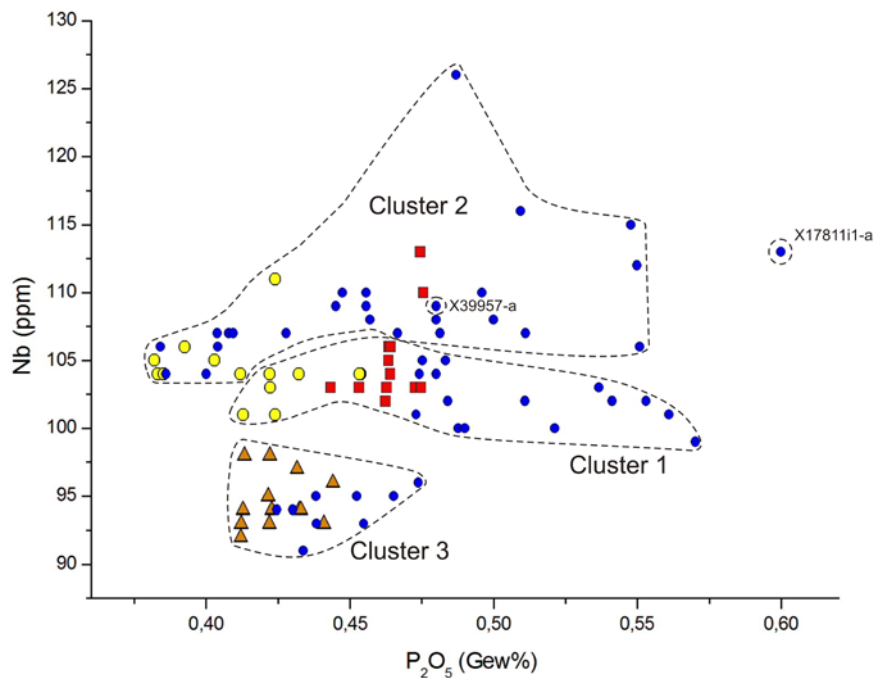


Abb. 35: Clusteranalyse der „phonotephritischen“ Mühlstein-Fundstücke; a: Clusteranalyse der Fundstücke mit den Abbaustellen der Bellerbergs, der Niedermendig-Lava und der Hochsimmer-Foidits, b (folgende Seite): Clusteranalyse der Fundstücke mit den Bellerberg-Phonotephriten.

a



b

Mayener Grubenfeld, *Ettringer Lay*, und *Kottenheimer Winfeld* repräsentieren, abgesehen von Probe NW St 2-188 aus dem Kloster von Erfstadt-Niederberg, die in das Cluster der Niedermendig Lava gruppiert wird.

In Kap. 3.4.3.2 wurde gezeigt, dass durch die Clusteranalyse der *Bellerberg*-Abbaustellen lediglich das *Kottenheimer Winfeld* als eigene Gruppe erkannt wird. Aus diesem Grund wird in einem zweiten Schritt gepruft, ob sich von den Mühlsteinen, die den *Bellerberg*-Laven zugeordnet wurden, einige dem *Kottenheimer Winfeld* bereits in der Clusteranalyse zuzuweisen sind. Die Analyse wird für die 40 *Bellerberg*-Proben und die jeweilige Mühlstein-Probe gerechnet. Die Clusterzugehörigkeit auf der Ebene von drei Clustern entsprechend den drei Abbaustellen wird berpruft. Abb. 35 b stellt die Ergebnisse dar.

In der folgenden Tabelle „Clusteranalyse“ (S. 97/98, Spalte 4.) ist zusammengefasst, dass einige Mhlsteinproben durchaus dem *Kottenheimer Winfeld*-Cluster 3 zugeordnet werden können, während die übrigen Proben wiederum den Clustern 1 und 2 zugewiesen werden, die das *Mayener Grubenfeld* und die *Ettringer Lay* umfassen. Bei zwei Proben zeigt sich jedoch durch diesen zweiten Cluster-Schritt, dass eine Herkunft aus den *Bellerberg*-Lavaströmen abgelehnt werden muss: Die beiden Xantener Proben X17811i1-a und X39957-a wurden im ersten Clusterdurchgang

3. Provenienzanalyse
 3.5 Analyse der Mühlsteine: Ergebnisse und Provenienz
 3.5.1 Zuordnung der Fundstücke
 3.5.1.2 Clusteranalyse

noch dem *Bellerberg* zugewiesen; beim Versuch einer genaueren Zuordnung im zweiten

Clusteranalyse

	Schritte:	1. Eifel Herkunft nach TAS möglich?	2. Falls Eifel: welche Untergruppe?	3. Clusteranalyse mit Phonotephrit/ Nephelinit: Resultate	4. Wenn <i>Bellerberg</i> ja, dann Clusteranalyse mit <i>Bellerberg</i> : Resultate	5. Clusteranalyse mit Melanepheliniten: Resultate
	Proben:					
1	Most	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
2	Kolin	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
3	Bassou	ja	Phonoteph./Foid.	5	-	-
4	Mirebeau	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	1 (M.G. oder E.L.)	-
5	Bonn698-119	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
6	Bonn1276-13	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	1 (M.G. oder E.L.)	-
7	Bonn698-120	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
8	Bonn698-278	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	3 (K.W.)	-
9	NWSt2-188	ja	Phonoteph./Foid.	3 (Niederm. Lava)	-	-
10	NWSt2-188(2)	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	3 (K.W.)	-
11	NWSt2-138	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
12	NW ohne Nr.	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	3 (K.W.)	-
13	SS1007	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	3 (K.W.)	-
14	SS1078	nein	-		-	-
15	SS1201	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	3 (K.W.)	-
16	ZS1101	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	1 (M.G. oder E.L.)	-
17	ZS1301	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	1 (M.G. oder E.L.)	-
18	ZS1213	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
19	Off	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	1 (M.G. oder E.L.)	-
20	Burg-Cat	ja	Phonoteph./Foid.	5	-	-
21	Burg-Meta	ja	Phonoteph./Foid.	5	-	-
22	Longvic	ja	Phonoteph./Foid.	5	-	-
23	Pratz	ja	Melanephelinite	-	-	13 (keine Eifel)
24	PrST 252	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
25	PrST 250	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	1 (M.G. oder E.L.)	-
26	PrST 247 A	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
27	PrST 247 B	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	3 (K.W.)	-
28	Bib 5.0.8	ja	Melanephelinite	-	-	13 (keine Eifel)
29	Bib 5.6.37	nein	-	-	-	-
30	Bib 28.57	ja	Phonoteph./Foid.	5	-	-
31	Bib 538.8	ja	Phonoteph./Foid.	5	-	-
32	Bib 984.2	ja	Phonoteph./Foid.	5	-	-
33	Hal Hand	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
34	Hal pomp.	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
35	N Frag1	nein	-	-	-	-
36	NO Frag2	nein	-	-	-	-
37	N Frag3	nein	-	-	-	-
38	Car pomp.	nein	-	-	-	-
39	Cam 18558	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
40	BaHa F47	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
41	BaHa F48	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	1 (M.G. oder E.L.)	-
42	OA 78.122	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
43	OA GR 151	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	3 (K.W.)	-
44	An 90.386m	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
45	An 94.232	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
46	An 92.016	nein	-	-	-	-
47	Salz 1	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	1 (M.G. oder E.L.)	-
48	Salz 24	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
49	Salz 3	ja	Phonoteph./Foid.	-	-	13 (keine Eifel)
50	Salz 4	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	1 (M.G. oder E.L.)	-

3. Provenienzanalyse
 3.5 Analyse der Mühlsteine: Ergebnisse und Provenienz
 3.5.1 Zuordnung der Fundstücke
 3.5.1.2 Clusteranalyse

51	Bie 980,59	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	1 (M.G. oder E.L.)	-
52	Bie 130	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
53	H 232	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	1 (M.G. oder E.L.)	-
54	H 177-a	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	1 (M.G. oder E.L.)	-
55	H 177-b	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
56	Gra-H	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	1 (M.G. oder E.L.)	-
57	W-H	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	1 (M.G. oder E.L.)	-
58	Kirch 162	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
59	Eng198	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
60	X 17701	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
61	X 37542	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	3 (K.W.)	-
62	X 17892	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	1 (M.G. oder E.L.)	-
63	X 39444	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	1 (M.G. oder E.L.)	-
64	X 17811i1-a	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	4 (keine Eifel)	-
65	X 17811i1-b	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
66	X 39957-a	ja	Phonoteph./Foid.	1 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
67	X 39957-b	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-
68	X 39957-c	ja	Phonoteph./Foid.	2 (Bellerberg-Lava)	2 (M.G. oder E.L.)	-

Phonoteph./Foid. = Phonotephrite / Hochsimmer-Foidit

M.G. = Mayener Grubenfeld

Abkürzungen: E.L. = Ettringer Lay

K.W. = Kottenheimer Winfeld

Niedermen. Lava = Niedermendig Lava

Tabelle 1: Schritte und Zusammenfassung der Resultate der Clusteranalyse der einzelnen Mühlsteinfundstücke.

Durchgang ergibt sich jedoch, dass diese beiden Mühlsteine jeweils ein eigenes Cluster bilden. Vergleicht man die geochemische Zusammensetzung mit der Zusammensetzung der *Bellerberg-Laven* wird deutlich, dass sich Mühlstein X39957-a in allen Haupt- und Spurenelement-Werten hervorragend mit den Laven des *Bellerbergs*, insbesondere mit denen des *Mayener* und *Ettringer Lavastroms*, deckt. Die einzigen gravierenden Abweichungen zeigen sich im Co- und Cu-Gehalt, die in dem Mühlstein drastisch und für Phonotephrite untypisch erhöht sind. Da Co und Cu typische Elemente für Metall-Legierungen sind, ist in diesem Fall davon auszugehen, dass es sich dabei um Kontamination der Probe handelt, wahrscheinlich durch die Aufbereitung. Rechnet man eine Clusteranalyse der Probe X39957-a zusammen mit den *Bellerberg-Laven* unter Ausschluss der log-trans-Werte von Co und Cu ergibt sich, dass der Mühlstein dem Cluster 2, also dem *Mayener Grubenfeld* bzw. der *Ettringer Lay*, zugeordnet wird. Die Xantener Probe X17811i1-a hingegen zeigt bereits in ihren Gehalten an SiO₂, TiO₂ und P₂O₅ gewisse Abweichungen von den *Bellerberg-Laven*, so dass ein Ausschluss dieses Mühlsteins von den *Bellerberg-Laven* auf Basis der Clusteranalyse plausibel erscheint. Diese Mühle entstammt also wahrscheinlich einem fremden Steinbruch, dessen Chemismus dem der *Bellerberg-Laven* sehr ähnlich sein muss.

b) Clusteranalyse der „melanephelinitischen“ Fundstücke

Zur Prüfung einer möglichen Herkunft aus den Melanephelinit-Abbaustellen werden nur drei Proben herangezogen, wobei das TAS-Diagramm (Abb. 32) sowie die CaO- und Zn-Gehalte in Abb. 33b und 34d bereits darauf hinweisen, dass eine entsprechende Provenienz unwahrscheinlich ist. Diese Annahme soll mittels der Clusteranalyse gesichert werden. Für die Gruppe der Melanephelinite wird die Zuordnung der einzelnen Mhlsteinproben gemäß den Resultaten aus Kap. 3.4.3.2 auf einer Ebene von 12 Clustern untersucht. Die obige Tabelle „Clusteranalyse“ stellt zusammenfassend die Ergebnisse der Clusteranalyse für die Mhlsteinproben dar. Die Clusteranalyse ergibt, dass diese Fundstücke bis zur Ebene von 10 Clustern jeweils eine eigene Gruppe bilden und sich nicht den Abbaustellen zuordnen lassen. Eine Eifeler Herkunft kann für diese Fundstücke also ausgeschlossen werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Clusteranalyse die Proben deutlich als eigenes Cluster „erkennt“, für die bereits auf Basis der geochemischen Zusammensetzung eine Eifeler Provenienz unwahrscheinlich war. Alle 50 Proben, die gemäß der Clusteranalyse aus der Eifel stammen, können den Abbaustellen des *Bellerbergs* zugeordnet werden. Die Clusteranalyse ist jedoch nicht in der Lage, eindeutig zwischen den einzelnen *Bellerberg*-Steinbrüchen zu unterscheiden. Einzige Ausnahme von der allgemeinen *Bellerberg*-Provenienz bildet ein Mühlstein aus Erftstadt-Niederberg, der aus *Niedermendig*-Lava hergestellt wurde. Keines der untersuchten Fundstücke entstammt den Eifeler Melanepheliniten.

3.5.2.2 Diskriminanzanalyse

Die Diskriminanzanalyse kann benutzt werden, um unbekannte Elemente zu bekannten Gruppen zu klassifizieren. Um die unbekannte Herkunft der Mühlsteine so genau wie möglich feststellen zu können, soll die Diskriminanzanalyse auf die Mühlsteine angewendet werden, die gemäß der Clusteranalyse der *Bellerberg*-Lava zuzuordnen sind.

Zur Zuordnung der unbekanntenen Elemente werden die beiden Diskriminanzfunktionen Y_{B1} und Y_{B2} herangezogen, die in Kap. 3.4.3.3 zur Unterscheidung zwischen den

Bellerberg-Lavaströmen ermittelt wurden. Die korrespondierenden log-10 transformierten Werte der jeweiligen Fundstücke werden in die beiden Funktionen eingesetzt und ergeben für jedes Fundstück i einen Wert Y_{i1} und Y_{i2} . Die Klassifikation erfolgt mittels des Distanzkonzepts: Die quadrierten Euklidischen Distanzen zu den Gruppenzentroiden werden errechnet und das unbekannte Element der Gruppe zugeordnet, zu deren Gruppenzentroid es die geringste Distanz aufweist.

Die quadrierte Euklidische Distanz des unbekanntes Elements i zum Gruppenzentroid errechnet sich für jede Gruppe g folgendermaßen:

$$D_{ig}^2 = \sum_{k=1}^K (Y_{ki} - \bar{Y}_{kg})^2 \quad (g = 1, \dots, G)$$

mit D_{ig}^2 = quadrierte euklidische Distanz im Diskriminanzraum
 Y_{ki} = Diskriminanzwert von Element i bezüglich Diskriminanzfunktion k
 \bar{Y}_{kg} = Gruppenzentroid von Gruppe g bezüglich Diskriminanzfunktion k

Darüber hinaus kann für jedes Element i die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, mit der es der Gruppe g angehört. Die Klassifizierungswahrscheinlichkeit $P(g|Y_i)$ zu Gruppe g errechnet sich zu:

$$P(g|Y_i) = \frac{\exp(-D_{ig}^2 / 2)}{\sum_{g=1}^G \exp(-D_{ig}^2 / 2)}$$

Dabei wird vorausgesetzt, dass die *a-priori*-Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit von Element i zu Gruppe g bei allen Gruppen gleich ist. Tabelle 8 im Tabellenanhang stellt die Ergebnisse der Klassifizierung der unbekanntes Mühlsteinfundstücke zusammen, graphisch sind die Resultate dargestellt in Abb. 36.

Von den 49 Mühlsteinen, die mittels Clusteranalyse dem *Bellerberg* zugeordnet wurden, werden mittels Diskriminanzanalyse 29 Fundstücke dem *Mayener Grubenfeld* zugeordnet. Die Wahrscheinlichkeit für die Zugehörigkeit beträgt für 23 Fälle 100%, für drei Fälle > 99,8%, für einen Fall 96,54%. Ein Fall wird mit 81,09%iger Wahrscheinlichkeit dem *Mayener Grubenfeld* zugeordnet, zu 18,88% gehört der Fall zur

Ettringer Lay. Die unsicherste Zuordnung besteht für einen Fall, dessen Abstände zu den entsprechenden Gruppenzentroiden nahezu gleich sind: Eine Probe aus Anreppen (An 90.386m) stammt nur zu 54,25% aus dem *Mayener Grubenfeld* und zu 45,75% aus der *Ettringer Lay*. Fünf Mühlsteine wurden aus der Lava der *Ettringer Lay* hergestellt. Die Wahrscheinlichkeiten der Zugehörigkeit betragen jedoch in nur zwei Fällen > 90%, eine wird mit 87,87%iger Wahrscheinlichkeit der *Ettringer Lay* zugeordnet, die aber auch zu 12,13% aus dem *Kottenheimer Winfeld* stammen könnte. Eine Probe gehört zu 80,61% zur *Ettringer Lay*, wird aber zu 19,39% dem *Kottenheimer Winfeld* zugeordnet. Die geringste Wahrscheinlichkeit, mit der ein Fundstück zur *Ettringer Lay* klassifiziert wird, betrifft eine Probe aus Barkhausen (BaHa F48), die zu 70,16% zur *Ettringer Lay* geordnet wird und zu 25,79% zum *Mayener Grubenfeld*. Die übrigen 15 Fundstücke werden dem *Kottenheimer Winfeld* zugewiesen, davon 13 mit 100%iger Sicherheit und eine mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,64%. Eine Probe aus Anreppen (An 94.232) wurde zu 74,58% aus der Lava des *Kottenheimer* Lavastroms produziert und zu 25,42% aus der Lava der *Ettringer Lay*.

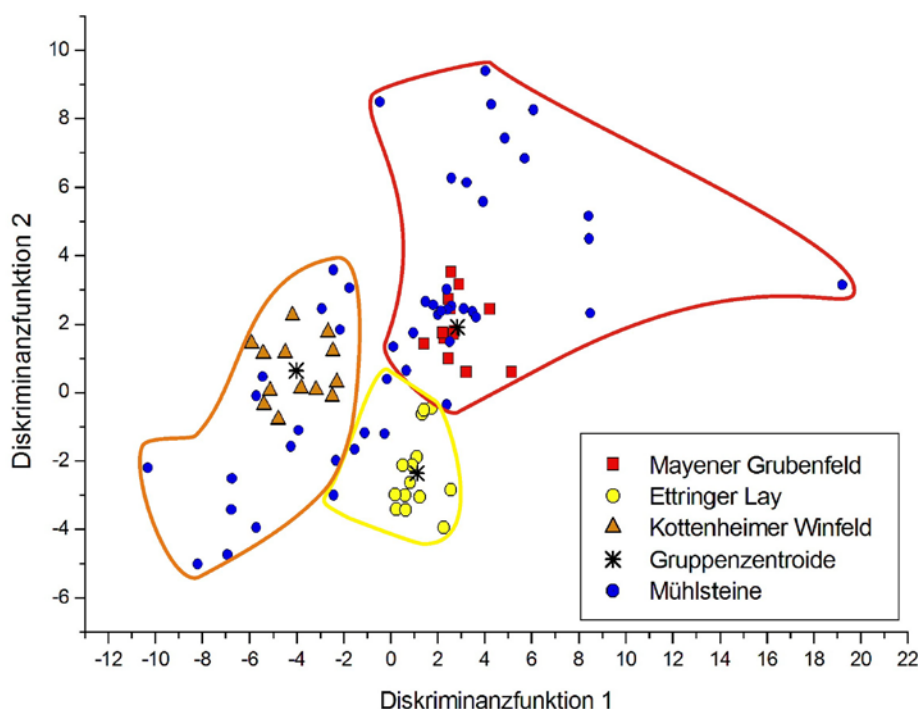


Abb. 36: Resultate der Klassifizierung der Mühlsteine über die Diskriminanzfunktionen. Die Zugehörigkeit der einzelnen Fundstücke wird durch die farbige Markierung gekennzeichnet: rot: Mayener Grubenfeld, gelb: Ettringer Lay, orange: Kottenheimer Winfeld.

Vergleicht man die Resultate der Zuordnung über die Diskriminanzfunktionen mit denen der Clusteranalyse zeigt sich, dass mittels der Diskriminanzfunktionen mehr Proben ins *Kottenheimer Winfeld* klassifiziert werden als mittels Clusteranalyse. Umgekehrt wurden jedoch alle Proben, die die Clusteranalyse in das *Kottenheimer*

Winfeld gruppierte, auch anhand der Diskriminanzfunktionen dort eingeordnet. Einzige Ausnahme bildet Probe BaHa F48. Aus den Diskriminanzfunktionen resultiert, dass BaHa F48 der *Ettringer Lay* (oder mit geringerer Wahrscheinlichkeit dem *Mayener Grubenfeld*) angehört, jedoch mitnichten dem *Kottenheimer Winfeld*. Die geringsten Sicherheiten einer korrekten Zuordnung treten bei den Fundstücken aus der *Ettringer Lay* auf, also bei der Abbaustelle, die bereits in der Clusteranalyse in Kap. 3.4.3.2 nicht vom *Mayener Grubenfeld* getrennt werden konnte, bei der zudem in der Diskriminanzanalyse der Abbaustellen in Kap. 3.4.3.3 geringere Wahrscheinlichkeiten einer korrekten Zuordnung auftraten und es in der Kreuzvalidierung zu einer Fehlzuordnungen kam. Diese Unsicherheiten beruhen auf der starken geochemischen Ähnlichkeit der Laven der *Ettringer Lay* insbesondere mit denen des *Mayener Grubenfelds*; so kommt es insbesondere in einem MgO-Bereich zwischen 5,0 und 5,4 % zu großen Überschneidungen in der chemischen Zusammensetzung (siehe Abb. 19-20).

3.5.2 Vergleich mit anderen römischen Abbaugebieten

Für einige Proben konnte bereits auf Basis der Gesamtgesteinschemie eine Eifeler Herkunft ausgeschlossen werden, für weitere erst mittels Clusteranalyse. Durch Vergleich mit geochemischen Daten aus der Literatur soll herausgefunden werden, aus welchen alternativen Abbaustellen diese Fundstücke stammen können. Dazu soll als erstes Kriterium wiederum das TAS-Diagramm herangezogen werden, in dem der Chemismus von Laven dargestellt wird, die alternativ als Rohstoffe für Mühlsteine in Frage kommen.

1.) Orvieto (Italien): Pompejanische Mühle aus Carnuntum an der Donau

Auffälligstes Merkmal dieses Mühlsteins aus grauer, vesikulärer Lava sind Leucit-Phänokristalle mit einem Durchmesser von bis zu 2 cm. Damit ist dieses Fundstück das einzige, bei dem eine Eifeler Herkunft bereits durch makroskopische Beobachtung ausgeschlossen werden kann, da weder in der West- noch in der Osteifel Laven mit solch großen Leucit-Phnokristallen auftreten. Dieses Fundstück zeichnet im TAS-Diagramm im Feld der Phonolithe (Abb. 32). Von entsprechenden Laven in der Region um Orvieto, die nachgewiesen zur Mhlenproduktion genutzt werden,

3. Provenienzanalyse
 3.5 Analyse der Mühlsteine: Ergebnisse und Provenienz
 3.5.2 Vergleich mit anderen römischen Abbaugebieten

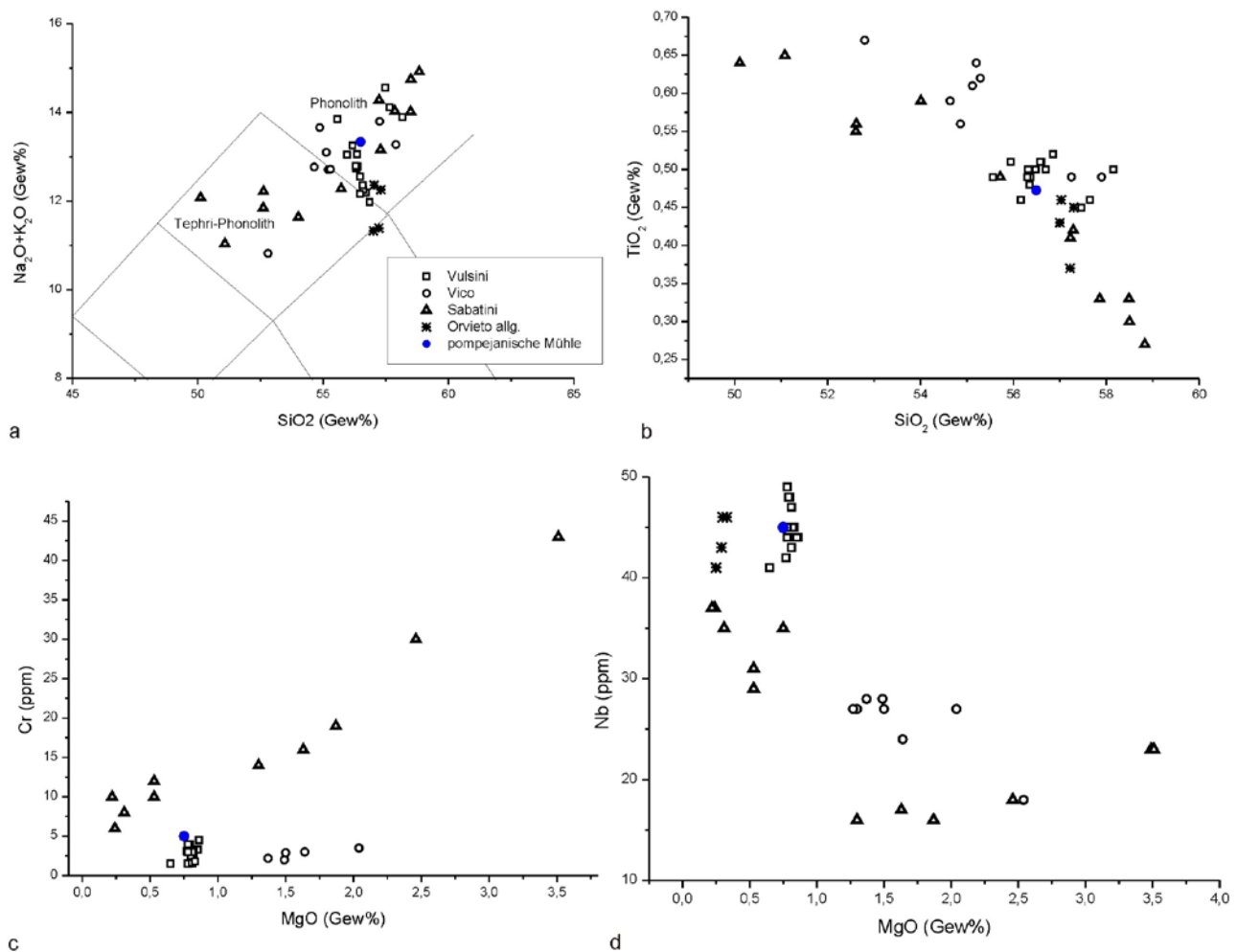


Abb. 37 a-d: Vergleich der pompejanischen Mühle aus Carnuntum mit quartären Vulkaniten aus Zentral-Italien. Werte aus Vulsini, Vico und Sabatini aus Antonelli et al. (2003), Werte „Orvieto allg.“ aus Buffone et al. (1999).

berichtet bereits Peacock (1986). Buffone et al. (1999) liefert einige Werte zu den Laven in Orvieto, Antonelli (2003) fasst Literaturdaten zum Chemismus der quartären Laven Zentral-Italiens zusammen. Diese werden nun herangezogen, um zu überprüfen, ob eine Provenienz aus Orvieto für diesen Mühlstein in Frage kommt. Das TAS-Diagramm in Abb. 37a zeigt, dass die pompejanische Mühle durchaus im selben Bereich liegt wie die quartären Laven Zentral-Italiens. Insbesondere scheint sie sich in ihrem Gehalt an Alkalien und SiO_2 mit Laven aus dem Vulsini-Vulkangebiet zu decken, was durch einen entsprechenden TiO_2 -Gehalt (Abb. 37b) bekräftigt wird. Der Cr- und Nb-Gehalt (Abb. 37c und d) der pompejanischen Mühle bestätigen, dass es sich dabei höchstwahrscheinlich um eine Mühle aus dem Vulsini-Vulkangebiet im Umkreis von Orvieto handelt.

2) Pannonisches Becken: Mühlsteinfragmente aus Niederösterreich

Die jeweiligen chemischen Zusammensetzungen der drei Mühlsteinfragmente N1, N2 und N3 sind sich sehr ähnlich, man kann also vermuten, dass sie derselben Abbaustelle entstammen. Hinweise auf die Provenienz dieser drei Fundstücke zu finden, gestaltet sich jedoch als äußerst schwierig. Orientiert man sich an der Region, in der die Fragmente entdeckt wurden, liegt es nahe davon auszugehen, dass die Mühlen aus Laven des Pannonischen Beckens hergestellt wurden. Problematisch ist jedoch zum einen, dass es keine Forschungen dazu gibt, ob Abbaustellen für Mühlsteine im Pannonischen Becken existierten, womit Hinweise zur Eingrenzung der in Frage kommenden Vulkanite fehlen. Zum anderen ist die Datenlage in der geologischen Literatur zu Vulkaniten aus dieser Region äußerst dünn. Lustrino & Wilson (2007) liefern begleitend zu ihrer Publikation eine Zusammenstellung der existierenden Literaturwerte zu Laven u.a. aus dem Pannonischen Becken; diese werden im Folgenden herangezogen, um zu überprüfen, ob eine solche Herkunft überhaupt in Frage kommt.

Bei den drei Mühlsteinen handelt es sich um Trachybasalte mit einem äußerst homogenen Gehalt an Alkalien (Abb. 38a) und TiO_2 (Abb. 38b), die SiO_2 - und Al_2O_3 -Gehalte variieren um ca. 1 Massen-%. Vergleicht man die Lage der Fundstücke im TAS-Diagramm mit den vorhandenen Werten von Laven aus dem Pannonischen Becken, lässt sich feststellen, dass die Mühlsteine zwar im oberen Bereich der SiO_2 -Gehalte der Vergleichslaven liegen, aber dennoch in das von den Pannonisches-Becken-Laven beschriebene Feld passen. Dass eine Provenienz aus dieser Region durchaus in Frage kommt, zeigt sich in Abb. 38b, in der sich die Mühlsteine im Feld des Pannonischen Beckens im Bereich des Balatons bzw. der „Little Hungarian Plane“ bewegen. Die Gehalte der Spurenelemente aller drei Mühlsteinfragmente, beispielhaft demonstriert in Abb. 38c und 38d anhand der Zr-, Cr- und Rb-Zusammensetzung, zeigen sich ebenfalls deutlich einheitlich, was die Annahme bestätigt, dass sie derselben Abbaustelle entstammen. Im Vergleich mit den Vulkaniten aus dem Pannonischen Becken zeigt sich jedoch, dass sich auf Basis der vorliegenden Daten die Fundstücke keiner Region genau zuordnen lassen. Somit lässt sich für die drei niederösterreichischen Mühlsteinfragmente über die Aussage „Herkunft vermutlich aus dem Pannonischen Becken“ hinaus keine genauere Angabe zur Provenienz machen.

3. Provenienzanalyse

3.5 Analyse der Mühlsteine: Ergebnisse und Provenienz

3.5.2 Vergleich mit anderen römischen Abbaugebieten

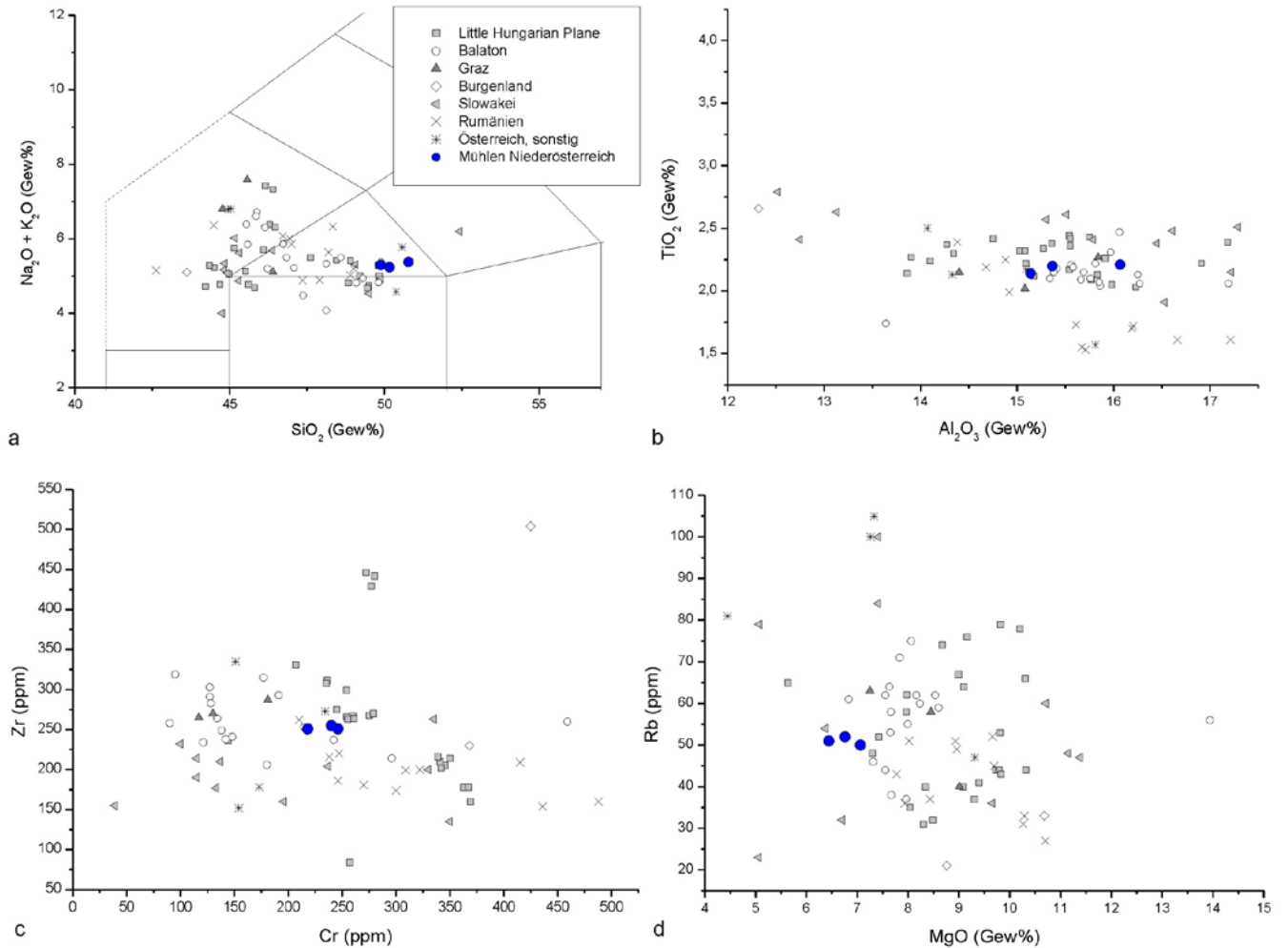


Abb. 38a-d: Die drei Mühlsteinfragmente aus Niederösterreich im Vergleich mit Laven aus dem Pannonischen Becken. Vergleichswerte aus der Datenbasis zusammengestellt von Lustrino & Wilson (2007), Literaturverweise dort.

3) Massif Central (Frankreich): Mühlsteine aus Bibracte, Burgile, Longvic, Pratz und Bassou

Diese Mühlsteine zeichnen im TAS-Diagramm (Abb. 39a) entlang der Abfolge Basalt/Trachybasalt-Basaltischer Trachyandesit und Trachyandesit. Bereits die Lage im TAS lehnt eine Eifeler Herkunft ab. Für die „kritischen“ Fälle, die dem TAS-Feld der Eifeler Abbaustellen zumindest nahe kommen, konnte mittels Clusteranalyse eine Eifeler Herkunft endgültig ausgeschlossen werden. Die nächste in Frage kommende Region, aus der Mühlsteinproduktion aus Lava bekannt ist, ist das Massif Central, wobei besonderes Augenmerk auf die Chaîne des Puys gelegt wird, da dort ein Produktionszentrum für Mühlsteine am Vulkan „Puy de la Nugère“ bei Volvic vermutet wird (Peacock 1980; Williams-Thorpe & Thorpe 1988). Problematisch im Falle der

Chane des Puy ist, dass stets indirekt ausgehend von Fundstücken, die auf geochemischer Basis dieser Region zugeordnet werden, auf eine dortige Mhlenproduktion geschlossen wird. Die Abbaustellen selbst sind jedoch im Gegensatz zu denen der Eifel gänzlich unbekannt. In Ermangelung an Daten aus bekannten Abbaustellen werden also auch hier Daten aus der geologischen Literatur herangezogen, um die Herkunft der untersuchten Mühlen möglichst genau einzugrenzen.

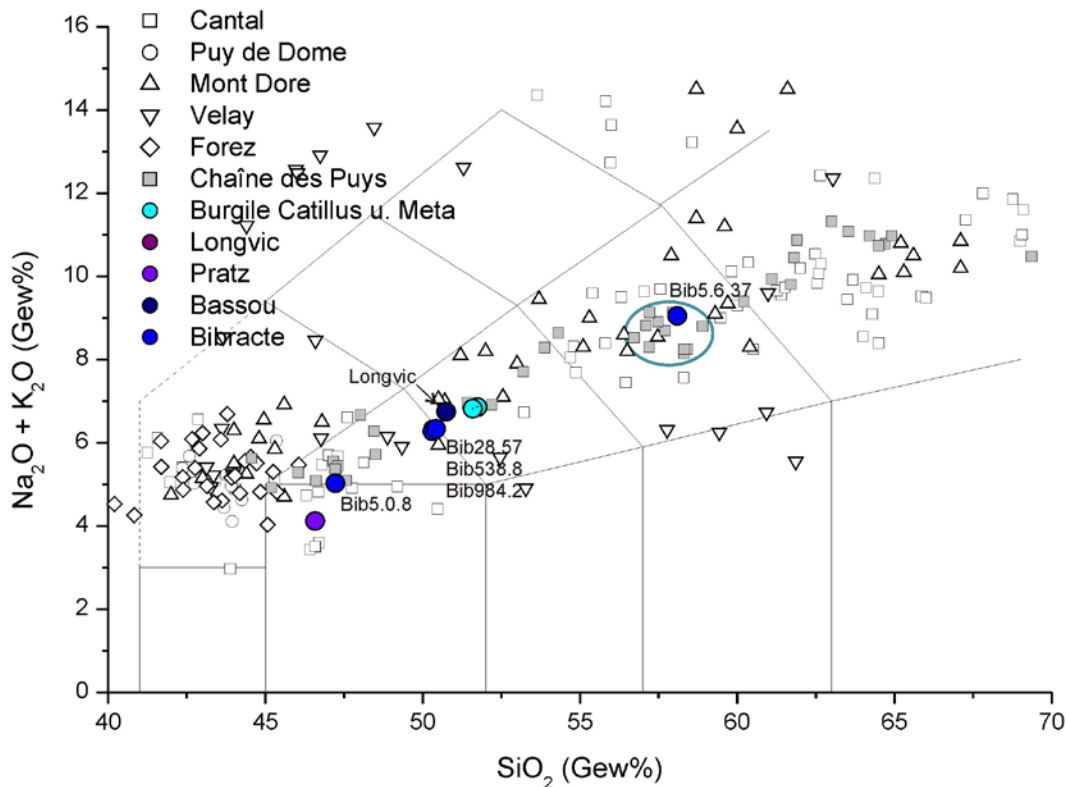


Abb. 39a: TAS-Diagramm der Mühlsteine aus Frankreich und Laven des Massif Central. Cantal: (Vatin-Perignon et al. 1980), Wilson et al. (1995), (Caroff et al. 1997), (Legendre et al. 2001). Devs: (Liotard et al. 1988; Liotard et al. 1983). Chane des Puy: (Maury et al. 1980; Maury & Brousse 1978; Gourgaud & Camus 1984; Liotard et al. 1988; Hamelin et al. 2009) Williams-Thorpe (1988), Williams-Thorpe and Thorpe (1988), (Miallier et al. 2004). Puy de Dome: (Magonthier 1975). Mont Dore: Maury and Brousse (1978), (Gourgaud & Villemant 1992). Velay: (Villemant & Treuil 1983), Liotard et al. (1988). Die blaue Markierung kennzeichnet die Laven des Puy de la Nugère bei Volvic.

Die vulkanische Serie der Chane des Puy entstand durch fraktionierte Kristallisation von Alkali-Basalten; die Differentiation führte über Kalium-Hawaiiit, Mugearit und Benmoreit zu quarzführenden Trachyten als Residualschmelzen (Maury et al. 1980). Das TAS-Diagramm in Abb. 39a zeigt, dass sich die Mühlsteine entlang des Chane des Puy-Trends von Basalt/Hawaiiit über Mugearit zu Benmoreit (z.B. Hamelin et al 2009) orientieren. Lediglich die Mühle aus Pratz zeigt einen geringeren Gehalt an Alkalien bei einem niedrigen Gehalt an SiO₂, der nicht mehr den vorliegen-

den Daten der Chane des Puy entspricht, sondern eher den Laven vom Cantal. Die Lage der Mühlsteine zeigt, dass es sich scheinbar um vier verschiedene Abbaustellen handelt: Eine Abbaustelle liegt im Bereich der K-Benmoreite um Volvic, eine im Bereich der Mugearite im Übergang zu den Hawaiiten, eine im Bereich der Hawaiite im Übergang zu Basalt und schließlich die basaltische Abbaustelle, die von der Pratz-Mühle repräsentiert wird. Auffällig ist, dass sechs von den zehn untersuchten Mühlen aus der „mugearitischen“ Abbaustelle stammen, und nur eine aus dem Bereich um Volvic, was als Hinweis darauf gedeutet werden könnte, dass entgegen den bisherigen Annahmen, Volvic nicht das Hauptzentrum der Mhlenproduktion im Massif Central war, sondern im Vergleich zu der unbekanntenen „mugearitischen“ Abbaustelle eine eher untergeordnete Rolle gespielt hat.

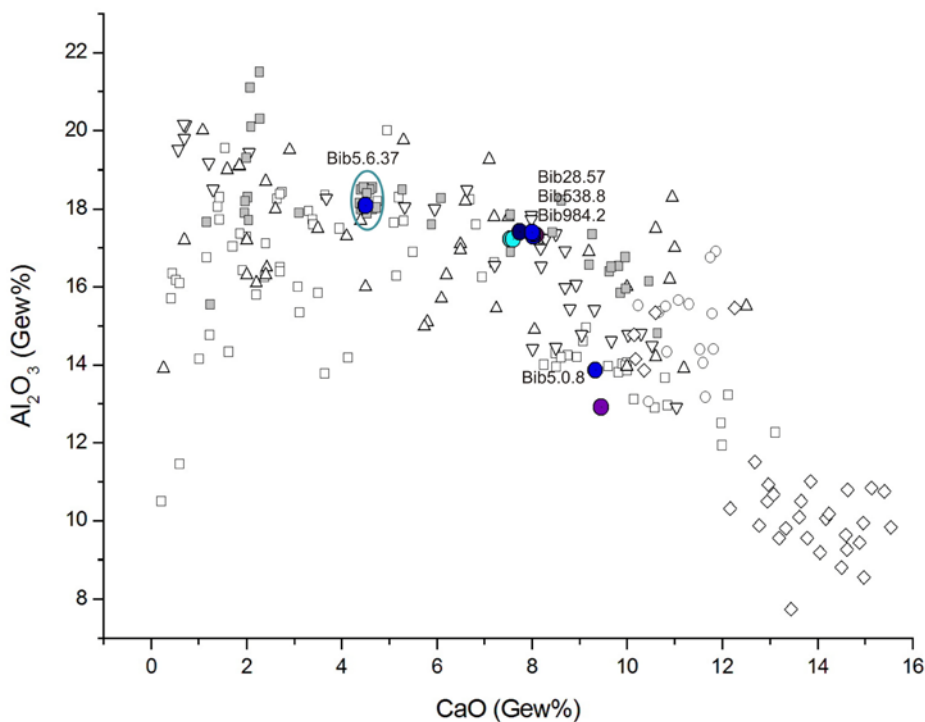


Abb. 39b:
Verteilung von CaO und Al₂O₃ im Vergleich zu den Laven des Massif Central (wie unter Abb. 39a zitiert, Legende siehe dort).

Ein Vergleich der Mhlsteinproben mit Referenzdaten aus dem Massif Central erfolgt auf Basis der Hauptelemente, da die Angaben zu Spurenelementen in der Literatur sehr lückenhaft sind. Neben dem TAS-Diagramm werden in Abb. 39b und 39c die Mhlsteinproben anhand ihres CaO- und Al₂O₃-Gehaltes bzw. ihres MgO- und SiO₂-Gehaltes den entsprechenden Werten von Laven aus dem Massif Central gegenübergestellt. Die CaO-, Al₂O₃- und MgO-Gehalte von Mühlstein Bib5.6.37 stimmen ebenfalls mit denen der Lava des Puy de la Nugère bei Volvic überein, ebenso entsprechen die Zr-, Nb- und Rb-Werte (Abb. 39d-e) des Mühlsteins denen der Benmoreite, wie sie bei Volvic vorliegen. Die Provenienz dieses Mühlsteins aus Volvic

3. Provenienzanalyse
 3.5 Analyse der Mühlsteine: Ergebnisse und Provenienz
 3.5.2 Vergleich mit anderen römischen Abbaugebieten

bzw. aus dem Umfeld des Puy de la Nugère kann damit als sicher angesehen werden. Die Proben Bib28.57, Bib538.8, Bib984.2 sowie die Mühlen aus Bassou,

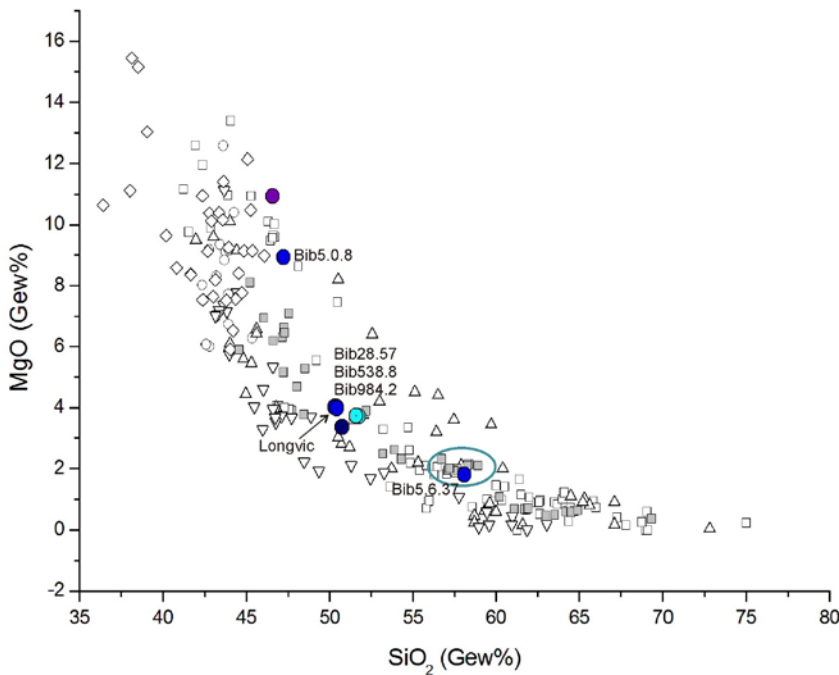


Abb. 39c: Verteilung von SiO₂ und MgO im Vergleich zu den Laven des Massif Central (wie unter Abb. 39a zitiert, Legende siehe dort).

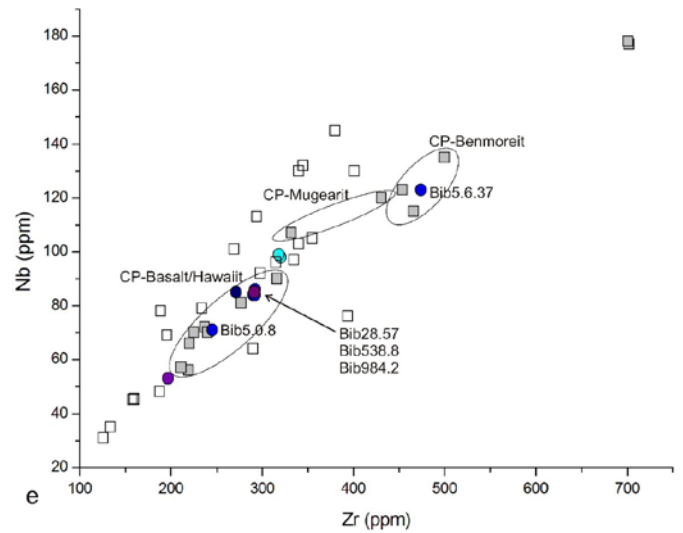
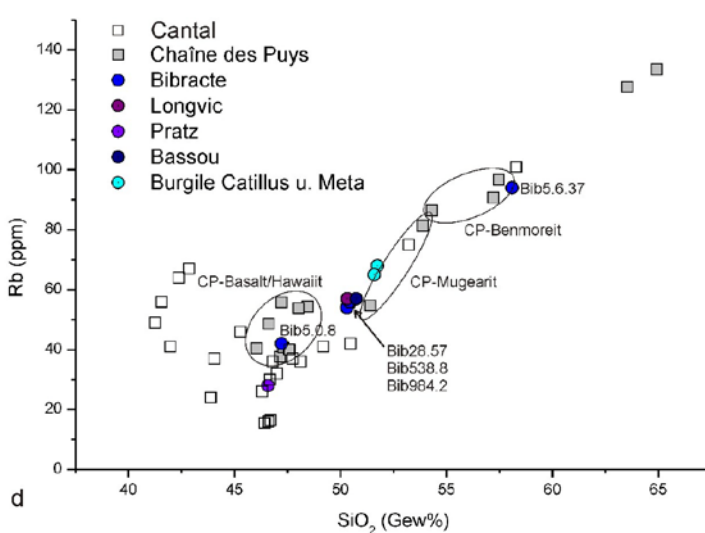


Abb. 39 d-e: Mühlsteine im Vergleich zu den Laven der Chane des Puy (Werte von Hamelin et al. 2009) und des Cantal (wie unter 39a zitiert), d: Verteilung von Rb und SiO₂, e: Verteilung von Zr und Nb.

Longvic und Burgile hingegen zeigen im TAS-Diagramm einen erheblich geringeren Gehalt an SiO₂ und Alkalien, so dass Volvic bzw. der Puy de la Nugère als Quelle ausgeschlossen werden muss. Diese Mühlen könnten aufgrund ihrer chemischen Ähnlichkeit ein und derselben Abbaustelle entstammen. Sie liegen in der Verteilung ihrer Hauptelemente genau in der Differentiationsreihe der Chane des Puy.

Verglichen mit den herangezogenen Literaturwerten sind die Proben in ihrem SiO_2 -Gehalt sowie in ihren MgO -, CaO - und Al_2O_3 -Werten dem Punkt des Coule du Puy de Louchadire à Pontgibaud von Maury et al. (1980) am ähnlichsten. Die Rb-Gehalte (Abb. 39d) entsprechen denen der Mugearite von Hamelin et al. (2009), die Nb- und Zr-Gehalte (Abb. 39e) weichen jedoch von denen des von Hamelin et al. (2009) untersuchten mugearitischen Lavastroms (stlich von Clermont-Ferrand) ab und liegen eher im Bereich der Basalte/Hawaiiite. Ob sich die Mühlstein-Werte in Zr und Nb mit einem der beiden anderen mugearitischen Lavaströme in der Chane des Puys decken, ist auf Basis der in der Literatur vorliegenden Spurenelement-Werte nicht möglich festzustellen. Zumindest lässt sich mit einer gewissen Sicherheit sagen, dass die Mühlsteine der Chane des Puys entstammen. Da aber innerhalb der Chane des Puys nach Hamelin et al. (2009) drei Lokationen mit mugearitischen Laven vorliegen, lässt sich zwar die genaue Provenienz nicht bestimmen, aber so regional dennoch deutlich eingrenzen.

Im Falle der Mühle Bib5.0.8 ist es fraglich, ob der Mühlstein überhaupt aus der Chane des Puys stammt. In Abb. 39b bzw. 39c ist erkennbar, dass sich Probe Bib5.0.8 durch einen höheren MgO - und geringere CaO - und Al_2O_3 -Werte auszeichnet als die herangezogenen Vergleichswerte aus der Chane des Puys. Die Rb-, Nb- und Zr-Gehalte (Abb. 39d und 39e) wiederum lassen eine entsprechende Provenienz aus einem Basalt/Hawaiiit möglich erscheinen. Aufgrund des Mangels an Referenzdaten aus dem Gelände ist eine genaue Aussage zur Herkunft aber nicht möglich; auf Basis der vorhandenen Daten ist es auch vorstellbar, dass der Mühlstein aus einer Lava im Umfeld des Cantal hergestellt wurde.

Die Mühle aus Pratz weicht auch in den CaO -, MgO und Al_2O_3 -Werten deutlich von dem Differentiationstrend der Chane des Puys ab. Entsprechend dem niedrigen SiO_2 - und Al_2O_3 -Gehalt ist der Anteil an MgO höher als in den Laven der Chane des Puys, die Rb-, Zr- und Nb-Gehalte jedoch niedriger. Die Haupt- und Spurenelement-Verteilung zeigt größere Ähnlichkeiten mit Laven vom Cantal. In Ermangelung detaillierter Daten aus der Literatur lässt sich demnach lediglich vermuten, dass der Mühlstein aus Pratz aus einem Basalt im Umfeld des Cantal gefertigt wurde.

4) Vogelsberg-Umfeld: Mühlsteine aus Salzkotten, Anreppen und der Saalburg

Die Mühle aus Salzkotten zeichnet im TAS-Diagramm (Abb. 40a) im Übergang von Basanit zu Pikro-Basalt, die beiden Stücke aus Anreppen und von der Saalburg im Basalt-Feld. Während das Salzkotten-Stück den Vogelsberg-Basanit zugeordnet werden kann, liegen die Mühlen aus Anreppen bzw. von der Saalburg im Bereich, der die Tholeiite, Qtz-Tholeiite oder Alkali-Basalte des Vogelsbergs umfasst. Nach Winchester & Floyd (1976) lassen sich tholeiitische von alkalischen Basalten anhand der geringeren P_2O_5 -Werte bei gegebenem Zr-Werten unterscheiden. Abb. 40b zeigt, dass diese beiden Mühlen im Alkali-Basalt-Bereich liegen. Die Saalburg-Mühle zeichnet zwar direkt an der Trennlinie, jedoch hebt sie sich durch höhere Zr-Werte

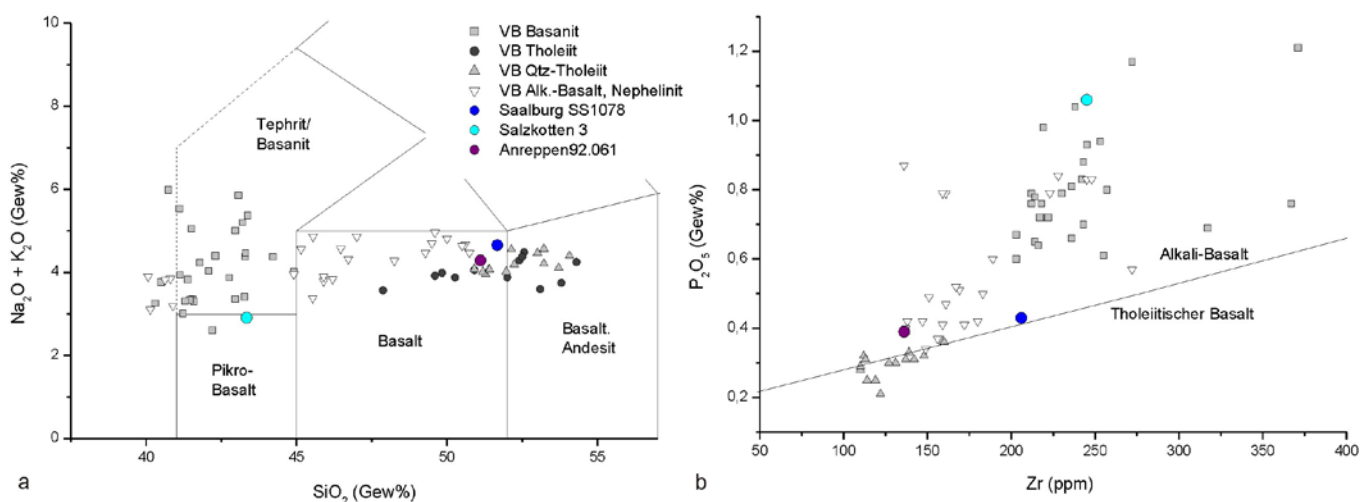


Abb. 40a: Lage der Mühlstein-Proben aus Salzkotten, Anreppen und von der Saalburg im TAS-Diagramm im Vergleich zu Laven des Vogelsbergs (Werte aus Haase et al. 2004; Jung & Masberg 1998; Bogaard & Wörner 2003).

Abb. 40b: Zr- P_2O_5 -Diskriminationsdiagramm für Basalte nach Winchester & Floyd (1976), das die tholeiitischen von den alkalischen Basalten unterscheidet. Vogelsberg-Werte wie unter Abb. 40a.

von den Tholeiiten ab und liegt in ihrem P_2O_5 -Gehalt eher auf dem Niveau der Vogelsberger Alkali-Basalte. Obwohl die Anreppen-Mühle im Alkali-Basalt-Feld liegt, zeichnet sie jedoch in ihrem P_2O_5 - und Zr-Wert in einem Bereich, der auch von Vogelsberg-Laven eingenommen wird, die in der angegebenen Literatur als „tholeiitisch“ bezeichnet werden. Während die Rb- und MgO-Gehalte (Abb. 40d) eine Vogelsberg-Basanit-Herkunft für die Salzkotten-Mühle zu bestätigen scheinen und für die Anreppen-Mühle wiederum eine Herkunft aus „tholeiitischen“ Laven wahrscheinlich macht, ist für die Saalburg-Probe anhand dieser Werte keine weitere Eingrenzung möglich. Der Nb-Gehalt (Abb. 40c) der Saalburg-Mühle schließt jedoch

eine Herkunft von den Vogelsberg-Tholeiiten aus und rückt sie wieder in den Bereich der Vogelsberger Alkali-Basalte. Die Nb-Gehalte der Anreppen-Mühle lassen eine Herkunft aus den „Tholeiiten“ weiter wahrscheinlich erscheinen, für die Salzkotten-Mühle wird die Provenienz aus einem Vogelsberger Basanit bestätigt.

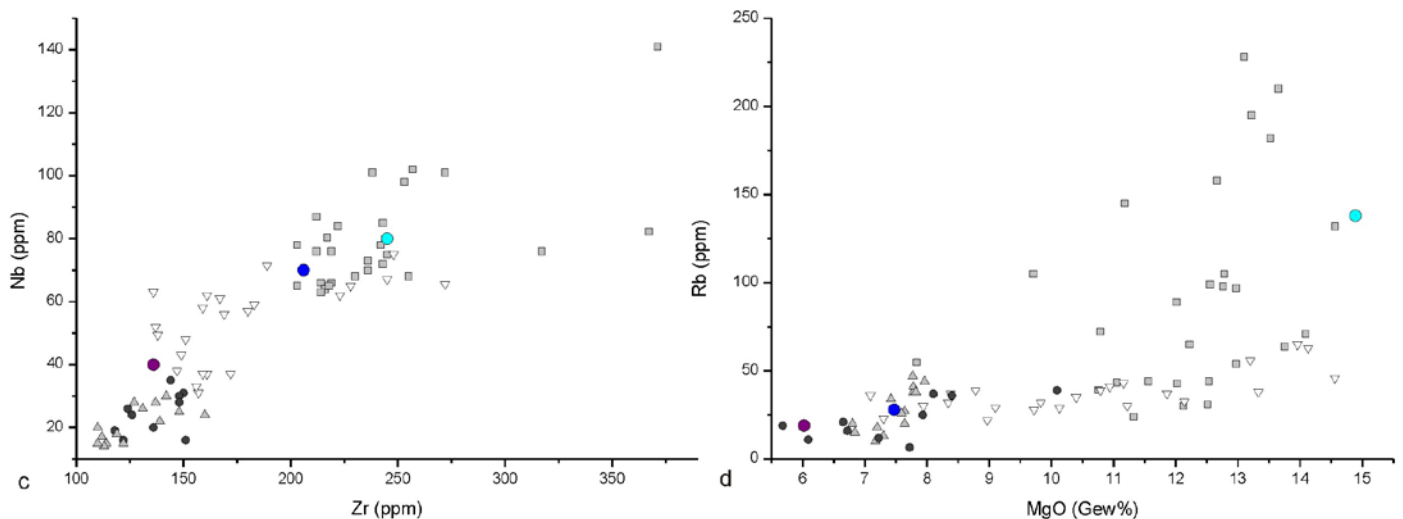


Abb. 40 c-d: Zr- und Nb- bzw. Rb- und MgO-Werte der Mühlen im Vergleich zu den Vogelsberg-Laven. (Werte wie unter 40a).

4) Monte Vulture (Italien)? Der ungeklärte Mühlstein aus Xanten

Die Clusteranalyse in Kap. 3.5.2.1 hat gezeigt, dass der Xantener Mühlstein X178111a nicht der *Bellerberg*-Lava zugeordnet werden kann. Das TAS-Diagramm (Abb. 41a) macht deutlich, dass die Mühle einen um ca. 4 % niedrigeren SiO₂-Gehalt zeigt als die Steinbrüche des *Bellerbergs* oder des *Niedermendiger* Lavastroms. Die einzigen Laven, die in diesem Bereich des TAS-Diagramms liegen und die gemäß dem Stand der archäologischen Forschung zur Herstellung von Mühlsteinen genutzt wurden, sind die des *Monte Vulture* in Italien.

Im TAS-Diagramm liegt die Xantener Mühle im Bereich der *Mt.-Vulture*-Laven. Während der MgO-Gehalt des Mühlsteins noch dem der *Mt.-Vulture*-Laven entspricht (Abb. 41b), zeigen sich jedoch im TiO₂- und P₂O₅-Gehalt (Abb. 41c) so deutliche Abweichungen, dass diese Gehalte wiederum deutlich gegen eine Provenienz vom *Mt. Vulture* (aber auch vom *Bellerberg* oder aus *Niedermendig*) sprechen. Auch die Spurenelementgehalte lassen keine weitere Vermutung zur Herkunft der Mühle zu. Die Schwierigkeit ergibt sich daraus, dass die Phonotephrite des *Bellerbergs* und des

Niedermendiger Lavastroms in ihren Spurenelementgehalten eine größere Ähnlichkeit mit den *Mt. Vulture*-Laven aufweisen als in ihren Hauptelementen. Beispielhaft sei dies an den Nb-, Zr- und Rb-Gehalten (Abb. 41d und e) demonstriert. Der Mühlstein liegt jedesmal in einem Bereich, der sowohl von den *Mt. Vulture*- als auch den Eifeler Phonotephriten eingenommen wird. Insgesamt lässt sich für diesen Xantener Mühlstein festhalten, dass auf Basis der verfügbaren Literaturdaten keine Provenienz festgestellt werden kann. Eine Herkunft vom *Bellerberg* lässt sich ausschließen; so sehr auch das TAS-Diagramm eine Herkunft vom *Mt.-Vulture* nahelegt, ist auf Basis der übrigen vorliegenden Literaturdaten keine Zuordnung zu dieser Lokation möglich.

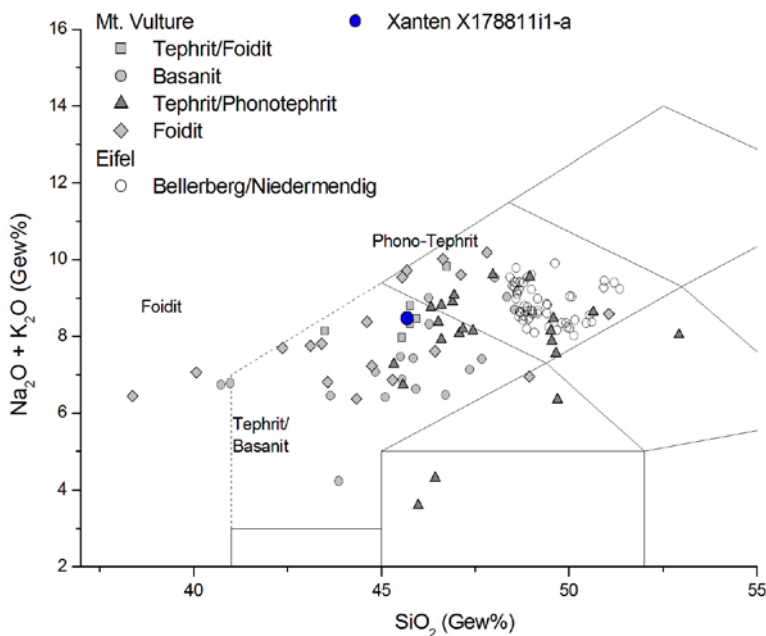
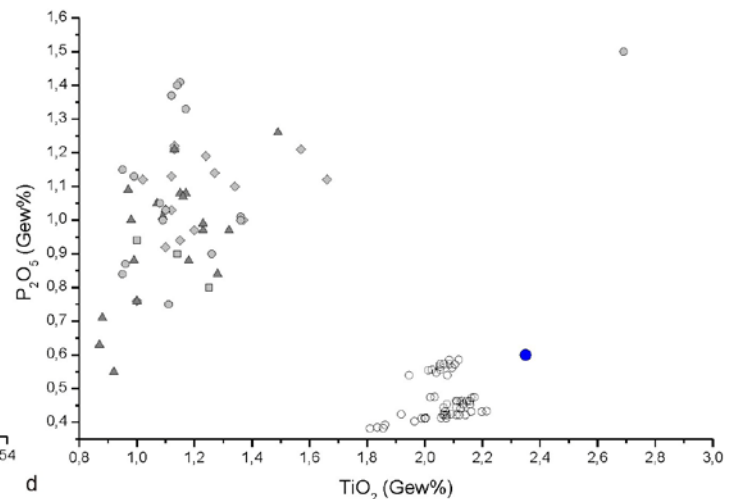
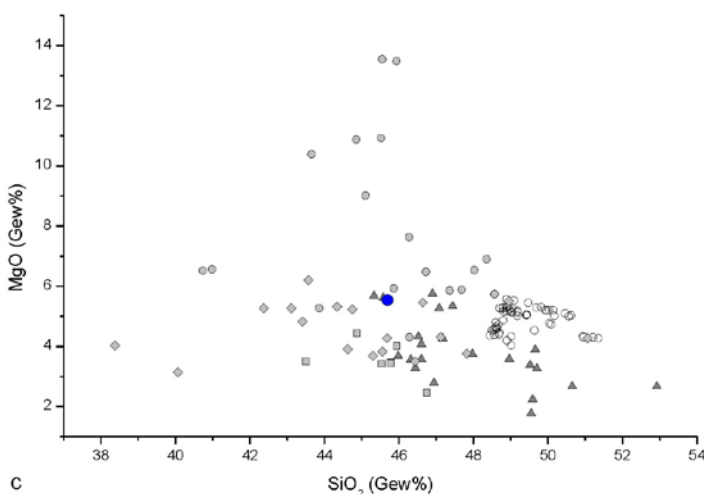


Abb. 41a: Die Xantener Mühle X17811i1-a im Vergleich mit den Laven des Bellerbergs und dem Niedermendiger Lavastrom sowie mit Laven des Monte Vulture. Werte *Mt. Vulture* von (De Astis et al. 2006; Beccaluva et al. 2002; De Fino et al. 1982; Melluso et al. 1996).



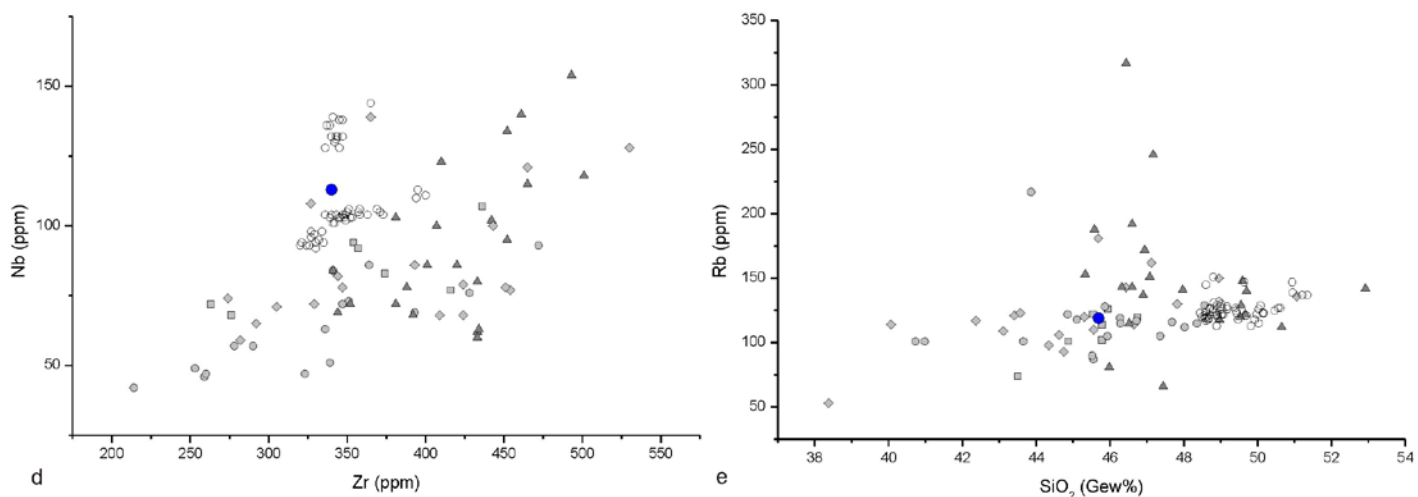


Abb. 41 b-e: Haupt-(b und c vorige Seite) und Spurenelemente der Xantener Mühle X17811i1-a im Vergleich mit denen der Laven des Bellerbergs und dem Niedermendiger Lavastrom sowie der Laven des Monte Vulture. Signaturen siehe Abb. 41a. Werte Mt. Vulture wie unter Abb. 41a zitiert.

3.6 Verbreitung der Eifeler Lavamühlen zur Römerzeit

Der größte Teil der untersuchten Mühlen aus grauer, vesikulärer Lava stammt tatsächlich aus der Eifel, die zweitgrößte Gruppe stellen Mühlen aus dem Massif Central dar, die übrigen Lokationen (Vogelsberg, Orvieto, vielleicht Mt. Vulture) werden nur durch Einzelfälle repräsentiert. In Kap. 3.1 wurden die unterschiedlichen Fragestellungen, die durch die untersuchten Mühlen beleuchtet werden können, vorgestellt. Abb. 42 stellt die Provenienzen der untersuchten Mühlen dar und korrigiert die Grenzen für die vermuteten Absatzgebiete der Eifeler Mühlen aus Abb. 10.

Die Untersuchungen von Mühlen aus besonders entlegenen Regionen sollen Hinweise auf den maximalen Absatzraum der Eifeler Produkte geben. Die Mühlen aus Trébusice kennzeichnen dessen östliche Grenze. Ob diese Mühlensteine, bei denen es sich vielleicht sogar um Ober- und Unterlieger ein und derselben Mühle handelt, Fallbeispiele regelmäßigen Handels mit Eifeler Mühlen in dieser Region repräsentieren oder lediglich einmalige Fälle sind, müsste weiter erforscht werden. Die Eifeler Mühle in Kempten markiert einen Punkt der südlichen Grenze des Absatzraumes. Wo nun die südöstliche Grenze liegt, ist nicht klar; Carnuntum bezog keine Mühlen mehr aus der Eifel. Proben von römischen Mühlensteinen entlang des Donauverlaufs von Westen nach Osten könnten weitere Hinweise auf diese Abgrenzung des Absatzraums im Osten geben, wie auch die Mühle vom Magdalensberg oder Mühlensteine aus Augsburg.

burg, die jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr analysiert werden konnten. Ebenso fehlt eine Begrenzung des Absatzraums im Norden durch Untersuchung von Mühlen in Britannien, die im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls nicht mehr durchgeführt wurde.

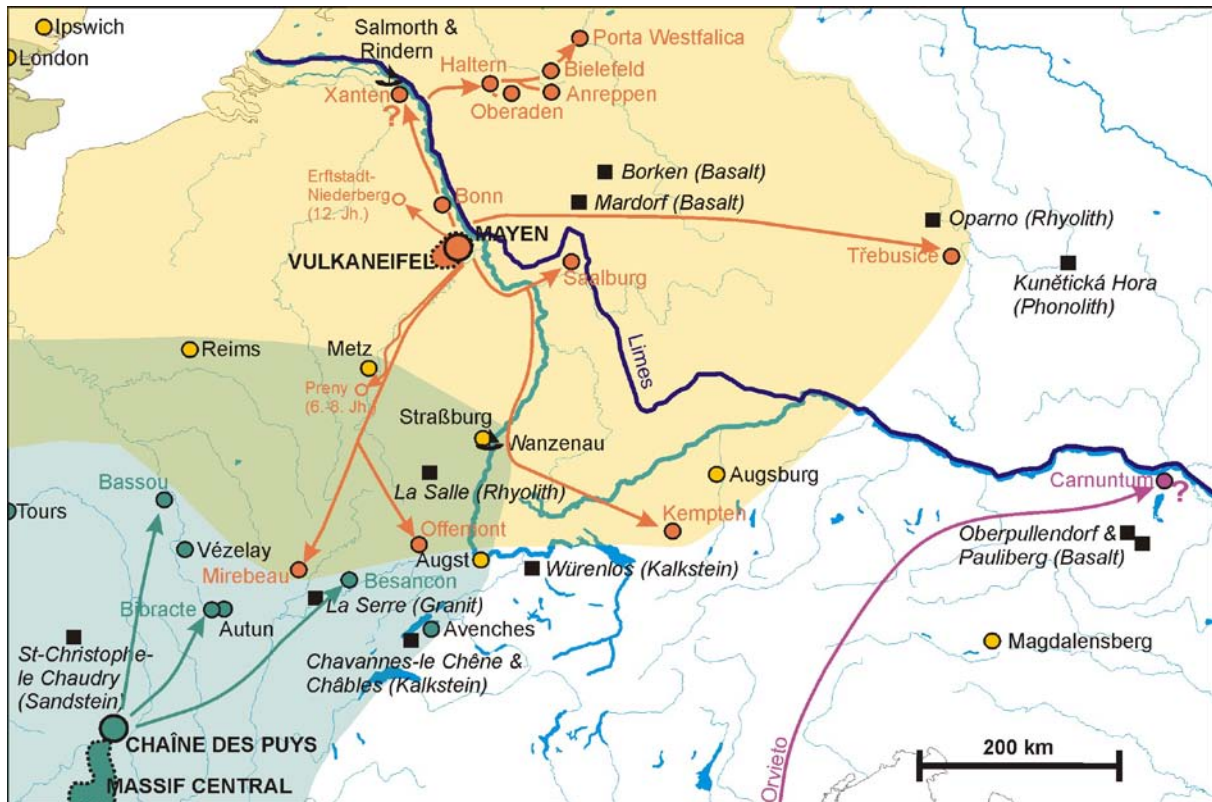


Abb. 42: Herkunft der untersuchten Mühlsteine. Kartengrundlage nach Mangartz (2008). Die bedeutendsten Abbaustellen Mayen/Vulkaneifel und Chaîne des Puy's/Massif Central sind mit großen roten bzw. grünen Punkten und Flächen markiert. Rote kleine Punkte: römische Lokationen mit Eifeler Mühlen. Grüne kleine Punkte: römische Lokationen mit Mühlen aus der Chaîne des Puy's bzw. dem Massif Central. Violetter Punkt: Mühlstein aus Orvieto. Fragezeichen: Mühlsteine fraglicher Herkunft. Rote Kreise: mittelalterliche Mühlen. Orange-farbene Punkte: Wichtige Lokationen, deren Mühlsteine nicht beprobt wurden. Schwarz gefüllte Quadrate: lokale Abbaustellen.

Ein Schwerpunkt bei der Untersuchung der geografischen Verteilung der Mühlen lag auf dem Überschneidungsbereich mit dem Exportraum von Mühlen aus dem Massif Central. Dabei zeichnet sich im Vergleich mit der Karte des vermuteten Absatzraums (Abb. 10) ab, dass der Überschneidungsbereich kleiner ausfällt als bisher angenommen. Während die untersuchten Mühlen aus dem Umkreis von Besancon, aus Bibracte oder Bassou den Handelsraum der Mühlen des Massif Central kennzeichnen, tauchen etwas nördlich in Offemont oder Mirebeau bereits Mühlen aus der Eifel auf. Diese Mühlen könnten die südliche Grenze des Eifeler Absatzgebiets in Frankreich markieren, wobei Proben aus Augst eine feinere Auflösung dieser Grenzen liefern würden. Es ist jedoch nicht klar, wie weit der Überschneidungs-

bereich der Eifeler mit den Massif Central-Mühlen im Norden reichte. Aufschluss darüber könnten Proben aus Reims, Metz und Straßburg geben. Dieselbe Frage stellt sich für Britannien: Wurde die Insel von beiden Produktionsgebieten mit Mühlen versorgt oder lassen sich auch hier Absatzgebiete abgrenzen? Wie bei der Fragestellung zum maximalen Absatzraum fehlen hier jedoch die Mühlstein-Proben aus Britannien.

Eine Mühlstein-Gruppe soll Anhaltspunkte für den Beginn des römischen Abbaus im Übergang von Latène- zur Römerzeit liefern. Dazu wurden besonders früh datierende Funde beprobt. Dabei konzentrierten sich die Provenienzanalysen auf Mühlsteine aus den augusteischen Lippe-Lagern von Haltern über Oberaden, Anreppen sowie dem mutmaßlichen Marschlager Barkhausen an der Weser. Indes spielen insbesondere die beiden Handmühlenfragmente OA GR151-181b und OA 78.122 aus Oberaden eine wichtige Rolle, da sie, datierend von 11 v. Chr. bis 8/7 v. Chr., einen römischen Abbau an den Steinbrüchen des Mayener *Bellerbergs* mindestens für das Jahr 8/7 v. Chr. belegen. Interessant ist die Tatsache, dass von allen untersuchten römischen Mühlen aus dem Lippekorridor (Haltern, Oberaden, Anreppen) und aus Barkhausen alle aus den Laven des Mayener *Bellerbergs* bestehen. Dies kann als ein naturwissenschaftlicher Beleg für die von Mangartz (2008) getroffene Feststellung gewertet werden, dass sich die Produktion der Eifeler Mühlen im Übergang von Latène- zur Römerzeit deutlich verstärkte und das Militär ein Hauptabnehmer für die Mühlsteine war. Die Eifeler Provenienzen der Mühlsteine aus Bonn und Xanten, also entlang des Rheins als Haupthandelsweg, bestätigen ebenfalls eine gesteigerte Produktion in römischer Zeit.

Das frühmittelalterliche Preny südlich von Metz belegt mit seinen Eifeler Mühlen aus dem 6.-8. Jh. eine Weiterführung der Steinbruchtätigkeit auch nach der Römerzeit. Für die mittelalterlichen Mühlen des Klosters in Erftstadt-Niederberg in der Nordeifel konnte erstmals verlässlich und im Gegensatz zu den Untersuchungen von Hörmann & Richter (1983) zweifelsfrei, zwischen Mühlen vom *Bellerberg* und einer Mühle aus dem *Niedermendiger* Lavastrom unterschieden werden. Diese Mühle ist die erste, die einen mittelalterlichen Abbau im *Niedermendiger* Lavastrom naturwissenschaftlich belegt. Wann der Abbau im Mittelalter dort begonnen hat, muss durch weitere Provenienzanalysen erforscht werden.

4. Diskussion

Die petrographische Analyse sowie die Untersuchung des Phasenbestandes mittels XRD erbringen zu viele Parallelen in modaler Mineralogie, Textur oder Struktur der einzelnen Steinbrüche, um sie deutlich voneinander abgrenzen zu können. Obwohl einige Steinbrüche deutliche Merkmale zeigen (z.B. Phlogopit in Proben von der *Hohen Buche*, ausschließlich Klinopyroxen-Phänokristalle in der *Mühlenberg-Lava* oder Olivin-Xenokristalle in den Proben vom *Römerberg*) variiert die modale Mineralogie in den einzelnen Proben innerhalb eines Steinbruchs beträchtlich und führt damit zu großen Überschneidungen in der modalen Mineralogie unter den einzelnen Steinbrüchen. Porphyrizität, Gehalt und Form von Blasen sind Merkmale, die vom Abkühlungsverhalten einer Lava abhängig sind und die so in einem Lavastrom innerhalb weniger Meter variieren können. Damit sind diese Merkmale ungeeignet, eine Abbaustelle zu charakterisieren oder die Herkunft eines Mühlsteins feststellen zu können, zumal ein Dünnschliff lediglich einen winzigen Ausschnitt aus einem Lavastrom darstellt, der nicht notwendigerweise alle petrographischen Eigenschaften in repräsentativen Mengenverhältnissen zeigt. Dass die mikroskopische Analyse nicht verlässlich und bei weitem für eine Zuordnung eines Mühlsteinfundstückes nicht ausreicht, zeigt das Beispiel des Mühlsteins X17811i1-a aus Xanten. Vergleicht man unter dem Mikroskop den Dünnschliff des Mühlsteins mit den Dünnschliffen der *Bellerberg-Lava* zeigt sich eine grundlegende Übereinstimmung in Mineralbestand, Struktur und Textur der Probe. Das einzige, was dem Mineralbestand der Xantener Mühle fehlt, ist das Auftreten der in Resorption begriffenen Quarz-Xenokristalle, die für die *Bellerberg-Laven* so typisch sind. Dies darf nun aber nicht als Ausschlusskriterium für eine Eifeler Herkunft gewertet werden, da es nicht sicher ist, ob ein solcher Xenokristall in der vorliegenden Dünnschliffprobe lediglich nicht erfasst wurde. Eine chemische Analyse der Mühle ist also unabdingbar (die Mühle stammt gemäß den folgenden Analysen tatsächlich nicht aus der Eifel).

Anhand der Haupt- und Spurenelement-Resultate, gemessen mit RFA, lassen sich einzelne Steinbrüche von den großen Gruppen abgrenzen, wobei, wie in Abb. 22-24 gezeigt, sicherheitshalber mehr als ein Element herangezogen werden muss, um die Charakterisierung als eindeutig bezeichnen zu können. Der *Hochsimmer-Nephelinit* unterscheidet sich deutlich von den Phonotephriten durch seine Haupt- und Spuren-

elementzusammensetzung in P_2O_5 , Fe_2O_3 , SiO_2 , Ba, Zn, Sr, V, Y und Nb. Im Falle der *Niedermendiger* Lava ist eine Abgrenzung von den übrigen Phonotephriten vor allem am P_2O_5 -, Fe_2O_3 -, Ba-, Nb- und Sr-Gehalt möglich. Die *Bellerberg*-Lavaströme zeigen für eine Abgrenzung untereinander jedoch zu große Überschneidungen in ihren Elementgehalten oder liegen zu eng beieinander (z.B. der *Kottenheimer Lavaström* in seinem Nb-Gehalt), um auf dieser Grundlage von einer eindeutigen Charakterisierung sprechen zu können. Im Falle der Melanephelinite ist auf Basis der Vergleiche der Haupt- und Spurenelemente keine Unterscheidung der einzelnen Abbaustellen möglich, mit Ausnahme des *Römerbergs*, der auf Basis des P_2O_5 -, SiO_2 -, CaO-, Ba-, Ni-, Cr- Sr- und Nb-Gehalts eindeutig gekennzeichnet ist. Die Laser-ICP-MS-Messungen der Spurenelemente und Seltenen Erden erbringen keine weiteren Merkmale, die neben den Abbaustellen *Hochsimmer*, *Niedermendiger Lava* und *Römerberg* zu einer Unterscheidung weiterer Steinbrüche führen würden. Insgesamt lässt sich nach Auswertung der Daten zur Gesamtsteinschemie feststellen, dass mittels bivariater Analysen keine klare Charakterisierung der einzelnen Vorkommen möglich ist, obwohl die Steinbrüche in ihren geochemischen Zusammensetzungen gewisse Abweichungen voneinander aufzeigen. Dies zeigen Abb. 21 und Abb. 24 für die Phonotephrite/Foidite bzw. Melanephelinite, in denen eine spätere Erkenntnis durch die Diskriminanzanalyse vorweg genommen wird: In diesen Grafiken sind die Elemente mit der höchsten Signifikanz in Diskriminanzfunktion 1 (Nb für die *Bellerberg*-Laven und CaO für die Melanephelinite) gegen die Elemente mit der höchsten Signifikanz für Diskriminanzfunktion 2 (P_2O_5 für die *Bellerberg*-Laven und TiO_2 für die Phonotephrite) aufgezeichnet. Die Elemente besitzen eine bestimmte Variabilität zwischen den Steinbrüchen, zeigen aber gleichzeitig, dass eine Differenzierung zwischen den einzelnen Lokationen selbst dann nicht erreicht werden kann, wenn die Elemente herangezogen werden, die den höchsten „Trenn“-Einfluss auf die Diskriminanzfunktionen haben.

Die erstrebte Charakterisierung wird durch multivariate Analysen erreicht, die auf die beiden Steinbruch-Untergruppen der Phonotephrite/Nephelinit und Melanephelinite getrennt angewendet werden. Als Datenbasis dienen die RFA-Werte der Haupt- und Spurenelemente, da diese im Gegensatz zu den Laser-ICP-MS-Werten trotz Überschneidungen deutlich erkennbare Variabilitäten abhängig von den einzelnen Abbaustellen aufweisen. Es zeigt sich, dass eine „neutrale“ Klassifizierung der Steinbruchproben durch die Clusteranalyse vor dem Einsatz der Diskriminanzanalyse un-

bedingt vorzunehmen ist. Bestimmte Gruppen entsprechend den Abbaustellen können aus der Probenpopulation identifiziert und Ausreißer ermittelt werden, die dann aus dem Proben-Set gestrichen werden. Anschließend erfolgt die schrittweise Diskriminanzanalyse, wobei die Abbaustellen, die bereits auf geochemischer Basis charakterisiert sind, von der Analyse ausgeschlossen werden (*Niedermendig Lava*, *Hochsimmer* und *Römerberg*). Mittels Diskriminanzanalyse ist es möglich, die Gruppen voneinander zu trennen, die in der Clusteranalyse nicht unterschieden werden können. Eine große Anzahl korrekter Klassifizierungen wird erreicht; trotzdem ist bei der Auswertung des Diskriminanz-Modells wichtig zu beachten, dass die Klassifizierungsergebnisse auf genau den Fällen basieren, aus denen das Modell erzeugt wird und dass dadurch die Ergebnisse zu positiv ausfallen. Daher sollte stets eine Kreuzvalidierung durchgeführt werden, um einen Eindruck von der Genauigkeit des Modells zu bekommen. Wenn aufgrund der geochemischen Ähnlichkeiten die einzelnen Gruppenzentroide zu nahe beieinander liegen, wie es bei den Steinbrüchen *Mauerley/Hohe Buche*, *Dietzenley/Goosberg*, oder weniger extrem bei *Mayener Grubenfeld/Ettringer Lay* der Fall ist, muss die Probenzuordnung genau überprüft werden. Obwohl die Diskriminanzanalyse die Proben zu diesen Steinbrüchen weitestgehend korrekt zuordnet, geschieht dies teilweise mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit, und es besteht das erhöhte Risiko einer Fehlklassifizierung. Die Resultate zeigen, dass weder die Geochemie, Clusteranalyse noch Diskriminanzanalyse allein in der Lage sind, die Römischen Steinbrüche der Ost- und Westeifel zu unterscheiden. Der Vorteil dieser drei Methoden liegt aber in deren strategischer Kombination.

Zusätzliche Proben aus den Steinbrüchen wären ein wichtiger Beitrag zur Charakterisierung und Diskriminanz zwischen den einzelnen Abbaustellen. Je mehr Proben pro Abbaustelle untersucht werden, desto verlässlicher wird das Modell. Pro Lavastrom wurden hier mindestens 10 Proben analysiert, eine Menge, die viel größer ist, als jemals zuvor in einer geochemischen Studie über Eifel-Laven untersucht wurde. Obwohl damit akzeptable Cluster- und Diskriminanzmodelle aufgestellt wurden, die sich für eine anschließende Mühlstein-Zuordnung gut eignen, würde eine größere Anzahl von Proben aus jedem Steinbruch die Verlässlichkeit des Modells erhöhen.

Aus Abbaustellen, bei denen es in den multivariaten Analysen zu Fehlzuordnungen kam, also bei Proben der Steinbrüche *Mauerley* und *Hohe Buche* bzw. *Dietzenley* und *Goosberg*, wurden Proben ausgewählt, um mittels Analysen ihrer Sr-Nd-Pb-Iso-

topenzusammensetzung eine zweifelsfreie Charakterisierung zu erreichen. Obwohl es schwer ist, bei so wenigen Isotopenwerten sichere Aussage zu machen, zeigen die Resultate die Tendenz, dass diese Abbaustellen spätestens mittels ihrer Sr-Nd-Pb-Isotopie eindeutig voneinander unterschieden werden können. Die Analyse einer größeren Anzahl von Proben aus diesen Steinbrüchen würde auch hier dazu beitragen, diese Ergebnisse zu sichern.

Die Zuordnung der Mühlsteine erfolgt analog zu dem Vorgehen zur Charakterisierung der Abbaustellen. Schon anhand der geochemischen Zusammensetzung wird in den meisten Fällen deutlich, ob eine Eifeler Herkunft des Fundstücks überhaupt in Frage kommt oder nicht. Der Einsatz der Clusteranalyse ist ein unverzichtbares Instrument: Selbst wenn gemäß bivariater Darstellungen der geochemischen Elemente eine Eifeler Herkunft möglich ist, wird anhand der Clusteranalyse auf Basis aller verfügbaren Elemente neutral überprüft, ob der Mühlstein einem der Eifeler Steinbrüche zugeordnet werden kann. Nur bei einem positiven Ergebnis aus der Clusteranalyse macht der Einsatz der Diskriminanzanalyse Sinn. Während in der Clusteranalyse die Mühlstein-Probe mit allen Steinbruchproben unvoreingenommen in einen „Topf“ geworfen und dann erst überprüft wird, ob sich daraus nachvollziehbare, d.h. den Steinbrüchen entsprechende Gruppen bilden lassen, nimmt der Anwender bei der Diskriminanzanalyse aktiv großen Einfluss auf das Modell, indem er vorgibt, welche Geländeprobe zu welcher Steinbruch-Gruppe gehören. Auf Basis dieses stark beeinflussten Modells werden anschließend die unbekanntes Mühlstein-Proben zugeordnet. Ohne die neutrale Beurteilung der Clusteranalyse ist eine korrekte Zuordnung durch die Diskriminanzanalyse unmöglich: Mittels der aus dem Diskriminanzmodell resultierenden Diskriminanzfunktionen werden für jede Probe, auch wenn sie überhaupt nicht aus der Eifel kommt, stets die Distanzen zu den Gruppenzentroiden der Steinbrüche berechnet und demnach wird immer eine Zuordnung mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten vorgenommen, seien die Distanzen noch so groß. Aus diesem Grund sollte die Clusteranalyse als vorrangiges Analyseverfahren betrachtet werden, da damit bereits eine Antwort auf die Frage nach einer Eifeler Herkunft gegeben wird. Die anschließende Diskriminanzanalyse dient dann als Schritt zur Verfeinerung der Ergebnisse der Clusteranalyse, da so eine genaue Zuordnung zu den einzelnen Abbaustellen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit möglich ist.

Bei dem Versuch, die Herkunftsgebiete der Mühlsteine zu ermitteln, die nicht aus der Eifel kommen, stößt man auf das unüberwindbare Problem der mangelnden verfügbaren Daten. Die in dieser Arbeit vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass eine ausreichende geochemische Datenbasis über die in Frage kommenden Lavavorkommen vorliegen muss, um genaue Angaben zur Provenienz eines Mühlsteins machen zu können. Diese Referenzdaten müssen die chemische Variabilität innerhalb einer Lava, die als Abbaustelle in Frage kommt, abdecken. Nur so lässt sich eine verlässliche Aussage darüber machen, ob der untersuchte Mühlstein einer bestimmten Abbaustelle zugeordnet werden kann oder nicht. Eine solche ausreichende Datengrundlage fehlt leider für die Lavavorkommen, die als alternative Rohstoffe für die Nicht-Eifel-Mühlsteine in Betracht gezogen werden. Die in der geowissenschaftlichen Fachliteratur veröffentlichten Daten sind nicht geeignet, um eine so exakte Herkunftsangabe zu ermöglichen, wie es durch diese Studie nun für die Eifeler Mühlen möglich ist. Für das Massif Central sind die römischen Abbaustellen schlichtweg unbekannt, so dass auf geochemische Literaturdaten von Laven allgemein aus dieser Region zurückgegriffen werden muss. Dasselbe gilt für mögliche Abbaustellen im Pannonischen Becken oder in dessen Umfeld, wie z.B. Lavavorkommen aus dem Burgenland. Selbst für bekannte Abbaustellen wie Orvieto, liegt keine mit dieser Studie vergleichbare Datengrundlage vor. Die vorliegenden Vergleichsdaten, die hier aus der Literatur herangezogen werden, sind stets nur punktuelle Werte und spiegeln lediglich einen allgemeinen Trend in den einzelnen Laven wider, von denen, mit Ausnahme derer aus Orvieto, nicht einmal klar ist, ob sie überhaupt zur Mhlsteinherstellung gedient haben. Die Referenzdaten geben keinen Aufschluss über die Variabilität innerhalb eines Lavavorkommens und können zu dem Zweck der Provenienzbestimmung eines Fundstücks nur grobe Hinweise liefern. Hinzu kommt das Problem der Vergleichbarkeit eigener mit fremden Messwerten, bedingt durch unterschiedliche Aufbereitung, Abweichungen der Messgeräte usw. Um eigene mit fremden Werten vergleichen zu können, müssten zwei oder drei der fremden Proben noch einmal mit den eigenen Verfahren aufbereitet und den hier entwickelten und angewandten Methoden analysiert werden, damit die Messergebnisse der übrigen fremden Vergleichsproben um diese Abweichungen korrigiert werden können. In der Realität ist dies jedoch wenig praktikabel. Bei bivariaten geochemischen Analysen, wie hier in Kap. 3.5.3 dargestellt, mögen diese Abweichungen unbedeutend genug sein, so dass zumindest Vermutungen über die Provenienz eines Fundstücks angestellt werden können. Die Einbeziehung „fremder“ Werte in multivariate statistische Analy-

sen ist jedoch ohne diese Korrektur nicht sinnvoll und würde zu Zuordnungen führen, die absolut unverlässlich sind.

5. Schlussfolgerung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war zum Einen die Untersuchung, ob eine Unterscheidung der römischen Steinbrüche der Eifel möglich ist, und zum Anderen einen Weg zu finden, Mühlsteine vermuteter Eifeler Herkunft ihren Abbaustellen genau zuzuordnen. Das Ergebnis ist, dass die Haupt- und Spurenelementzusammensetzung gemessen mit RFA eine gut geeignete Datenbasis liefert, um die römischen Steinbrüche der West- und Osteifel zu charakterisieren. Mittels bivariater Elementvergleiche der Messwerte ist zwar keine Charakterisierung aller Vorkommen möglich, durch den Einsatz multivariater Analyseverfahren der entsprechend transformierten Messwerte können die einzelnen Laven jedoch voneinander differenziert werden. Die so gewonnene Datenbasis erweist sich als gut einsetzbar zur Provenienzanalyse der Mühlstein-Fundstücke. Die Zuordnung der Mühlsteine erfolgt analog zur Charakterisierung der Steinbrüche. Im ersten Schritt werden die Ergebnisse der Mühlsteinanalysen in ein geeignetes Diagramm zur geochemischen Diskriminanz von Laven eingetragen. Das TAS-Diagramm zeigt sich dazu als besonders geeignet. So wird überprüft, ob der Mühlstein generell der Eifel zugeordnet werden kann, ob er in diesem Fall zur Untergruppe der Phonotephrite/Nephelinit oder der Melanephelinite gehört, oder ob er aus einem Laventyp besteht, der im Eifeler Vulkangebiet überhaupt nicht auftritt. Die Tatsache, dass vulkanische Gesteine aus anderen Teilen Europas, wie aus dem Massif Central, dem Vogelsberg oder vom Mt. Vulture, im TAS-Diagramm die selben Bereiche belegen wie die Laven der Eifel, muss unbedingt berücksichtigt werden. Ein Mühlstein, der in einem geochemischen Diagramm im Eifel-Bereich liegt, muss nicht tatsächlich aus der Eifel kommen. Wenn also eine Eifeler Herkunft gemäß der geochemischen Zusammensetzung möglich erscheint, wird die Clusteranalyse mit quadrierter euklidischer Distanz und Ward-Algorithmus angewendet, da der Mühlstein stets so behandelt werden muss, als sei seine Herkunft unbekannt. Die Daten der geochemischen Zusammensetzung werden dazu entsprechend den Steinbruchdaten transformiert. Anhand der Clusteranalyse kann festgestellt werden, ob der Mühlstein einem der Steinbruch-Cluster zugeordnet werden kann oder ob der Mühlstein ein eigenes Cluster bildet. Ist letzteres der Fall, wird eine Eifeler Herkunft ausgeschlossen. Da die Clusteranalyse nicht in der Lage ist, zwischen einigen Eifeler Stein-

brüchen eindeutig zu unterscheiden, ist die schrittweise Diskriminanzanalyse ein geeignetes Werkzeug, um die Herkunft weiter einzugrenzen. Indem die entsprechenden 10er logarithmierten Mühlstein-Werte in die Diskriminanzfunktionen eingesetzt und die quadrierten Distanzen zu den Gruppenzentroiden errechnet werden, kann der Mühlstein mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit der Gruppe zugeordnet werden, zu der er am nächsten liegt.

Anhand dieser Vorgehensweise konnte für 49 von 68 untersuchten Stücken eine Eifeler Herkunft nachgewiesen werden. Keiner der Mühlsteine stammt aus der Westeifel. Damit wäre für die römische Zeit die Vermutung von Mangartz (2008) bestätigt, dass in den Westeifeler Steinbrüchen nur Mühlsteine für den Bedarf im nächsten Umfeld hergestellt, diese aber nie weit verhandelt wurden. Alle untersuchten Mühlen kommen aus der Osteifel, aber keiner der Mühlsteine wurde aus den Melanepheiliten der *Hohen Buche* und *Mauerley* hergestellt, ebenso keiner aus dem *Hochsimmer*-Nephelinit. Auch dies erhärtet die Feststellungen von Mangartz (zuletzt 2008): *Hohe Buche* und *Mauerley* dienten hauptsächlich zum Abbau von Material für Bauquader, die *Hochsimmer*-Lava ist überhaupt nur untergeordnet zum Abbau genutzt worden. Ebenso stammt tatsächlich keine der Mühlen aus dem *Niedermendiger* Lavastrom, ein naturwissenschaftlicher Beleg für die Feststellung der Archäologen, dass dort römischer Abbau nie existierte. Alle analysierten Eifeler Mühlen bestehen aus dem Phonotephrit des *Bellerbergs* bei Mayen in der Osteifel. Die meisten Mühlen, nämlich 29, werden dem *Mayener Lavastrom* bzw. dessen Steinbrüchen im *Mayener Grubenfeld* zugeordnet. Die zweitgrößte Gruppe von 15 Mühlen kommt vom *Kottenheimer Winfeld*. Die *Ettringer Lay* selbst brachte die wenigsten Mühlen hervor: nur fünf Mühlen bestehen aus der Lava des Ettringer Stroms. Das unsicherste Ergebnis betrifft eine Mühle aus Anreppen, die mit nur 54,3%iger Wahrscheinlichkeit vom *Mayener Grubenfeld* kommt und zu 45,7% aus der *Ettringer Lay* stammt. Für die übrigen Mühlen, die nicht aus der Eifel stammen, konnten die Herkunftsgebiete aus Mangel an verfügbaren geochemischen Daten lediglich grob eingegrenzt werden. Es handelt sich dabei um Mühlen aus dem *Massif Central*, vom *Vogelsberg*, aus dem *Orviato*-Umfeld und –vermutlich- aus dem *Pannonischen Becken*. Lediglich für einen Mühlstein aus Xanten bleibt die Herkunft unklar.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die vorgestellte Methode der geochemischen Auswertung der Daten sowohl der Steinbrüche als auch der Mühlsteine, kombiniert mit

Cluster- und Diskriminanzanalysen ein hilfreiches Werkzeug zur Provenienzanalyse von Mühlsteinen vermuteten Eifeler Ursprungs ist. Aus den bisherigen Ergebnissen zu den Mühlstein-Provenienzen lassen sich weitere, wichtige Fragestellungen ableiten:

- Zunächst wäre die Untersuchung weiterer Mühlsteine aus grauer, vesikulärer Lava in Mitteleuropa sinnvoll (Britannien, Voralpenraum, entlang der Donau nach Osten, Frankreich) um den Exportraum der Eifeler Mühlen genauer abgrenzen zu können.
- Durch den Beweis einer Eifeler Provenienz der Mühle pompejanischen Typs aus Haltern ist nun erstmals eine exportierte Mühle diesen Typs für die Eifel belegt, somit kann der Feststellung von Williams-Thorpe & Thorpe (1988), dass Mayen kein Produktionsort für solche Mühlen war, widersprochen werden. Damit stellt sich die Frage, ob doch mehr pompejanische Mühlen in Mitteleuropa aus der Eifel stammen als bisher angenommen. Wenn ja, könnte der Frage nachgegangen werden, ob es unter den drei Lavaströmen des *Bellerbergs* einen Steinbruch gab, der auf diesen Mhlentyp spezialisiert war.
- Eine wichtige Ergänzung zu den Eifel-Daten wären vergleichbare Datensätze über andere Laven Europas, die zur Herstellung von Mühlsteinen dienten. Dabei lge aus Eifeler Perspektive besonderes Interesse bei den „Exportkonkurrenten“ aus dem Massif Central. Um eine Grenze zwischen den Handelsgebieten ziehen zu können, wäre es von großer Bedeutung, weitere Mühlen aus dem Überschneidungsbereich der Exportgebiete von Eifel und Massif Central zu untersuchen. Dabei wäre es wichtig, mit der hier vorgestellten Herangehensweise auch die Massif Central-Mühlen ihren Abbaustellen so exakt wie möglich zuzuordnen zu können. Die römischen Abbaustellen im Massif Central sind zwar unbekannt, man könnte aber eine Herangehensweise entwickeln, die im Gegensatz zur vorliegenden Untersuchung der Eifel-Laven nicht Rohstoff-basiert ist, sondern die Materialien der Mühlen als Ausgangspunkt hat. Die Analyse römischer Mühlsteinfundstücke könnte zum Auffinden der Abbaustellen wertvolle Hinweise liefern. Dadurch, dass die Laven des Massif Central eine bestimmte Differenzierungsreihe bilden (siehe Kap. 3.5.3), könnten sich durch die Analyse weiterer römischer Mühlstein-Fundstücke Laven einer bestimmten Differenzierungsstufe identifizieren lassen, die vorzugsweise zur Herstellung von Mühlen gedient haben. Da diese Laven wiederum geologisch kartiert sind, könnten die Lokationen

der Abbaustellen räumlich eingegrenzt werden. Selbst anhand der wenigen Massif-Central-Mühlen, die hier analysiert wurden, deuten sich mindestens drei, vielleicht auch vier Abbaustellen an (Abb. 39 a-e). Von diesen Abbaustellen könnte eine Datenbasis vergleichbar mit der hier vorliegenden erstellt werden.

- Die Analyse der Mühlsteine ist natürlich nicht nur für die römische Zeit interessant. Weitere Fragestellungen wären: Ging der Abbau insbesondere der *Bellerberg*-Laven kontinuierlich weiter nach dem Zusammenbruch des römischen Reiches? Lässt sich der Beginn des unterirdischen Abbaus im *Niedermendiger Lavastrom* eingrenzen? Diese Fragen lassen sich nur mit der exakten Zuordnung gut datierter Mühlsteinfundstücke beantworten. Untersuchungen zu frühmittelalterlichen Mühlen existieren zwar bereits von Hörmann & Richter (1983) zu Mühlsteinen aus *Haithabu* und von H. Kars (1980) über Mühlsteine aus *Dorestad*; diesen Untersuchungen fehlt jedoch eine ausreichende Datengrundlage über die Abbaustellen sowie eine statistische Auswertung. Die hier vorliegenden Analysen von Mühlsteinen aus dem frühmittelalterlichen Gräberfeld von Preny und dem hochmittelalterlichen Kloster in Erfstadt-Niederberg zeigen, dass die Untersuchungen zu Handelsräumen und ggf. zu Handelswegen auch auf das frühe und hohe Mittelalter ausweitbar sind.

6. Exkurs zur Petrologie der quartären Vulkanite der Ost- und Westeifel

Zur petrologischen Untersuchung werden neben den oben beschriebenen Mühlsteinbrüchen Proben weiterer alkalischer Laven aus Ost- (Krufter Ofen-Tephrit und Steinrausch-Basanit) und Westeifel (Basanite von Nerother Kopf, Üdersdorf Lava, Alftal/Sprink, Ruderbüsch, Tiefenbach, Kellert, Feuerberg, Sassenberg, Lava SE Kirchweiler) herangezogen (Lokationen in Abb. 43). Die Werte der Haupt- und Spurenelementanalyse basierend auf RFA finden sich im Tabellenanhang, Tabelle 1, Abschnitt „zu Kap. 6“, die der Spurenelement- und Seltene-Erden-Analyse mittels Laser-ICP-MS im Tabellenanhang, Tabelle 2, Abschnitt „zu Kap. 6“.

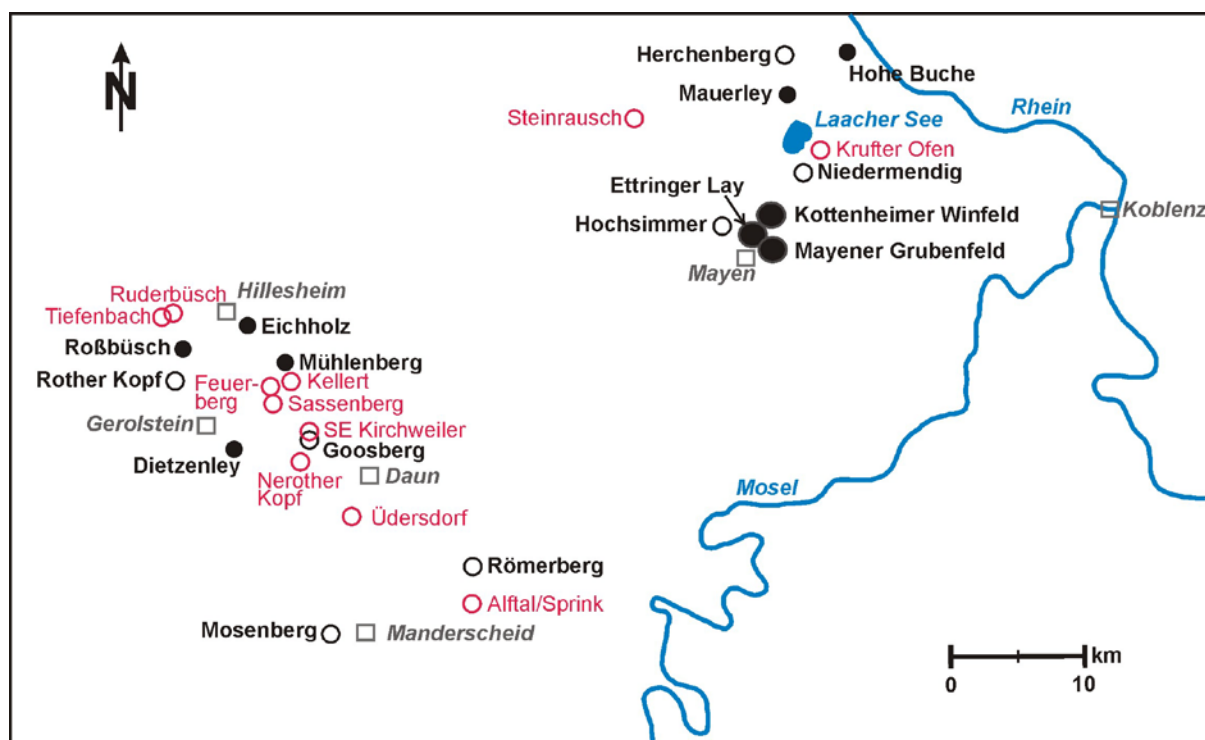


Abb. 43: Übersichtskarte der untersuchten Laven. Römischen Abbaustellen der Eifel gemäß Hörter (1994) und Mangartz (2008), Signaturen siehe Abb. 3. Rote offene Punkte: weitere primitive Laven aus Ost- und Westeifel, herangezogen zur petrologischen Untersuchung.

6.1 Differentiation und fraktionierte Kristallisation

Die Osteifel-Melanephelinite werden bezüglich der Differentiation in Zusammenhang mit den Osteifel-Phonotephriten untersucht. Duda & Schmincke (1978) stellten fest, dass innerhalb der quartären Osteifel zwei primitive Magmentypen unterschieden werden können, nämlich (Melilith-)Nephelinite und Basanite, wobei die Tephrite aus

den Basaniten hervorgehen. In Kapitel 3.4.2 wurde auf Basis der Haupt- und Spurenelemente bereits festgestellt, dass innerhalb der *Bellerberg*-Lavaströme ein Differentiationstrend erkennbar und die *Niedermendiger Lava* bezüglich des Grades der Differentiation mit dem *Ettringer Lavastrom* des *Bellerbergs* vergleichbar ist. Auf Basis des MgO-Diagramms in Abb. 19 a/b lässt sich auf eine Kristallfraktionierung von Olivin und Klinopyroxen schließen, da diese Phasen der Schmelze Magnesium entziehen, wobei die *Kottenheimer Lava* die primitivere im Vergleich zur *Mayener* und zur *Ettringer* zu sein scheint. Dieses Muster spiegelt sich in den positiven Korrelationen von MgO zu Fe₂O₃, zu TiO₂ und tendenziell auch zu CaO wider. Fe₂O₃ und TiO₂ weisen neben der Fraktionierung von Klinopyroxen auf Fraktionierung von (Titano-)Magnetit und Ilmenit hin, CaO möglicherweise auch auf eine frühe Fraktionierung von Ca-reichem Plagioklas. Das mit sinkendem MgO steigende Al₂O₃ spricht jedoch dagegen, dass Plagioklas eine früh fraktionierende Phase war. Die negativen Korrelationen von MgO zu Al₂O₃ und Na₂O zeigen, dass Al, Na und K nach der Kristallisation von Olivin und Klinopyroxen in der Schmelze angereichert und in Phlogopit, aber hauptsächlich in den Nephelinen, Leuciten und Kalifeldspäten abgeschieden werden. Der SiO₂-Gehalt der *Bellerberg*-Lavaströme bleibt konstant, ebenso wie der Gehalt an P₂O₅. Letzteres deutet an, dass Apatit als Träger des P als „Durchläufer“ während der gesamten Kristallisation ausfällt. Das Verhalten der Spurenelemente (Abb. 20a/b) lässt ebenfalls auf die Fraktionierung von Olivin und Klinopyroxen schließen. Cr und Ni fallen mit den Mg-reichen Phasen Olivin bzw. Klinopyroxen, die ähnlich kompatiblen Elemente Cu und V mit den Fe-Ti-Oxiden aus. Rb zeigt entsprechend dem K₂O eine Anreicherung in der Restschmelze in Richtung der differenzierteren Laven und wird in die Kalium-reichen Minerale eingebaut. Im Fall des *Hochsimmers* sind die Unterschiede in den MgO-Gehalten innerhalb des Lavastroms auffällig. Eine mögliche Erklärung ist, dass es sich bei den Proben HL1 und HL2 um die primitive Lava handelt, die sich durch fraktionierte Kristallisation von Olivin und Klinopyroxen zu der differenzierten Lava entwickelt, die durch die restlichen *Hochsimmer*-Proben repräsentiert wird. Die Magmakammer des *Hochsimmers* könnte derart zoniert gewesen sein, dass nach der Bildung des Schlackenkegels zunächst die differenzierte Lava, am Ende der Eruption aber die primitive Lava ausfloss und daher nahe dem Schlackenkegel erstarrte. Für dieses Modell spricht auch Probe Hs, die vom Gipfel des Schlackenkegels genommen wurde und zu den differenzierteren Magmen gehört.

Die Fraktionierung der Osteifel-Melanephelinite zu den Phonotephriten wird in Abb. 44 an einigen ausgewählten Elementen dargestellt. In den Grafiken ist erkennbar, dass *Hohe Buche*, *Mauerley* und *Herchenberg* im Vergleich mit den Phonotephriten die primitiveren Magmen sind. Insbesondere am MgO/Ni-Diagramm wird deutlich, dass durch Olivin-Fraktionierung aus Laven der Zusammensetzung von *Hohe Buche* und *Mauerley* die Phonotephrite entstanden sein können. Bis zu einem MgO-Gehalt ≥ 9 Gew% scheint ausschließlich Ol zu fraktionieren, der Schmelze wird mit abnehmendem MgO Ni entzogen, der Cr-Gehalt bleibt fast konstant. Von 9 bis 6 Gew% MgO herrscht eine Lücke, in der bei ca. 7,5% MgO der Basanit der *Steinrauschs* liegt, dann setzt bei den Phonotephriten neben weiter abfallendem Ni eine vergleichbare Verringerung des Cr-Gehalts ein. Man kann demnach davon ausgehen, dass mindestens ab 6 Gew% MgO neben Olivin auch Klinopyroxen fraktioniert. Dies wird gestützt durch konstante CaO-Werte von *Mauerley* und *Hohe Buche* bei ≥ 9 Gew% MgO in Abb.22b. Das inkompatible Rb wird mit fortschreitender Fraktionierung angereichert.

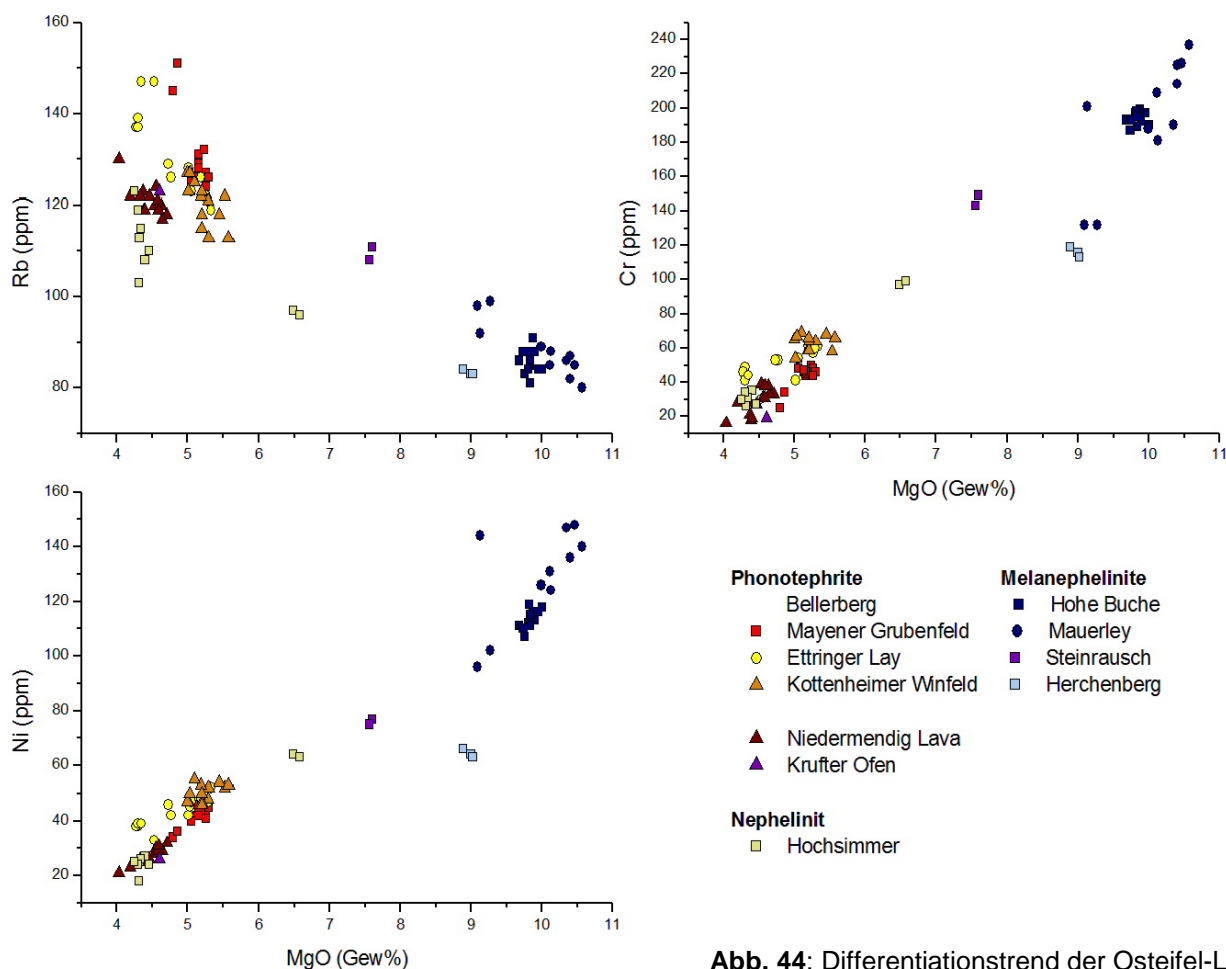


Abb. 44: Differentiationstrend der Osteifel-Laven.

Die Haupt- und insbesondere die Spurenelemente der Westeifel-Melanephelinite in Abb. 22 und 23 zeigen, dass der *Mosenberg* innerhalb eines möglichen Differenziationstrends das primitive Magma darstellen könnte; durch die Fraktionierung von Olivin und Klinopyroxen entwickeln sich die Laven über die *Römerberg*-Zusammensetzung zu Laven entsprechend *Roßbüsch*, *Goosberg*, *Rother Kopf*, *Eichholz* und *Dietzenley* und schließlich *Mühlenberg*. Die erniedrigten Gehalte von TiO_2 von *Eichholz* und *Roßbüsch* weisen auf eine Fraktionierung von Ilmenit und/oder (Titano-) Magnetit hin, die der Schmelze Titan entzogen hat. Insbesondere im Falle des *Roßbüsch*, der die niedrigsten Fe_2O_3 -Gehalte aller Melanephelinite zeigt, fraktionierte offensichtlich verstärkt eine Fe-Phase. Vor Allem in der Zusammensetzung von Cr, Ni und auch Co werden innerhalb der Melanephelinite Unterschiede im Grad der Differentiation deutlich.

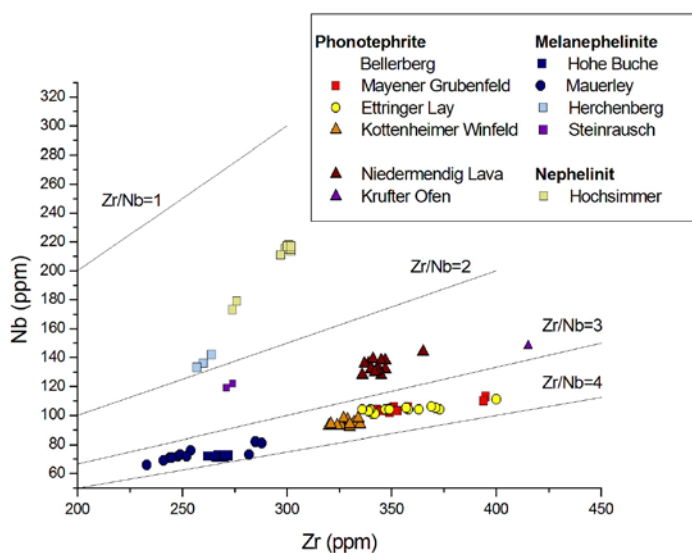


Abb. 45: Variation der Osteifel-Melanephelinite, Foidite und Phonotephrite in Nb und Zr.

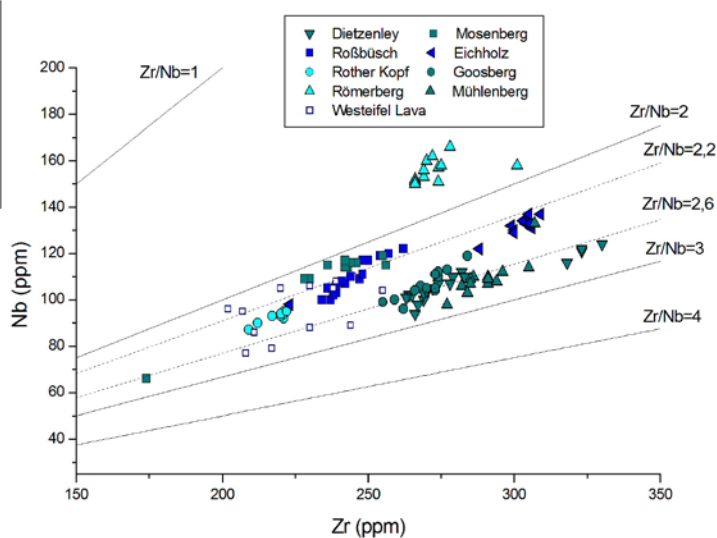


Abb. 46: Variation der primitiven Laven der Westeifel in Nb und Zr.

Charakteristisch für eine Magmenserie, die sich durch fortschreitende Fraktionierung entwickelt hat, sollte ein relativ konstantes Verhältnis ihrer inkompatiblen Elemente sein, z.B. von Zr/Nb (Abb. 45 und 46), da diese Elemente bei der Mantelschmelze hoch inkompatibel, relativ unbeeinflusst von Olivin- und Klinopyroxen- und Plagioklas Fraktionierung unter niedrigem Druck und in erster Linie vom Schmelzgrad in der Mantelquelle abhängig sind (Pearce 1996; Wilson et al. 2000; Baker et al. 1997). Bei fortschreitender Fraktionierung erhöht sich der Gehalt an diesen Elementen, beeinflusst aber nicht deren Verhältnis zueinander (Lippard 1973). Schließt man Krustenkontamination aus, liegen die Magmen einer Serie entlang des gleichen Zr/Nb -Ver-

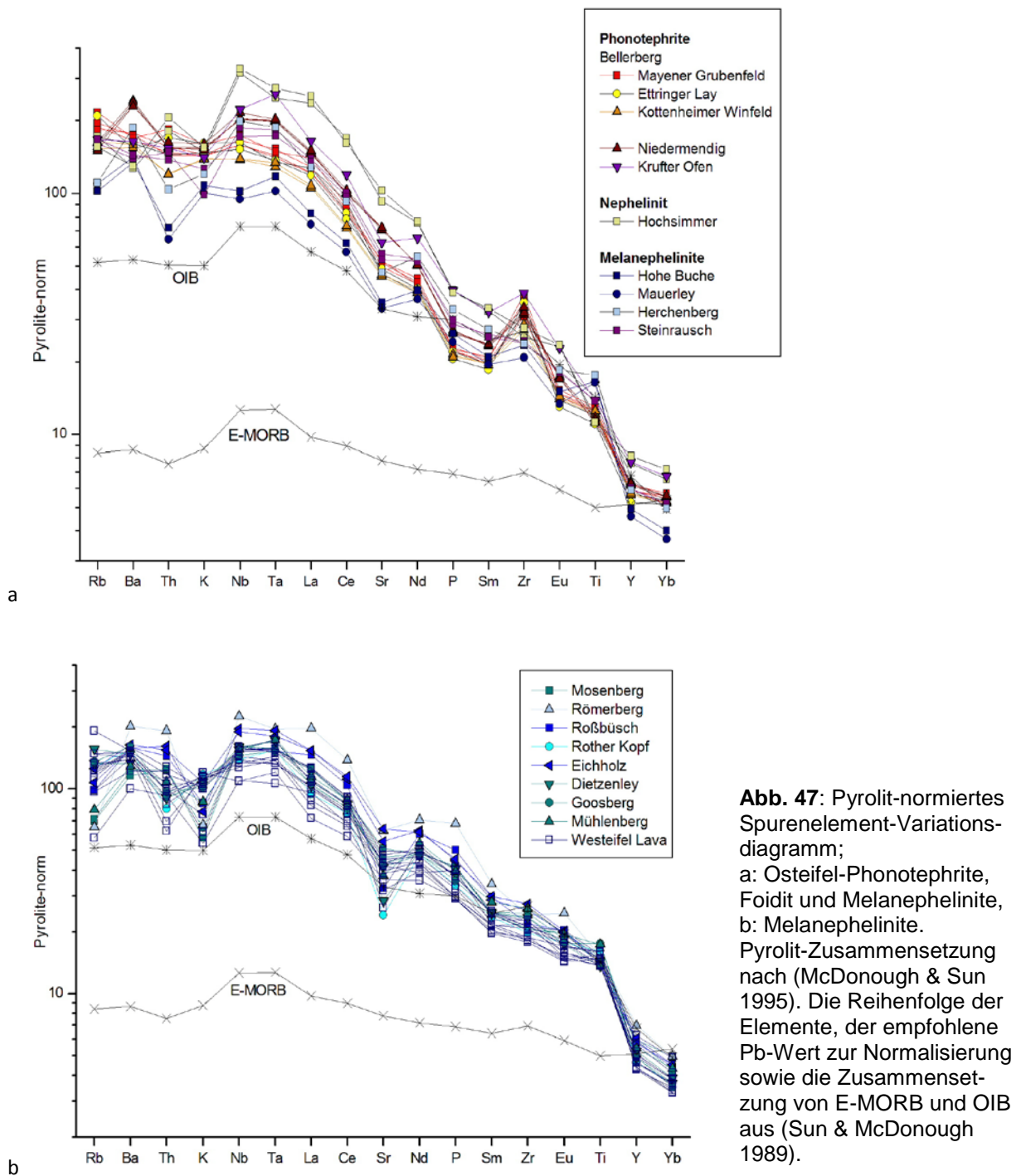
hältnisses (Wilson et al. 1995a). Das auffällig konstante Zr/Nb-Verhältnis von $\approx 3,5$ in Abb. 45 bestätigt die Vermutung, dass die Phonotephrite, zumindest die des *Bellerbergs*, höchstwahrscheinlich aus Differenzierung von Laven wie *Hohe Buche* und *Mauerley* hervorgegangen sind. Der Phonotephrit der *Niedermendig-Lava* weicht jedoch von diesem Verhältnis ab und liegt eher in einem konstanten Zr/Nb-Verhältnis mit den primitiven Laven von *Steinrausch* und dem Phonotephrit des *Krufter Ofens*. Somit scheinen in der Osteifel zwei Typen von Phonotephriten vorzuliegen, die aus zwei unterschiedlichen Typen von primitiven Magmen hervorgegangen sind. Vergleicht man die Melilith-haltigen Lava des *Herchenbergs* mit den basanitischen Laven von *Hohe Buche* und *Mauerley* zeigten sich bereits in den MgO-Variations-Diagrammen Abb. 22 und 23 deutliche Unterschiede in den Elementgehalten. Im Diagramm Ni/MgO (Abb. 44) ist erkennbar, dass der *Herchenberg* vom Differenziationstrend abweicht. In Abb. 45 weist der *Herchenberg* ein deutlich niedrigeres Zr/Nb-Verhältnis auf, das mehr dem des *Hochsimmers* entspricht. Somit kann, die Feststellung von Duda & Schmincke (1978) bestätigend, davon ausgegangen werden, dass es sich bei der *Herchenberg*- sowie bei der *Steinrausch-Lava* um einen anderen primitiven Magmentyp handelt als bei den Laven von *Hohe Buche* und *Mauerley*. In Abb. 46 ist zu erkennen, dass sich die Melanephelinite in ihren Zr/Nb-Verhältnissen untereinander so weit unterscheiden, dass man davon ausgehen kann, dass die Laven unterschiedlichen Magmenserien angehören. Ergänzt um weitere primitive Laven aus der Westeifel scheint sich ein relativ konstantes Zr/Nb-Verhältnis für jeweils *Mosenberg*, *Roßbüsch*, *Rother Kopf* und *Eichholz* mit einem Zr/Nb-Verhältnis zwischen 2,1 und 2,3 einerseits, sowie *Dietzenley*, *Goosberg* und *Mühlenberg* mit einem Zr/Nb-Verhältnis zwischen 2,5 und 2,7 andererseits abzuzeichnen; demzufolge könnten zumindest diese beiden Gruppen jeweils einer gemeinsamen Magmenserie angehören. Die Lava des *Römerbergs* weicht in ihrem Zr/Nb-Verhältnis von ca. 1,75 von den übrigen Westeifel-Laven ab, damit kann man davon ausgehen, dass sich auch dessen Magmenquelle von denen der anderen unterscheidet. Somit vertritt der *Römerberg* eine eigene Magmenserie und kann als Differenziations-Zwischenprodukt zwischen *Mosenberg* und den übrigen Melanepheliniten ausgeschlossen werden.

Insgesamt weisen die West- und Osteifeler Laven auffällige Differenzen in ihren Zr/Nb-Verhältnissen auf. Im Vergleich der primitiven Laven der Ost- mit denen der Westeifel in Abb. 45 und 47 entspricht lediglich der *Steinrausch-Basanit* den West-

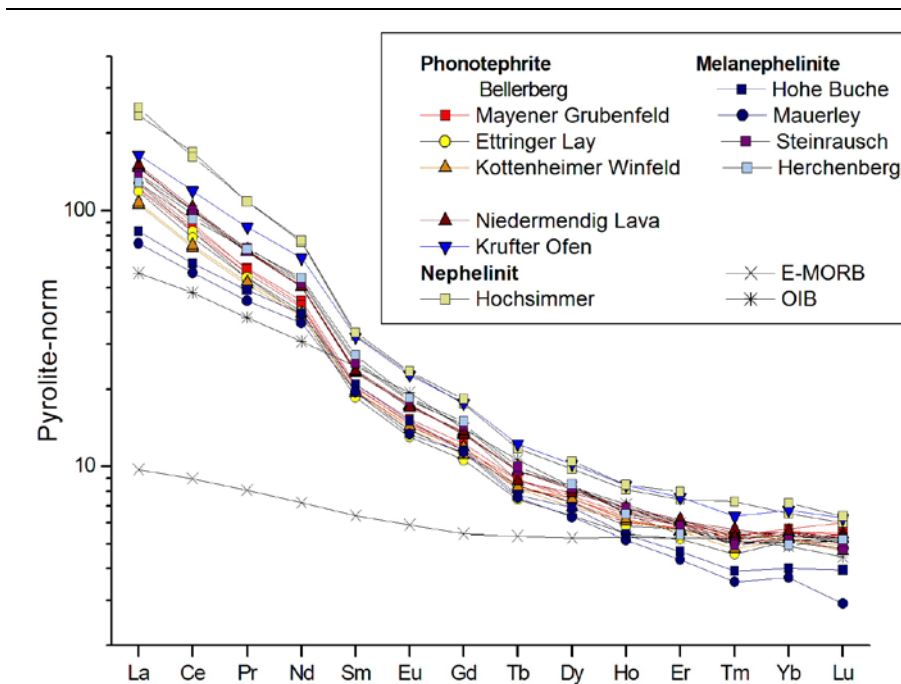
eifel-Laven von *Roßbüsch*, *Mosenberg* und *Rother Kopf*. Die primitiven Osteifel-Laven haben in Abb. 45 im Fall des *Herchenbergs* ein deutlich niedrigeres, im Falle von *Hohe Buche* und *Mauerley* ein deutlich höheres Zr/Nb-Verhältnis. Damit zeigt sich, dass sich nicht nur die Magmenserien innerhalb der Ost- und Westeifel unterscheiden, sondern dass in der Osteifel Magmenserien auftreten, die in der Westeifel nicht vorliegen. Die Magmen der Ost- und Westeifel mit ihren spezifischen Zr/Nb-Verhältnissen scheinen sich demnach aus verschiedenen gearteten Magmenquellen (entweder bezüglich der Zusammensetzung oder des Schmelzgrads) entwickelt zu haben.

In den Spurenelement-Variationsdiagrammen sind in Abb. 47a die Osteifel-Laven und in Abb. 47b für die Melanephelinite der Westeifel dargestellt. Zum Vergleich sind durchschnittliche Werte für E (enriched)-MORB (mid ocean ridge basalt) und OIB (ocean island basalt) hinzugefügt. Die Laven der Osteifel, sowie die der Westeifel ähneln mit der Anreicherung ihrer stark bis mittel inkompatiblen Elemente wesentlich dem Spurenelement-Muster von OIBs, zeigen aber im Vergleich zu den OIBs höhere Gehalte. Die Spurenelement-Muster der Ost- sowie der Westeifel stimmen bis auf wenige Ausnahmen sehr stark überein; dies deutet an, dass Phonotephrite, Foidite und Melanephelinite aus einem nur geringfügig inhomogenen Mantel entstanden sind. Geht man im Falle der Osteifel-Laven in Abb. 49a von der oben gefassten Vermutung aus, dass die *Bellerberg*-Phonotephrite Differenzierungsprodukte der *Hohe Buche*- und *Mauerley*-Melanephelinite sind, erklären sich die höheren Gehalte der inkompatiblen Elemente von Ba bis Nd, sowie Zr durch Anreicherung im differenzierten Magma. Die negative Th-Anomalie der Osteifel-Melanephelinite, die auch in leichter Ausprägung in der am wenigsten differenzierten Lava des *Bellerbergs*, der Lava des *Kottenheimer Winfelds*, erkennbar ist, könnte ein Hinweis auf residuale Amphibol oder Phlogopit im Erdmantel sein. Die auffällige negative K-Anomalie der Westeifel-Melanephelinite (Abb. 49b), die sich auch abgeschwächt in den niedrigen Rb-Gehalten findet, lässt ebenfalls den Schluss auf eine kaliumreiche residuale Phase in der Mantelquelle zu, vermutlich Phlogopit (Wilson et al. 1995a). Allen Melanepheliniten ist eine Sr-Verarmung zu Eigen, möglicherweise verursacht durch Fraktionierung von Kalifeldspat. Wie in den Verteilungen ihrer inkompatiblen Spurenelemente gleichen sich die Ost- und Westeifel-Laven in ihren REE-Mustern (Abb. 48). Die Laven beider Vulkanfelder zeigen Muster entsprechend dem OIB, jedoch mit deutlich erhöhten Gehalten in den inkompatiblen REE von La bis Nd.

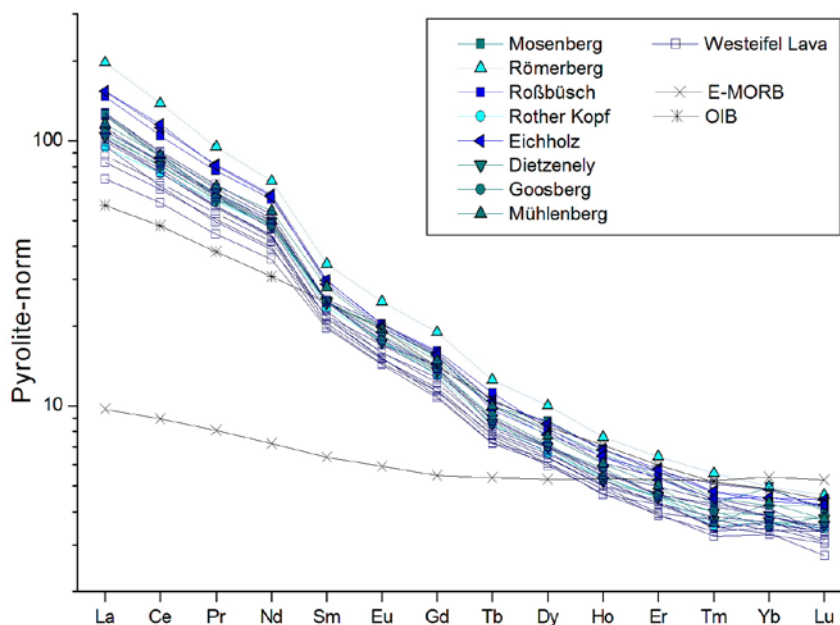
Nimmt man für die Osteifel-Laven (Abb. 48a) die oben beschriebene Fraktionierung an, erklärt dies die höheren Gehalte an inkompatiblen Elementen von La bis Nd in den Phonotephriten des *Bellerbergs* im Vergleich zu den Osteifel-Melanepheliniten der Hohen Buche und Mauerley und entspricht den Beobachtungen im Spurenelement-Variationsdiagramm. Das Fehlen einer negativen Eu-Anomalie in allen untersuchten Laven zeigt ebenfalls, dass in tieferen Regionen Plagioklas keine maßgebliche fraktionierende Phase war. Insgesamt zeigt keine der primitiven Laven im Vergleich zu den anderen eine deutlich unterschiedliche Anreicherung von leichten über schweren REE, was auf Unterschiede im Schmelzgrad zurückgeführt werden könnte.



6. Exkurs zur Petrologie der quartären Vulkanite der Ost- und Westeifel
 6.1 Differentiation und fraktionierte Kristallisation



a



b

Abb. 48: Pyrolit-normierte REE-Werte;
 a: Osteifel-Laven,
 b: Westeifel-Laven.
 Pyrolit-Zusammensetzung aus McDonough & Sun (1995).
 E-MORB und OIB aus Sun & McDonough (1989).

Die Differenzen in den REE-Mustern liegen ausschließlich in den absoluten Gehalten der REE. Damit kommen relevante Unterschiede im Schmelzgrad in ein und derselben Mantelquelle kaum in Frage: Geringere Schmelzgrade einer Lava würden sich in einer „Versteilung“ ihres REE-Musters ausdrücken, da die leichteren, inkompatibleren REE (La-Sm) bevorzugt in die Schmelze eintreten und zu höheren Gehalten in der Lava führen würden. Höhere Schmelzgrade würden zu einem „flachen“ REE-Muster führen, da nun auch die schweren, kompatiblen REE (Dy-Lu) in die Schmelze übergangen. Unter Einbeziehungen der Merkmale in den

Spurenelement-Variationsdiagrammen ist es wahrscheinlicher anzunehmen, dass die Schmelzgrade recht homogen sind. Signifikante Kontamination durch kontinentale Kruste wurde von Wörner et al. (1986) ausgeschlossen, die geringen Differenzen der REE-Muster können demnach auf unterschiedliche Zusammensetzung der Magmenquellen hinweisen. Damit scheinen auch die verschiedenen Zr/Nb-Verhältnisse der einzelnen Magmensuiten in Abb. 45 und 46 weniger auf unterschiedliche Schmelzgrade als auf chemisch heterogene Magmenquellen zurückzuführen sein.

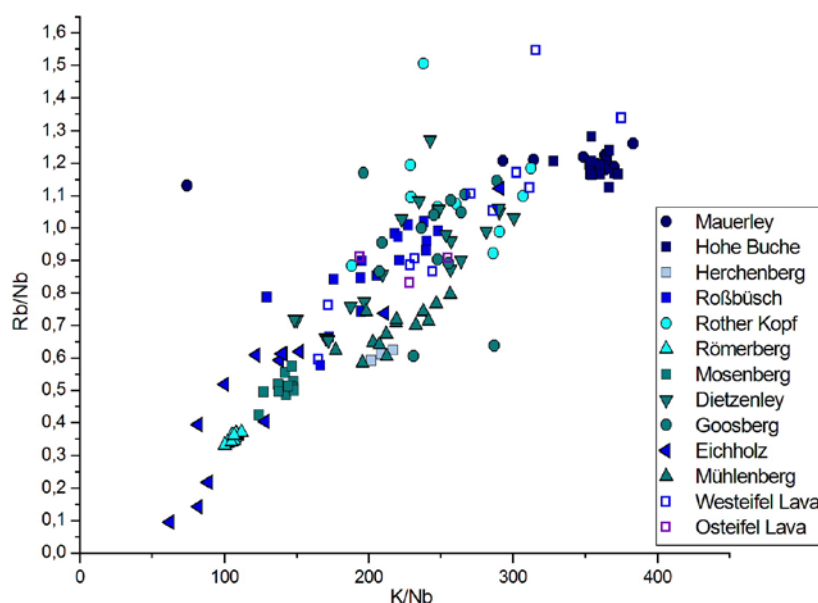


Abb. 49: Rb/Nb gegen K/Nb für die Abbaustellen sowie weitere Proben aus Ost- und Westeifel, nach Wilson & Downes (1991).

In Abb. 49 sind die Verhältnisse Rb/Nb zu K/Nb dargestellt. Die Werte zeigen entsprechend der Untersuchungen von Wilson & Downes (1991) einen durchgängigen linearen Trend, der als fortschreitende Eliminierung von Phlogopit aus einer homogenen Mantelquelle bei der partiellen Schmelze gedeutet werden kann. Die Autoren gehen jedoch davon aus, dass dieser Trend mit der Mischung zweier chemisch unterschiedlich angereicherter Mantelkomponenten oder deren partiellen Schmelzen zusammenhängt (Wilson & Downes 1991). Damit wären die negativen K-Anomalien ein Charakteristikum von K-armen Mantelkomponenten und nicht verursacht durch partielle Schmelzen mit einer residualen K-reichen Phase wie Phlogopit.

6.2 Magmenbildung

Baker et al. (1997) zeigen, dass Spurenelement-Verhältnisse wichtige Anzeiger für die relativen Einflüsse von Granat- und Spinell-führendem Lherzolith-Mantel auf die Petrogenese von Intra-Platten-Magmen sind. Sie modellierten die partiellen Schmelzkurven einer an inkompatiblen Elementen angereicherten Mantelquelle für Granat (grt)- sowie für Spinell (sp)-Lherzolith anhand der REE, Nb, Zr und Y-Werte. Diagramme zur Schmelzmodellierung mit Verhältnissen von LREE/HREE gegen MREE/HREE zeigen sich gemäß Baker et al. (1997) als besonders geeignet, da darin eine Unterscheidung zwischen den Schmelzen im Spinell- und Granat-Stabilitätsfeld möglich ist. In Abb. 50a ist das Zr/Nb- gegen das Ce/Y-Verhältnis dargestellt. Im Diagramm zeigen die untersuchten Laven geringere Variationen in ihren Zr/Nb-Verhältnissen, wobei, wie zu Abb. 45 und 46 festgestellt, die primitiven Laven der Osteifel, die Melanephelinite der *Hohen Buche* und *Mauerley*, ein höheres Verhältnis haben als die der Westeifel. Größere Unterschiede zeigen die Laven in ihrem Verhältnis Ce/Y. Tendenziell scheint ein Anstieg des Zr/Nb-Verhältnisses mit einem Absinken der Ce/Y-Verhältnisses verbunden zu sein. Die Verhältnisse dieser Elemente werden von Niederdruck-Fraktionierung von ol + cpx + plag und Krustenkontamination nur wenig beeinflusst. Damit sind nach Baker et al. (1997) Unterschiede in den Schmelzgraden die nächstliegende Erklärung, dem widersprechen aber im vorliegenden Fall die gleichförmigen REE-Muster. Neben den untersuchten Laven sind in Abb. 50a die Kurven für fraktionierte Schmelze von Granat- und Spinell-Lherzolith mit einer primitiven Mantel-Zusammensetzung angegeben. Die Lage der Eifel-Laven deckt sich jedoch weder mit der einen noch der anderen Schmelzkurve. Gemäß Baker et al. (1997) lässt sich aber mit einer angereicherten Zusammensetzung eine Granatfazielle Schmelzkurve modellieren, die den Eifel-Laven näher kommt. In dieser Abbildung wird auch deutlich, dass die Eifel-Laven jenseits der modellierten Kurven für Amphibol-Granat- bzw. Amphibol-Spinell-Peridotit liegen. Abb. 50b zeigt, dass sich nach den Modellierungen von Baker et al. (1997) für die Schmelzkurve von Spinell-Lherzolith eine steile positive Korrelation zwischen Yb und La/Yb ergibt, im Falle des Granat-Lherzoliths das Yb aber konstant bleibt, da es im Granat zurückgehalten oder gepuffert wird. Die Yb-Werte der primitiven Osteifel-Melanephelinite variieren um ± 2 ppm, eine leichte Abweichung durch höhere La-Werte zeigen entsprechend den REE-Mustern *Mosenberg*, *Eichholz*, *Roßbüsch* und, stärker, *Römerberg*. Die Mehrzahl der primitiven Eifel-Laven bewegt sich dabei im Bereich der Mischungslinien

zwischen 0,1% partieller Schmelze im Spinell-Lherzolith und 1, bzw. 2% partieller Schmelze im Granat-Lherzolith-Feld zwischen 0,80 grt; 0,20 sp und 0,60 grt; 0,40 sp. *Mosenberg, Eichholz, Roßbüsch* und insbesondere *Römerberg* weichen jedoch von der Mischungslinie ab; ob diese Laven einer anderen Mischungslinie entsprechen oder dem zusätzlichen Einfluss einer anderen Mantelquelle unterliegen, ist diesem Diagramm nicht zu entnehmen. In Abb. 50c wird anhand der Verhältnisse von La/Yb und Dy/Yb deutlich, dass unterschiedliche Schmelzgrade ausschließlich im Granat-Lherzolith nicht die primitiven Eifel-Melanephelinite generieren können. Schmelzen der Granat-Lherzolith hat ein viel größeres Verhältnis von Dy/Yb (außer, wenn er als Ausgangszusammensetzung ein ungewöhnlich geringes Dy/Yb-Verhältnis hätte). Schmelze in der Spinell-Fazies verursacht nur geringe Veränderungen in Dy/Yb und

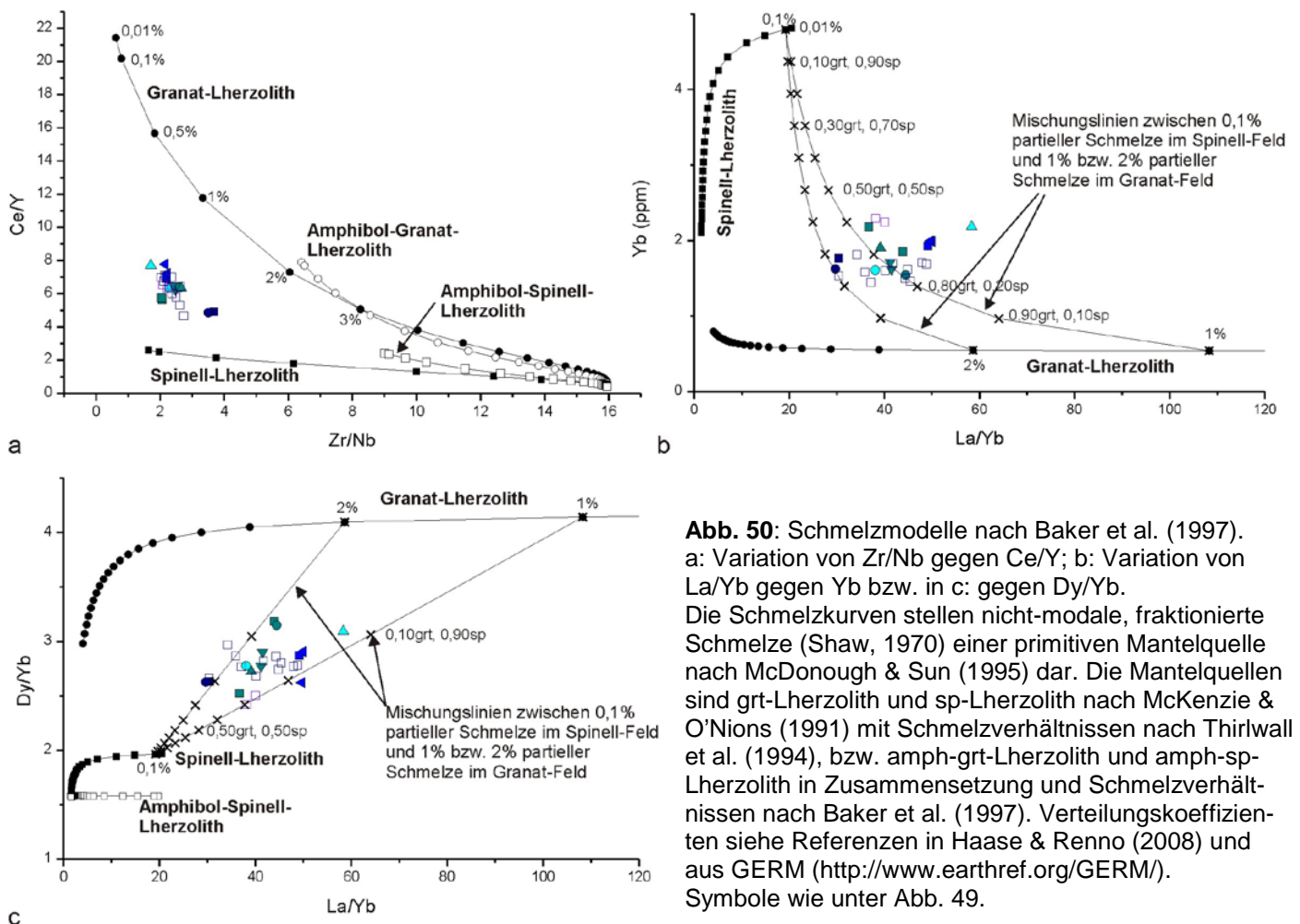


Abb. 50: Schmelzmodelle nach Baker et al. (1997). a: Variation von Zr/Nb gegen Ce/Y; b: Variation von La/Yb gegen Yb bzw. in c: gegen Dy/Yb. Die Schmelzkurven stellen nicht-modale, fraktionierte Schmelze (Shaw, 1970) einer primitiven Mantelquelle nach McDonough & Sun (1995) dar. Die Mantelquellen sind grt-Lherzolith und sp-Lherzolith nach McKenzie & O’Nions (1991) mit Schmelzverhältnissen nach Thirlwall et al. (1994), bzw. amph-grt-Lherzolith und amph-sp-Lherzolith in Zusammensetzung und Schmelzverhältnissen nach Baker et al. (1997). Verteilungskoeffizienten siehe Referenzen in Haase & Renno (2008) und aus GERM (<http://www.earthref.org/GERM/>). Symbole wie unter Abb. 49.

La/Yb. Nach dem Modell von Baker et al. (1997) verlaufen Mischungen von Schmelzen aus dem Granat- und Spinell-Feld linear. Dementsprechend stellen die primitiven Eifel-Melanephelinite Mischungen aus höheren Schmelzanteilen von Granat-

faziellern Mantel mit geringeren Schmelzfraktionen von Spinell-faziellern Mantel dar. Dabei zeigt sich, dass die Laven nahe dem geringeren 1% Schmelzgrad von Granat-Peridotit auch diejenigen sind, die eine geringfügige Anreicherung der LREE und inkompatiblen Spurenelemente zeigen. Bei der Auswertung dieser Schmelzmodelle ist zu beachten, dass die Modell-Schmelzkurven von der Mantel-Ausgangszusammensetzung und sehr stark von der Wahl der Verteilungskoeffizienten abhängig sind. Insgesamt lässt die Anwendung der Modelle aber die Vermutung zu, dass die Schmelzen an der Granat-Spinell-Übergangszone jenseits des Stabilitätsfelds von Amphibol entstanden sind.

6.3 Sr-Nd-Pb-Isotopie

Die primitiven Laven der West- sowie der Osteifel liegen im „verarmten“ Bereich des Sr-Nd-Isotopen-Diagramms (Abb. 51) im unteren Bereich eines linearen Trends, der von anderen mafischen Laven der känozoischen Vulkangebiete in Deutschland gebildet wird. Der Trend bewegt sich weg von einer verarmten Quelle in Richtung der „Bulk Earth“-Zusammensetzung, was dahingehend interpretiert werden kann, dass hier eine Mischung unterschiedlicher Mantelquellen bzw. deren partieller Schmelzen vorliegt (Wilson & Downes 1991). Die verarmte Quelle entspricht dem „endmember A“, von Wilson & Downes (1991), einer Mischung aus verarmtem Mantel (*depleted mantle*; DM) und HIMU-Mantelquellen („high μ “, $\mu = {}^{238}\text{U}/{}^{204}\text{Pb}$, angereichert an U und Th relativ zu Pb, mit niedrigem ${}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}$), bzw. dem „European Asthenospheric Reservoir“ (EAR) von Granet et al. (1995) und Wilson & Bianchini (1999), der „Low Velocity Component“ (LVC) von Hoernle et al. (1995) oder der FOZO („Focal Zone“) nach Stracke et al. (2005). Granet et al. (1995) bezeichnen die EAR als dem europäischen Vulkanismus gemeinsames sublithosphärisches Endglied ähnlich der HIMU, das als Ausdruck eines Mantelplumes gewertet wird. Die LVC wird von Hoernle et al. (1995) als Charakteristikum einer deckenartigen Zone beschrieben, die sich unter dem östlichen Atlantik, Zentraleuropa und dem mediterranen Raum erstreckt und als aufsteigender Mantel interpretiert wird. Die FOZO nach Stracke et al. (2005) wird als gängige und womöglich ubiquitäre Mantelkomponente definiert, die durch Recycling ozeanischer Lithosphäre entstanden sein kann. Die hier analysierten Laven enthalten mehr radiogenes Sr und weniger radiogenes Nd als die Vergleichslaven und liegen in Richtung des unteren Endglieds der känozoischen Vulkanite, das gemäß dieser Grafik wohl dem *Enriched Mantle Type I* (EM I) ent-

spricht, wobei die Osteifeler Laven mehr von EM I beeinflusst zu sein scheinen als die Westeifeler. EM I zeigt Affinitäten zur unteren Kruste und gilt z.B. als Komponente aus alter subduzierter ozeanischer Lithosphäre (HIMU-Quelle) und geringen Mengen eingeschlossener pelagischer Sedimente (z.B. Weaver 1991). Die Zusammensetzung der Pb-Isotopie zeigt, dass die Westeifel-Laven im Vergleich zu denen der Osteifel einen leicht erhöhten Gehalt an radiogenem Blei haben. Im Vergleich von $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ zu $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Abb. 52a) zeigt sich, dass sich die untersuchten West- und Osteifel-Laven in ihrer Pb-Isotopen-Zusammensetzung von der „Northern Hemisphere Reference Line“ (NHRL) von Hart (1984) mit einer schwächeren negativen Steigung wegbewegen, was entsprechend dem Nd-Sr-Trend auf eine Mischung mit einer anderen Mantelkomponente hinweisen könnte (Wörner et al. 1986; Wilson & Downes 1991). Die höheren Gehalte der Westeifel-Laven an radiogenem Blei zeigen sich deutlicher in Abb. 52b. Die Proben bewegen sich entsprechend der Ost- und Westeifel-Werte von Wörner et al. (1986) subparallel mit geringerer Steigung zum allgemeinen Trend der känozoischen Vergleichsvulkanite entlang der NHRL,

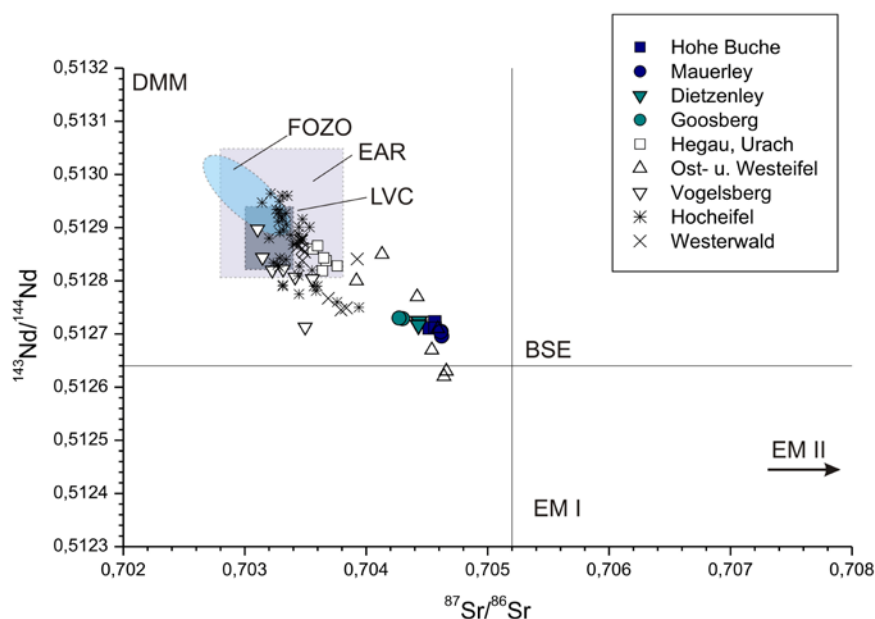


Abb. 51: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ gegen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ für die Osteifel-Laven von *Hohe Buche* und *Mauerley* und die Westeifel-Laven von *Dietzenley* und *Goosberg*. Im Vergleich dazu Werte aus Hegau und Urach (Wilson et al. 1995b), Ost- und Westeifel (Wörner et al. 1986), Vogelsberg (Bogaard & Wörner 2003), Hocheifel (Jung et al. 2006; Fekiacova et al. 2007a), Westerwald (Haase et al. 2004). Lage der Mantel-Endglieder nach (Zindler & Hart 1986), EAR nach (Wilson & Bianchini 1999), LVC nach (Hoernle et al. 1995), FOZO nach (Stracke et al. 2005).

wobei, wie in Abb. 52a, die primitiven Osteifel-Laven am weitesten von der Referenzlinie entfernt liegen. Die Unterschiede zwischen Ost- und Westeifel-Laven könnten darauf beruhen, dass die Mantelkomponenten beider Magmensuiten voneinander abweichen. Die Variation der Nd- mit den Pb-Isotopen in Abb. 53 bestätigt diese Tendenz. Auch hier liegen die analysierten Laven im allgemeinen Trend, der sich stetig von einem Endglied mit hohem radiogenem Pb und Nd zu einem Endglied mit geringem radiogenen Pb und Nd bewegt. Bei ersterem handelt es sich um die Komponente, die in das Feld der FOZO, EAR bzw. LVC fällt, das zweite Endglied entspricht EM I.

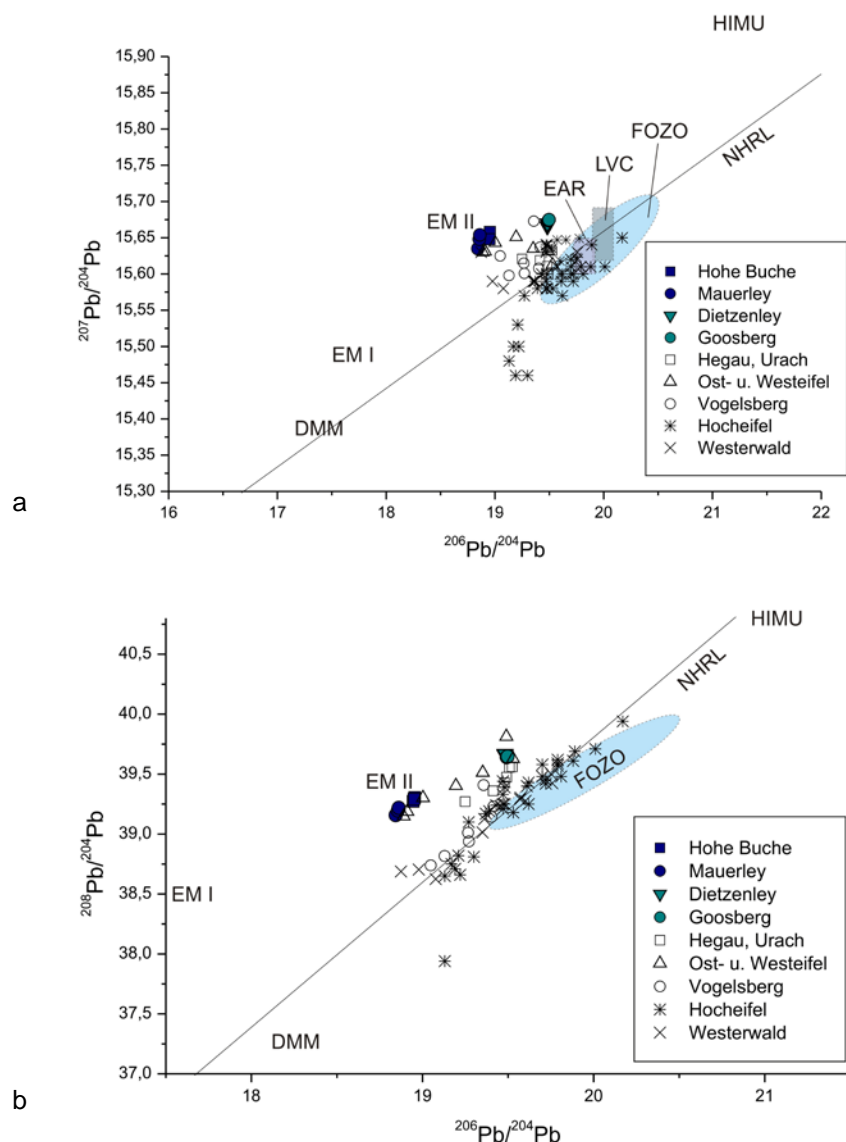


Abb. 52
 a: $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ bzw.
 b: $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ gegen
 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. NHRL nach
 Hart (1984), die übrigen
 Angaben wie Abb. 51.

Vergleicht man die Anreicherung der leichten über die schweren REE mit den Sr-Isotopen, zeigt sich, dass die Westeifel-Laven der *Dietzenley* und des *Goosbergs* bei geringerem $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis eine stärkere Anreicherung der leichten REE

besitzen als die Osteifel-Laven der *Hohen Buche* und der *Mauerley*, diese besitzen mehr radiogenes Sr, sind aber weniger stark angereichert an leichten REE. Dies kann als weiterer Hinweis darauf gewertet werden, dass die Unterschiede in der Anreicherung der LREE nicht nur auf unterschiedliche Schmelzgrade zwischen den primitiven Laven von *Mauerley* und *Hohe Buche* einerseits und *Dietzenley* und *Goosberg* andererseits zurückzuführen sind, sondern dass bereits die Mantelquelle in unterschiedlichem Maße an LREE angereichert ist.

Abb. 53: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ gegen $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Vergleichslaven und Mantelkomponenten wie in Abb. 51.

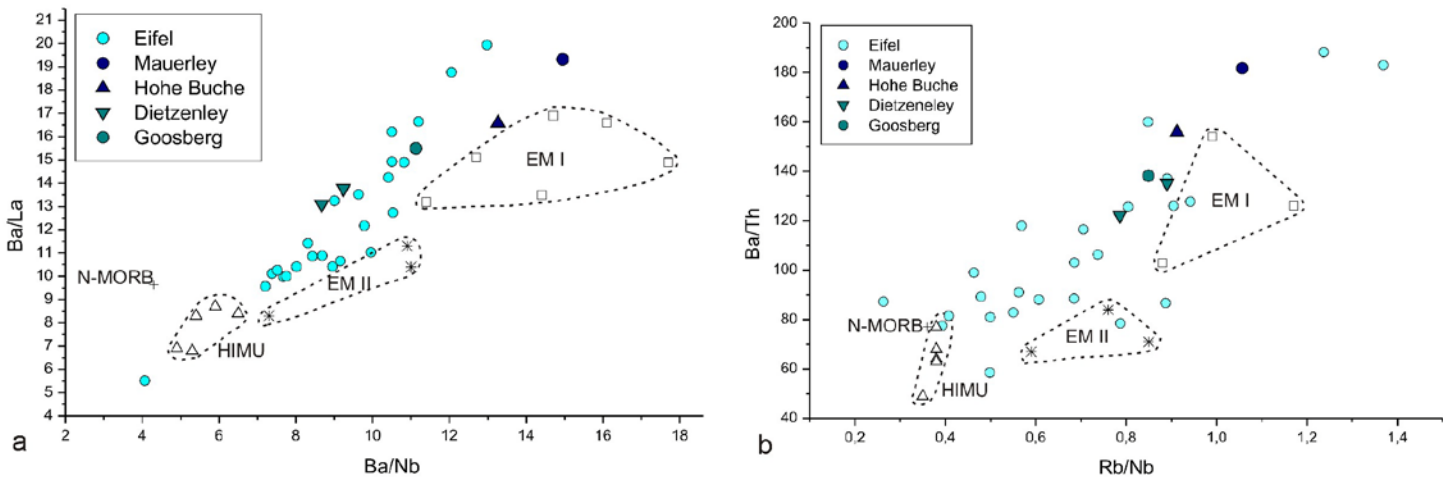
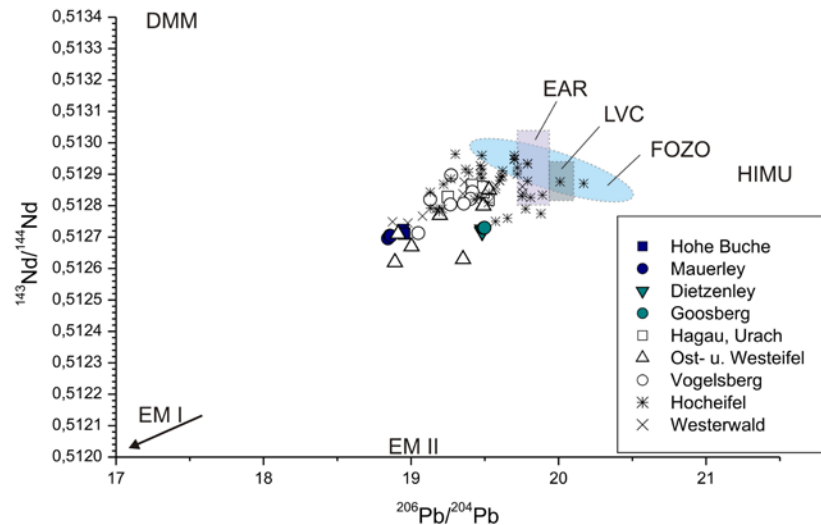


Abb. 54: Diagramme von a) Ba/Nb gegen Ba/La und b) Rb/Nb gegen Ba/Th für OIB-Endglieder nach Weaver (1991) im Vergleich zu den primitiven Ost- und Westeifelmagmen; Mauerley, Hohe Buche, Dietzenley und Goosberg sind herausgehoben.

Weaver (1991) korrelierte die radiogenen Isotopensignaturen von Mantelendgliedern mit Unterschieden in der Zusammensetzung der hoch inkompatiblen Spurenelemente. Mittels der Zusammensetzung der inkompatiblen Spurenelemente in Abb. 54a und b lässt sich die Vermutung bestärken, dass die Mantelkomponenten Mischungen einer verarmten Mantelquelle mit einer angereicherten des Typs EM I sind, wobei die

primitiven Magmen von *Mauerley* und *Hohe Buche* stärker von EM I beeinflusst sind, als die von *Dietzenley* und *Goosberg*. Es zeigt sich, dass sich die Eifelmagmen in einem relativ konstanten Trend von der HIMU-Zusammensetzung in Richtung der EM I wegbewegen. Die primitiven Laven der Ost- und Westeifel nehmen einen relativ großen Bereich ein, was, wie zu Abb. 51 bereits vermerkt, darauf schließen lässt, dass die Mantelquellen unter Ost- und Westeifel in ihrem Einfluss von verarmtem Mantel und EM I sehr heterogen sind.

Zusammenfassung

Bei dieser petrologischen Darstellung ist zu beachten, dass es sich aufgrund der verfügbaren Daten tatsächlich nur um einen Exkurs handelt, in dem versucht wird, mit Hilfe bekannter Modelle geochemische Tendenzen in den Laven zu deuten und in einen übergeordneten Zusammenhang zu stellen. Tiefer gehende petrogenetische Interpretationen sind auf vorliegender Grundlage problematisch, da die Eifeler Laven nicht nach petrologischen Gesichtspunkten beprobt wurden und damit keinen repräsentativen Querschnitt über alle in der Eifel vorliegenden primitiven Magmentypen darstellen.

Die hier untersuchten quartären Laven der Ost- und Westeifel stellen hauptsächlich relativ undifferenzierte (Melanephelinite, Foidite) bis gering differenzierte Laven (Phonotephrite) dar. Anhand des Zr/Nb-Verhältnisses zeigt sich, dass die primitiven Magmen unterschiedlichen Serien angehören, dass aber auch die differenzierteren Phonotephrite unterschiedliche Typen darstellen. Die primitiven Magmen entstanden entsprechend der REE-Zusammensetzungen durch partielle Schmelze in der Übergangszone von Granat- zu Spinell-Peridotit jenseits der Stabilität von Amphibol. Die negativen K- und Rb- Anomalien werden eher als Eigenschaft der Mantelquelle gewertet als durch partielle Mantelschmelze bei residualem Phlogopit, was einer Tiefe von ca. 75 – 90 km entspricht (z.B. Wilson et al. 1995b). Die gleichmäßigen Spurenelement- und REE-Muster sowie das Schmelzmodell nach Baker et al. (1997) deuten darauf hin, dass die Schmelzgrade der einzelnen Magmen niedrig waren und sich nur geringfügig unterschieden. In Verbindung mit den Isotopen-Daten liegt der Schluss nahe, dass die Unterschiede in den inkompatiblen Spurenelementen auf einen Erdmantel zurückzuführen sind, der unter dem Eifeler Vulkanfeld deutlich

heterogen zusammengesetzt ist. Nach der Sr-Nd-Pb-Isotopie zu urteilen, stellt das Mantelreservoir eine Mischung aus einer allgemeinen verarmten Mantelkomponente (entsprechend der EAR/LVC/FOZO) und einer angereicherten Komponente des Typs EM I dar.

Literatur

- Anderson, D. L., (2005). Scoring hotspots: The plume and plate paradigms, in *Plates, plumes and paradigms*, eds. G. R. Foulger, J. H. Natland, D. C. Presnall & D. L. Anderson Geological Society of America, 31-54.
- Antonelli, F., G. Nappi & L. Lazzarini, 2003. Roman Millstones from Orvieto (Italy): Petrographic and Geochemical Data for a New Archaeometric Contribution. *Archaeometry*, 43 (2), 167-89.
- Baales, M., O. Jöris, M. Street, F. Bittmann, B. Weninger & J. Wiethold, 2002. Impact of the Late Glacial Eruption of the Laacher See Volcano, Central Rhineland, Germany. *Quaternary Research*, 58, 273-88.
- Baatz, D., 1995. Die Wassermühle bei Vitruv X 5,2. *Saalburg-Jahrbuch*, 48, 5-18.
- Backhaus, K., B. Erichson, W. Plinke, R. Weiber, 2008. *Multivariate Analysemethoden*, Berlin-Heidelberg-New York.
- Baker, J. A., M. A. Menzies, M. F. Thirlwall & C. G. Macpherson, 1997. Petrogenesis of Quaternary Intraplate Volcanism, Sana'a, Yemen: Implications for Plume–Lithosphere Interaction and Polybaric Melt Hybridization. *Journal of Petrology*, 38 (10), 1359–90.
- Barth, A., M. Jordan & J. R. R. Ritter, (2007). Crustal and Upper Mantle Structure of the French Massif Central Plume, in *Mantle Plumes*, eds. J. R. R. Ritter & U. R. Christensen Berlin Heidelberg: Springer, 159-84.
- Baxter, M. J., 1995. Standardization and Transformation in Principal Component Analysis, with Applications to Archaeometry. *Applied Statistics*, 44 (4), 513-27.
- Beccaluva, L., M. Coltorti, P. Di Girolamo, L. Melluso, L. Milani, V. Morra & F. Siena, 2002. Petrogenesis and evolution of Mt. Vulture alkaline volcanism (Southern Italy). *Mineralogy and Petrology*, 74, 277-97.
- Bednarz, U. & H.-U. Schmincke, 1990. Evolution of the Quaternary melilitone-nephelinite Herchenberg volcano (East Eifel). *Bulletin of Volcanology*, 52, 426-44.
- Bernhard, H., (1990). Die römische Geschichte in Rheinland-Pfalz, in *Die Römer in Rheinland-Pfalz*, ed. H. Cüppers Stuttgart: Konrad Theiss Verlag, 39-168.
- Bischof, D., 2000. Siedler, Söldner und Piraten. Ausstellungskatalog. *Bremer Archäologische Blätter, Beiheft, 2*.
- Bogaard, P. J. F. & H.-U. Schmincke, (1990). *Vulkanologische Karte der Osteifel*, 1:50.000, Koblenz: Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz.

-
- Bogaard, P. J. F. & G. Wörner, 2003. Petrogenesis of Basanitic to Tholeiitic Volcanic Rocks from the Miocene Vogelsberg, Central Germany. *Journal of Petrology*, 44 (3), 569-602.
- Budkewitsch, P. & P.-Y. Robin, 1994. Modelling the evolution of columnar joints. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 59, 219-39.
- Büchel, G., (1994). *Vulkanologische Karte West- und Hocheifel*, ed. U. M. Institut für Geowissenschaften Mainz.
- Büchel, G. & H. Mertes, 1982. Die Eruptionszentren des Westeifeler Vulkanfeldes. *Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft*, 133, 409-29.
- Büchel, L., V. Lorenz, H.-U. Schmincke & B. Zimanowski, 1986. Quartäre Vulkanfelder der Eifel. DMG-Tagung, Exkursion C1. *Fortschritte der Mineralogie*, 64 (Beiheft 2), 97-141.
- Buffone, L., S. Lorenzoni, M. Pallara & E. Zanettin, 1999. Le macine rotatorie in rocce vulcaniche di Pompei. *Rivista di Studi Pompeiani*, 10, 117-30.
- Buffone, L., S. Lorenzoni, M. Pallara & E. Zanettin, 2003. The Millstones of Ancient Pompei: A petro-archaeometric study. *European Journal of Mineralogy*, 15, 207-15.
- Caroff, M., C. Ambics, R. C. Maury & J. Cotten, 1997. From alkali basalt to phonolite in hand-size samples: vapor-differentiation effects in the Bouzentès lava flow (Cantal, France). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 79, 47-61.
- De Astis, G., P. D. Kempton, A. Peccerillo & T. W. Wu, 2006. Trace element and isotopic variations from Mt. Vulture to Campanian volcanoes: constraints for slab detachment and mantle inflow beneath southern Italy. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151, 331-51.
- De Fino, M., L. La Volpe & G. Piccarreta, 1982. Magma evolution at Mount Vulture (Southern Italy). *Bulletin of Volcanology*, 45 (2), 116-26.
- Dèzes, P., S. M. Schmid & P. A. Ziegler, 2004. Evolution of the European Cenozoic Rift System: interaction of the Alpine and Pyrenean orogens with their foreland lithosphere. *Tectonophysics*, 389, 1-33.
- Duda, A., 1984. Die petrologische Bedeutung der "Grünkern"-Pyroxene und andere Einsprenglingsphasen in den Foiditen und Basaniten der Westeifel. *Bochumer Geologische und Geotechnische Arbeiten*, 16, 170S.
- Duda, A. & H.-U. Schmincke, 1978. Quaternary Basanites, Melilite Nephelinites and Tephrites from Laacher See Area (Germany). *Neues Jahrbuch für Mineralogie. Abhandlungen*, 132 (1), 1-33.
-

-
- Duda, A. & H.-U. Schmincke, 1985. Polybaric differentiation of alkali basaltic magmas: evidence from green-core clinopyroxenes (Eifel, FRG). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 91, 340-53.
- Eckey, H.-F., R. Kosfeld, M. Rengers, 2002. *Multivariate Statistik. Grundlagen – Methoden – Beispiele*, Wiesbaden.
- Fekiacova, Z., D. F. Mertz & A. W. Hofmann, 2007a. Geodynamic setting of the Tertiary Hocheifel volcanism (Germany), Part II: Geochemistry and Sr, Nd and Pb isotopic compositions, in *Mantle Plumes*, eds. J. R. R. Ritter & U. R. Christensen Berlin Heidelberg: Springer, 207-39.
- Fekiacova, Z., D. F. Mertz & P. R. Renne, 2007b. Geodynamic setting of the Tertiary Hocheifel volcanism (Germany): Part I: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology, in *Mantle Plumes*, eds. J. R. R. Ritter & U. R. Christensen Berlin Heidelberg: Springer, 185-206.
- Forrer, R., 1912. Ein versunkener spätantiker Mühlsteintransport in Wantzenau bei Straßburg. *Anzeiger für Elsässische Altertumskunde*, 1-4, 131-43.
- Fuhrmann, U. & H. J. Lippolt, 1985. Excess Argon and dating of Quaternary Eifel volcanism: I. The Schellkopf alkali phonolite / East Eifel. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie. Monatshefte*, 8, 484-97.
- Fuhrmann, U. & H. J. Lippolt, 1986. Excess Argon and Dating of Quaternary Eifel Volcanism: II. Phonolitic and Foiditic Rocks near Rieden, East Eifel/FRG. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie. Abhandlungen*, 172 (1), 1-19.
- Fuhrmann, U. & H. J. Lippolt, 1987. Excess argon and dating of quaternary Eifel volcanism: III. Alkali basaltic rocks of Central West Eifel/FR Germany. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie. Monatshefte*, 4, 213-36.
- Germann, K. & T. Cramer, 2005. Methoden der Herkunftsbestimmung für Naturwerksteine; das Beispiel des Marmors. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 156 (1), 25-31.
- Gerstenberger, H. & G. Haase, 1997. A highly effective emitter substance for mass spectrometric Pb isotope ratio determinations. *Chemical Geology*, 136, 309-12.
- Goes, S., W. Spakman & H. Bijwaard, 1999. A Lower Mantle Source for Central European Volcanism. *Science*, 286, 1928-31.
- Gourgaud, A. & G. Camus, 1984. Magma Mixing at La Nugère Volcano (Chaîne des Puys, Massif Central, France): Role in the Trachyandesite Genesis. *Bulletin of Volcanology*, 47 (4), 781-805.
-

-
- Gourgaud, A. & B. Villemant, 1992. Evolution of magma mixing in an alkaline suite: the Grande Cascade sequence (Monts-Dore, French Massif central). *Geochemical Modelling. Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 52, 255-75.
- Granet, M., M. Wilson & U. Achauer, 1995. Imaging a mantle plume beneath the French Massif Central. *Earth and Planetary Science Letters*, 136, 281-96.
- Grossenbacher, K. A. & S. M. McDuffie, 1995. Conductive cooling of lava: columnar joint diameter and stria width as functions of cooling rate and thermal gradient. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 69, 95-103.
- Haase, K. M., B. Goldschmidt & C.-D. Garbe-Schonberg, 2004. Petrogenesis of of Tertiary intra-plate lavas from the Westerwald region, Germany. *Journal of Petrology*, 45, 883-905.
- Haase, K. M. & A. D. Renno, 2008. Variation of magma generation and mantle sources during continental rifting observed in Cenozoic lavas from the Eger Rift, Central Europe. *Chemical Geology*, 257, 192-202.
- Hamelin, C., H.-M. Seitz, J.-A. Barrat, L. Dosso, R. C. Maury & M. Chaussidon, 2009. A low $\delta^7\text{Li}$ lower crustal component: Evidence from an alkalic intraplate volcanic series (Chaîne des Puys, French Massif Central). *Chemical Geology*, 266 (3-4), 205-217.
- Hart, S. R., 1984. A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle. *Nature*, 309 (28), 753-7.
- Hinz, H., 1966. Jahresbericht 1964. *Bonner Jahrbücher*, 166, 609.
- Hoernle, K., Y.-S. Zhang & D. Graham, 1995. Seismic and geochemical evidence for large-scale mantle upwelling beneath the eastern Atlantic and western and central Europe. *Nature*, 374, 34-8.
- Hörmann, P. K. & A. Richter, 1983. Vergleichende mineralogisch-petrographische Untersuchungen an Mühlsteinresten aus Haithabu und Bruchsteinproben aus der Eifel. *Berichte über die Ausgrabungen in Haithabu*, 18, 93-108.
- Hörter, F., 1994. *Getreidereiben und Mühlsteine aus der Eifel. Ein Beitrag zur Steinbruch- und Mühlsteingeschichte*, Mayen.
- Hörter, F., (2000). Vom Reibstein zur römischen Kraftmühle, in *Steinbruch und Bergwerk. Vulkanpark-Forschungen*, ed. V. G. u. R.-G. Zentralmuseum Mainz: Verlag des Römisch-Germanischen Zentralmuseums
- Jacob, D. E., 2006. High Sensitivity Analysis of Trace Element-Poor Geological Reference Glasses by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass
-

-
- Spectrometry (LA-ICP-MS). *Geostandards and Geoanalytical Research*, 30 (3), 221-35.
- Jacobi, H., 1912. Römische Getreidemühlen. *Saalburg-Jahrbuch*, 3, 75-95.
- Jacobs, J., 1914. *Die Verwertung der vulkanischen Bodenschätze in der Laacher Gegend*. Braunschweig: Westermann.
- Jochum, K. P. & F. Nehring, 2006. GeoReM preferred values. http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/sample_query_pref.asp.
- Jung, C., S. Jung, E. Hoffer & J. Berndt, 2006. Petrogenesis of Tertiary Mafic Alkaline Magmas in the Hocheifel, Germany. *Journal of Petrology*, 47 (8), 1637-71.
- Jung, S. & P. Masberg, 1998. Major- and trace-element systematics and isotope geochemistry of Cenozoic mafic volcanic rocks from the Vogelsberg (central Germany). Constraints on the origin of continental alkaline and tholeiitic basalts and their mantle sources. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 86, 151-77.
- Kars, H., 1980. Early-Medieval Dorestad, an Archaeo-Petrological Study. Part I: General Introduction. The Tephrite Querns. *Berichten van de Rijksdienst voor het Oudheidkundig Bodemonderzoek*, 30, 393-422.
- King, D., 1987. Petrology, Dating and Distribution of Querns and Millstones. The Results of Research in Bedfordshire, Buckinghamshire, Hertfordshire and Middlesex. *Institute of Archaeology Bulletin*, 23.
- Kock, W., 1970. Rindern / Jahresbericht. *Bonner Jahrbücher*, 170, 409.
- Kunow, J., (1987). Die Militärgeschichte Niedergermaniens, in *Die Römer in Nordrhein-Westfalen*, ed. H. G. Horn Stuttgart: Konrad Theiss Verlag, 27-109.
- Langenbach, K., 1998. *Eisenzeitliche Schiffsausrüstung im Bereich von Nord- und Ostsee*, Hamburg: Kabel Verlag.
- Le Bas, M. J., 1989. Nephelinitic and Basanitic Rocks. *Journal of Petrology*, 30 (5), 1299-312.
- Le Bas, M. J., R. W. Le Maitre, A. Streckeisen & B. Zanettin, 1986. A Chemical Classification of Volcanic Rocks based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27 (3), 745-50.
- Le Bas, M. J. & A. L. Streckeisen, 1991. The IUGS Systematics of igneous rocks. *Journal of the Geological Society of London*, 148, 825-33.
- Le Maitre, R. W. E., P. Bateman, A. Dudek, J. Keller, J. Lameyre, M. J. Le Bas, P. A. Sabine, R. Schmid, H. Sorensen, A. L. Streckeisen, A. R. Woolley & B. Zanettin, 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*.
-

Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks: Blackwell Scientific Publications.

- Legendre, C., M. Caroff, H. Leyrit, P. Nehlig & D. Thièblemont, 2001. Les premières phases d'édification du stratovolcan du Cantal (Massif central, France) entre 9,5 et 8,0 Ma: géologie et géochimie du secteur de l'Élancèze. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series II - Sciences de la Terre et des planètes*, 332, 617-24.
- Liotard, J. M., P. Boivin, J. M. Cantagrel & C. Dupuy, 1983. Mégacristsaux d'amphibole et basaltes alcalins associés. Problèmes des leurs relations pétrogénétiques et géochimiques. *Bulletin de Minéralogie*, 106, 451-64.
- Liotard, J. M., D. Briot & P. Boivin, 1988. Petrological and geochemical relationships between pyroxene megacrysts and associated alkali-basalts from Massif Central (France). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 89, 81-90.
- Lippard, S. F., 1973. The petrology of phonolites from the Kenya Rift. *Lithos*, 6, 217-34.
- Lippolt, H. J., M. Troesch & J. C. Hess, 1990. Excess argon and dating of Quaternary Eifel volcanism, IV. Common argon with high and lower-than-atmospheric $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratios in phonolitic rocks, East Eifel, F.R.G. *Earth and Planetary Science Letters*, 101, 19-33.
- Lustrino, M. & M. Wilson, 2007. The circum-Mediterranean anorogenic Cenozoic igneous province. *Earth-Science Reviews*, 81, 1-65.
- Magetti, M., 2006. *Archaeometry: quo vadis?*, London: The Geological Society.
- Magonthier, M.-C., 1975. Les basanites à leucite tertiaires de la partie nord du Sillon Houiller (d'Herment à Pontaurum, Puy-de-Dôme). Comparaison avec deux autres provinces à caractère potassique du Massif central français (Sioule et Sillon Houiller sud). *Bulletin de la Société Française de Minéralogie et de Cristallographie*, 98, 245-53.
- Mangartz, F., (1998). *Die Antiken Steinbrüche der Hohen Buche bei Andernach. Vulkanpark-Forschungen 1*, Mainz, RGZM.
- Mangartz, F., (2000). Römerzeitlicher Abbau von Basaltlava in der Osteifel: Ein bedeutender Wirtschaftszweig der Nordprovinzen, in *Steinbruch und Bergwerk. Vulkanpark-Forschungen 2*, Mainz, RGZM, 6-16.

-
- Mangartz, F., 2001. Römerzeitliche Bauquadergewinnung in Lavaströmen der vulkanischen Osteifel. *Archäologische Berichte*, 14 (Zeit-Räume. Gedenkschrift für Wolfgang Taute), 139-49.
- Mangartz, F., 2008. *Römischer Basaltlava-Abbau zwischen Eifel und Rhein. Vulkanpark-Forschungen 7*, Mainz: RGZM.
- Manhès, G., J. F. Minster & C. J. Allègre, 1978. Comparative uranium-thorium-lead and rubidium-strontium study of Saint-Séverin amphoterite - consequences for early solar-system chronology *Earth and Planetary Science Letters*, 39, 14-24.
- Maury, R. C. & R. Brousse, 1978. Présence de pigeonite et d'orthopyroxène dans certaines laves du Massif central français: leur répartition et leur origine. *Bulletin de Minéralogie*, 101, 10-21.
- Maury, R. C., R. Brousse, B. Villemant, J.-L. Joron, H. Jaffrezic & M. Treuil, 1980. Cristallisation fractionnée d'un magma basaltique alcalin: la Série de la Chaîne des Puys (Massif Central, France). *Bulletin de Minéralogie*, 103, 250-66.
- McDonough, W. F. & S.-s. Sun, 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, 223-53.
- McKenzie, D. & R. K. O'Nions, 1991. Partial Melt Distributions from Inversion of Rare Earth Element Concentrations. *Journal of Petrology*, 32 (5), 1021-91.
- Melluso, L., V. Morra & P. Di Girolamo, 1996. The mt. Vulture volcanic complex (Italy): evidence for distinct parental magmas and for residual melts with melilite. *Mineralogy and Petrology*, 56, 225-50.
- Mertes, H., 1983. Aufbau und Genese des Westeifeler Vulkanfeldes. *Bochumer Geologische und Geotechnische Arbeiten*, 9, 415S.
- Mertes, H. & H.-U. Schmincke, 1985. Mafic potassic lavas of the Quaternary West Eifel volcanic field / I. Major and trace elements. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 89, 330-45.
- Meyer, W., 1986. *Geologie der Eifel*, Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller).
- Meyer, W. & J. Stets, 1979. Die Manderscheider Vulkangruppe (Westeifel) in Beziehung zu den Strukturen des Sockels. *Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft*, 130, 273-88.
- Meyer, W. & J. Stets, (2007). Quaternary Uplift in the Eifel Area, in *Mantle Plumes*, eds. J. R. R. Ritter & U. R. Christensen Berlin Heidelberg: Springer, 369-78.

-
- Miallier, D., L. Michon, J. Évin, T. Pilleyre, S. Sanzelle & G. Vernet, 2004. Volcans de la chaîne des Puys (Massif Central, France): point sur la chronologie Vasset-Kilian-Pariou-Chopine. *Comptes Rendus Geoscience*, 336, 1345-53.
- Nehring, F., D. E. Jacob, M. Barth & S. F. Foley, 2008. Laser-ablation ICP-MS analysis of siliceous rock glasses fused on an iridium strip heater using MgO dilution. *Microchimica Acta*, 160, 153-63.
- Nowell, D. A., M. C. Jones & D. M. Pyle, 2006. Episodic Quaternary volcanism in France and Germany. *Journal of Quaternary Science*, 21 (6), 645-75.
- Oliva, P., D. Béziat, C. Domergue, C. Jarrier, F. Martin, B. Pieraggi & F. Tollon, 1999. Geological sources and use of rotary millstones from the Roman iron-making site of Le Martys (Montagne Noir, France). *European Journal of Mineralogy*, 11, 757-62.
- Peacock, D. P. S., 1980. The Roman Millstone Trade: A Petrological Sketch. *World Archaeology*, 12 (1), 43-53.
- Peacock, D. P. S., 1986. The production of Roman millstones near Orvieto, Umbria, Italy. *The Antiquaries Journal*, 66 (1), 45-51.
- Pearce, J. A., 1996. A User's Guide to Basalt Discrimination Diagrams. *Short course notes - Geological Society of Canada*, 12 (Trace element geochemistry of volcanic rocks; applications for massive sulphide exploration), 79-113.
- Plomerová, J., U. Achauer, V. Babuška & L. Vecsey, 2007. Upper mantle beneath the Egre Rift (Central Europe): plume or asthenosphere upwelling? *Geophysical Journal International*, 169, 675-82.
- Renzulli, A., P. Santi, G. Nappi, M. Luni & D. Vitali, 2002. Provenance and trade of volcanic rock millstones from Etruscan-Celtic and Roman archaeological sites in Central Italy. *European Journal of Mineralogy*, 14, 175-783.
- Ritter, J. R. R., (2007). The Seismic Signature of the Eifel Plume, in *Mantle Plumes. A Multidisciplinary Approach*, eds. J. R. R. Ritter & U. R. Christensen Springer, 379-404.
- Ritter, J. R. R., M. Jordan, U. R. Christensen & U. Achauer, 2001. A mantle plume below the Eifel volcanic fields. *Earth and Planetary Science Letters*, 186, 7-14.
- Rollinson, H., 1993. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*, Harlow: Pearson Education Ltd.
- Romer, R. L., H.-J. Förster & C. Breiter, 2001. Intracontinental extensional magmatism with a subduction fingerprint: the late Carboniferous Halle Volcanic Complex. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141, 201-21.
-

-
- Romer, R. L., W. Heinrich, B. Schröder-Smeibidl, A. Meixner, C.-O. Fischer & C. Schulz, 2005. Elemental dispersion and stable isotope fractionation during reactive fluid-flow and fluid immiscibility in the Bufa del Diente aureole, NE-Mexico: evidence from radiographies and Li, B, Sr, Nd, and Pb isotope systematics. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149, 400-29.
- Schmincke, H.-U., 1977. Eifel-Vulkanismus östlich des Gebietes Rieden-Mayen. *Fortschritte der Mineralogie*, 55, 1-32.
- Schmincke, H.-U., (2007). The Quaternary Volcanic Fields of the East and West Eifel (Germany), in *Mantle Plumes. A Multidisciplinary Approach*, eds. J. R. R. Ritter & U. R. Christensen Springer, 241-322.
- Schmincke, H.-U., V. Lorenz & H. A. Seck, (1983). The Quaternary Eifel Volcanic Fields, in *Plateau Uplift: the Rhenish Shield - a case history*, ed. K. Fuchs Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 139-51.
- Serneels, V., (1994). Le moulin d'Avenches - Analyse pétrographique, in *Le Moulin Hydraulique Gallo-Romain d'Avenches "En Chaplix"*, ed. D. Castella Lausanne.
- Serneels, V., (1996). Etude pétrographique de quelques meules en basalte d'Autun, Centre d'Analyse Minérale, Université de Lausanne.
- Shaw, D.M., 1970. Trace element fractionation during anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34, 237-43.
- Sobolev, S. V., H. Zeyen, M. Granet, U. Achauer, C. Bauer, F. Werling, R. Altherr & K. Fuchs, 1997. Upper mantle temperatures and lithosphere-asthenosphere system beneath the French Massif Central constrained by seismic, gravity, petrologic and thermal observations. *Tectonophysics*, 275, 143-64.
- Stracke, A., A. W. Hofmann & S. R. Hart, 2005. FOZO, HIMU, and the rest of the mantle zoo. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(5), Q05007, doi:10.1029/2004GC000824.
- Sun, S.-s. & W. F. McDonough, (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, in *Magmatism in the Ocean Basins*, eds. A. D. Saunders & M. J. Norry London, 313-45.
- Templ, M., P. Filzmoser & C. Reimann, 2008. Cluster analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, 23 (8), 2198-2213.
- Thirlwall, M. F., B. G. J. Upton & C. Jenkins, 1994. Interaction between Continental Lithosphere and the Iceland-Plume – Sr-Nd-Pb-Isotope Geochemistry of Tertiary Basalts, NE Greenland. *Journal of Petrology*, 35 (3), 839-79.
-

-
- Tilton, G. R., 1973. Isotopy lead ages of chondritic meteorites. *Earth and Planetary Science Letters*, 19, 321-9.
- Vatin-Perignon, N., R. C. Maury & J. P. Milesi, 1980. Le magmatisme sursaturé infrabréichique du centre du Cantal (Massif Central français). *Bulletin Volcanologique*, 43 (3), 511-25.
- Villemant, B. & M. Treuil, 1983. Comportement des éléments traces et majeurs dans la série alcaline du Velay; comparaison avec la Chaîne des Puys (Massif Central, France). *Bulletin de Minéralogie*, 106, 465-86.
- Volterra, V. & R. G. V. Hancock, 1994. Provenancing of Ancient Roman Millstones. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 180 (1), 37-44.
- Wagner, G. A., 2007. *Einführung in die Archäometrie*, Berlin Heidelberg: Springer.
- Waldhauser, J., 1981. Keltské Rotační mlýny v Čechách. Keltische Drehmühlen in Böhmen. *Památky Archeologické*, 72, 153-221.
- Weaver, B. L., 1991. Trace element evidence for the origin of ocean-island basalts. *Geology*, 19, 123-6.
- Wedepohl, K. H. & A. Baumann, 1999. Central European Cenozoic plume volcanism with OIB characteristics and indications of a lower mantle source. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 136, 225-39.
- Williams-Thorpe, O., 1988. Provenancing and Archaeology of Roman Millstones from the Mediterranean Area. *Journal of Archaeological Science*, 15, 253-305.
- Williams-Thorpe, O. & R. Thorpe, 1993. Geochemistry and Trade of Eastern Mediterranean Millstones from the Neolithic to Roman Periods. *Journal of Archaeological Science*, 20, 263-320.
- Williams-Thorpe, O., R. Thorpe, C. Elliott & C. Xenophontos, 1991. Archaeology, Geochemistry, and Trade of Igneous Rock Millstones in Cyprus During the Late Bronze Age to Roman Periods. *Geoarchaeology*, 6 (1), 27-60.
- Williams-Thorpe, O. & R. S. Thorpe, 1988. The Provenance of Donkey Mills from Roman Britain. *Archaeometry*, 30 (2), 275-89.
- Williams-Thorpe, O. & R. S. Thorpe, 1989. Provenancing and Archaeology of Roman Millstones from Sardinia (Italy) *Oxford Journal of Archaeology*, 8 (1), 89-117.
- Williams-Thorpe, O. & R. S. Thorpe, 1990. Millstone provenancing used in tracing the route of a fourth-century bc Greek merchant ship *Archaeometry*, 32 (2), 115-37.
- Williams-Thorpe, O. & R. S. Thorpe, 1991. The import of millstones to Roman Mallorca. *Journal of Roman Archaeology*, 4, 153-9.
-

-
- Wilson, M., 1993. Magmatism and the geodynamics of basin formation. *Sedimentary Geology*, 86, 5-29.
- Wilson, M. & G. Bianchini, (1999). Tertiary-Quaternary magmatism within the Mediterranean and surrounding regions, in *The Mediterranean Basins: Tertiary Extension within the Alpine Orogen*, eds. B. Durand, L. Jolivet, F. Horváth & M. Séranne London: Geological Society, 141-68.
- Wilson, M. & H. Downes, 1991. Tertiary-Quaternary Extension-Related Alkaline Magmatism in Western and Central Europe. *Journal of Petrology*, 32 (4), 811-49.
- Wilson, M. & H. Downes, 1992. Mafic alkaline magmatism associated with the European Cenozoic rift system. *Tectonophysics*, 208, 173-82.
- Wilson, M., H. Downes & J.-M. Cebriá, 1995a. Contrasting Fractionation Trends in Coexisting Continental Alkaline Magma Series; Cantal, Massif Central, France. *Journal of Petrology*, 36 (6), 1729-53.
- Wilson, M., J. M. Rosenbaum & E. A. Dunworth, 1995b. Melilitites: partial melts of the thermal boundary layer? *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119, 181-96.
- Wilson, M., A. E. Shimron, J. M. Rosenbaum & J. Preston, 2000. Early Cretaceous magmatism of Mount Hermon, Northern Israel. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139, 54-67.
- Winchester, J. A. & P. A. Floyd, 1976. Geochemical magma type discrimination: application to altered and metamorphosed basic igneous rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 28 (3), 459-69.
- Wörner, G., A. Zindler, A. Staudigel & H.-U. Schmincke, 1986. Sr, Nd, and Pb isotope geochemistry of Tertiary and Quaternary alkaline volcanics from West Germany *Earth and Planetary Science Letters*, 79, 107-19.
- Ziegler, P. A., 1990. *Geological Atlas of Western and Central Europe*, Bath: Geological Society Publishing House.
- Ziegler, P. A., 1992. European Cenozoic rift system. *Tectonophysics*, 208, 91-111.
- Ziegler, P. A., 1994. Cenozoic rift system of western and central Europe: an overview. *Geologie en Mijnbouw*, 73, 99-127.
- Zindler, A. & S. Hart, 1986. Chemical Geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14, 493-571.
- Zirkl, E., 1955. Zur Herkunft der Rohstoffe einiger latènezeitlicher Handmühlen. *Archaeologia Austriaca*, 18, 90-2.
- Zirkl, E., 1963. Über die Herkunft eines römischen Mühlsteins vom Magdalensberg in Kärnten. *Carinthia I*, 153, 287-90.
-

Zolitschka, B., J. F. W. Negendank & B. G. Lottemoser, 1995. Sedimentological proof and dating of the Early Holocene volcanic eruption of Ulmener Maar (Vulkaneifel, Germany). *Geologische Rundschau*, 84, 213-9.

1. Bellerberg-Vulkan: Das Mayener Grubenfeld, die Ettringer Lay und das Kottenheimer Winfeld



Abb. A1: Mühlsteinrohlinge im Mayener Grubenfeld.



Abb. A2: Keiltaschen im Mayener Grubenfeld.



Abb. A3: Lavasäulen als Kennzeichen der Parzellierung.



Abb. A4: Halden an der Ettringer Lay mit Mülsteinrohlingen (rot markiert, Foto von F. Mangartz).



Abb. A5: Mülsteinrohlinge aus der Halde nach der Bergung (Foto F. Mangartz).



Abb. A6: Römische Keiltaschen im Kottenheimer Winfeld (Foto F. Mangartz).

2. Hochsimmer-Lava



Abb. A7: Hochsimmer-Lavastrom an der „Ahl“.

3. Der Niedermendiger Lavastrom



Abb. A8: Der Niedermendiger Lavastrom, ehemaliger Bruch Krebsbach (Foto F. Mangartz).

4. Hohe Buche



Abb. A9: Hohe Buche, Keiltaschen.



Abb. A10: Hohe Buche,
Keiltaschen.



Abb. A11: Hohe Buche,
Mühlsteinrohling als
Stufenbefestigung.

5. Mauerley



Abb. A 12: Mauerley,
Keiltaschen.



Abb. A 13: Im Vordergrund eine erfolgreiche Spaltung mit Keiltaschen, im Hintergrund die säulenförmig erstarrte Lava des Veitskopfs.



Abb. A14: erfolgreiche Keiltaschenspaltung an der Mauerley.

6. Roßbüsch



Abb. A15: Schuttfeld vor anstehender Lava.



Abb. A16: Abbau an Lavasäulen.



Abb. A17: Bearbeitungsspuren an Abbauschutt.

7. Dietzenley



Abb. A18: Ringwall auf der Dietzenley.



Abb. A19: Anstehende Lava innerhalb des Ringwalls.



Abb. A20: Steinbruch innerhalb des Ringwalls mit Rohling einer neuzeitlichen Kraftmühle.



Abb. A21: Dietzenley/Flemmingshöhe, Abbauschutt vor anstehender Lava (im Hintergrund).



Abb. A22:
Dietzenley/Flemmingshöhe,
Abbau in Höhlen.



Abb. A23:
Dietzenley/Flemmingshöhe,
Abbaugruben.

8. Eichholz



Abb. A24: kleine
Gewinnungsstelle.



Abb. A25: Rohling einer Handmühle.

9. Mühlenberg



Abb. A26: Schuttfeld am NW-Hang.



Abb. A27: Schuttfeld vor anstehender Lava mit neuzeitlichem (?) Kraftmühlen-Rohling.



Abb. A28: aufgegebener moderner Abbau im SE des Mühlenbergs.

10. Rother Kopf



Abb. A29: Mhlsteinhhle.



Abb. A30: „Drachenhhle“.



Abb. A31: Kraftmühlen-Rohling römischen (?) Formats.

11. Goosberg



Abb. A32: kleine Gewinnungstelle.



Abb. A33: Rohling einer Handmühle (?).

12. Mosenberg



Abb. A34: kleine Gewinnungsstelle an der Schutzhütte in Gipfelnähe des Nordkraters.



Abb. A35: Lava am Westhang des Nordkraters.



Abb. A36: Abbaustelle südlich des Südkraters am Horngraben.

12. Römerberg



Abb. A37: Abbaustelle.



Abb. A38: Abbaustelle.



Abb. A39: Bearbeitungsspuren.

Gruppe 1: Tephritische Phonolithe des Bellerbergs und der Niedermendiger Lava

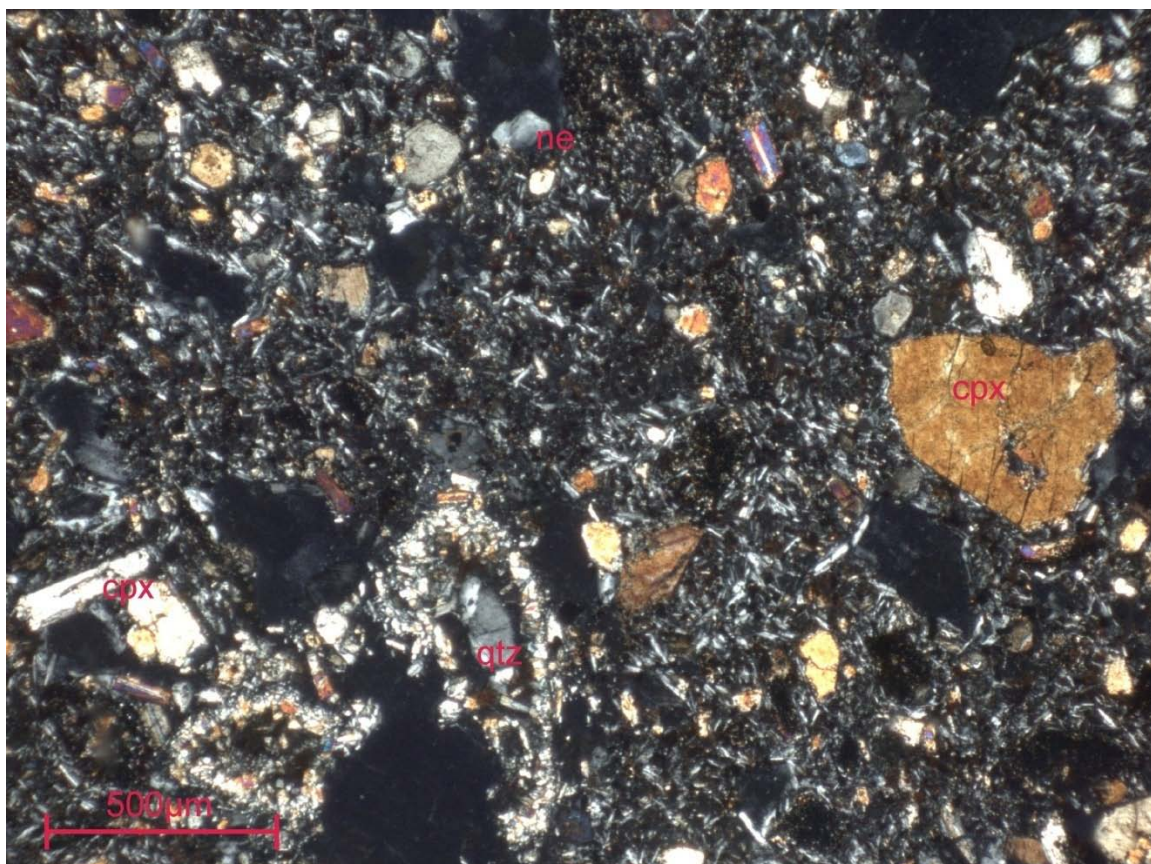
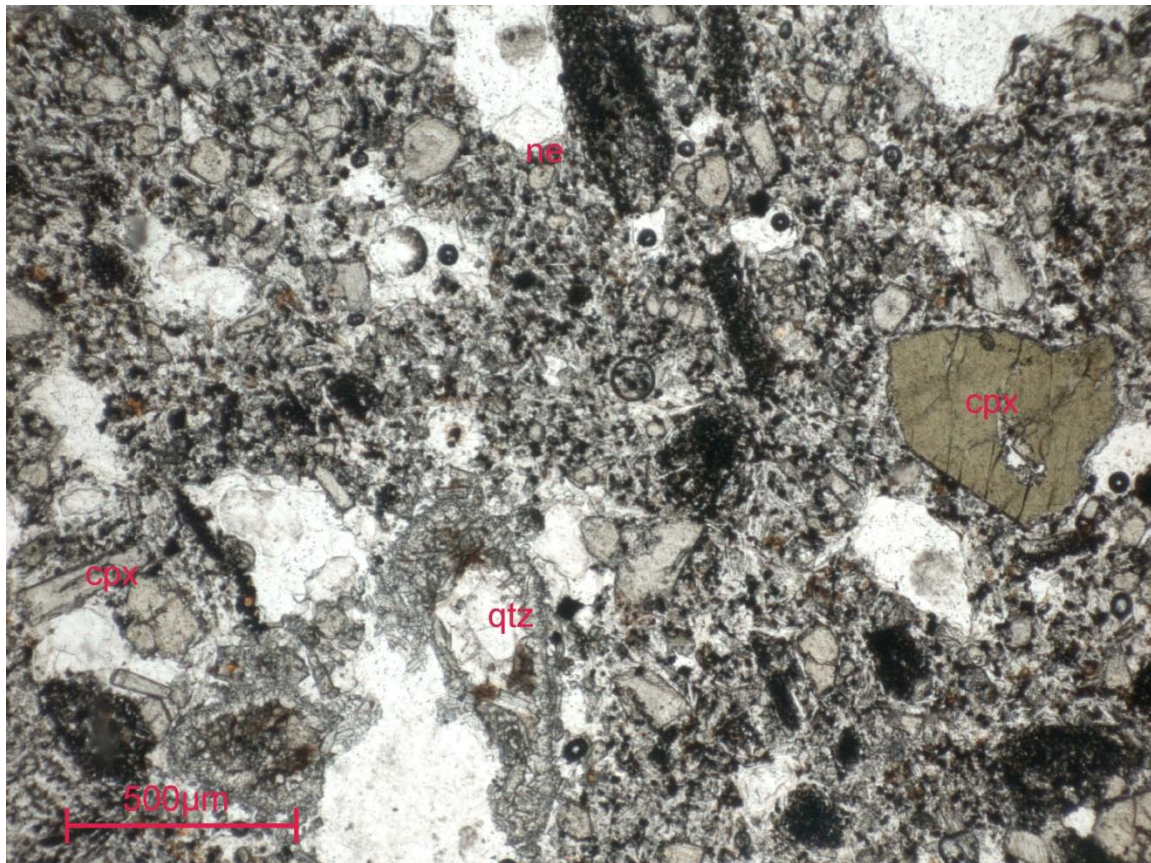


Abb. B1: Kottenheimer Winfeld als repräsentative Probe für die Lavaströme des Bellerbergs (oben Durchlicht, unten gekreuzte Polarisatoren).

Anhang B: Dünnschliff-Fotos der Steinbruchproben

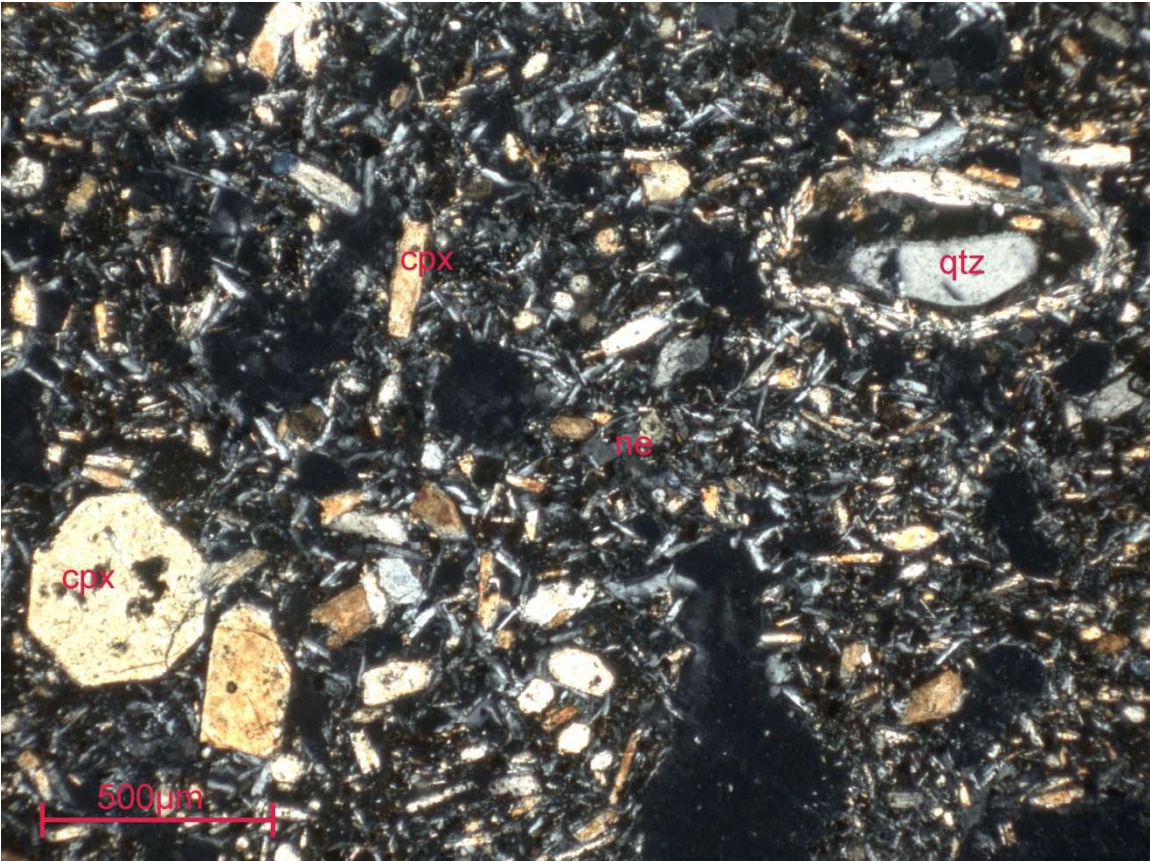
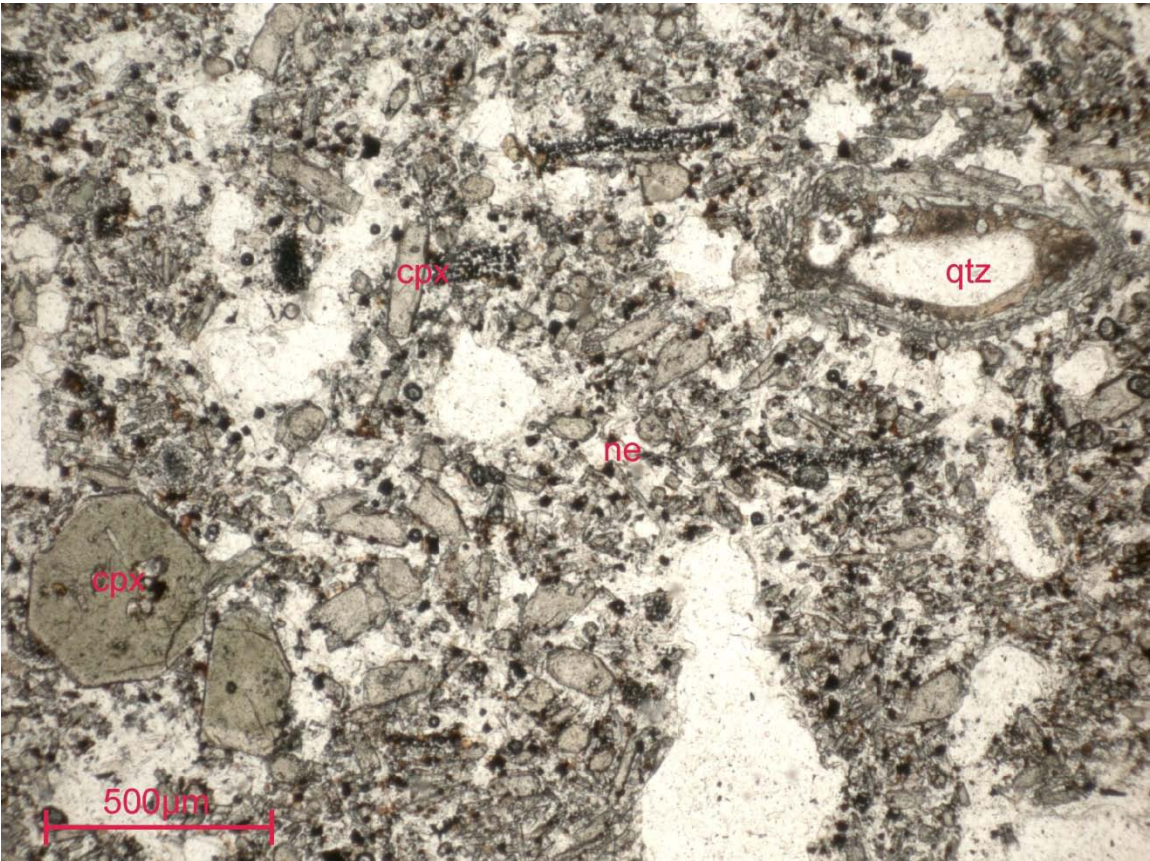


Abb. B2: Niedermendiger Lavastrom (oben Durchlicht, unten gekreuzte Polarisatoren).

Gruppe 2: Feldspat-führende Basanite

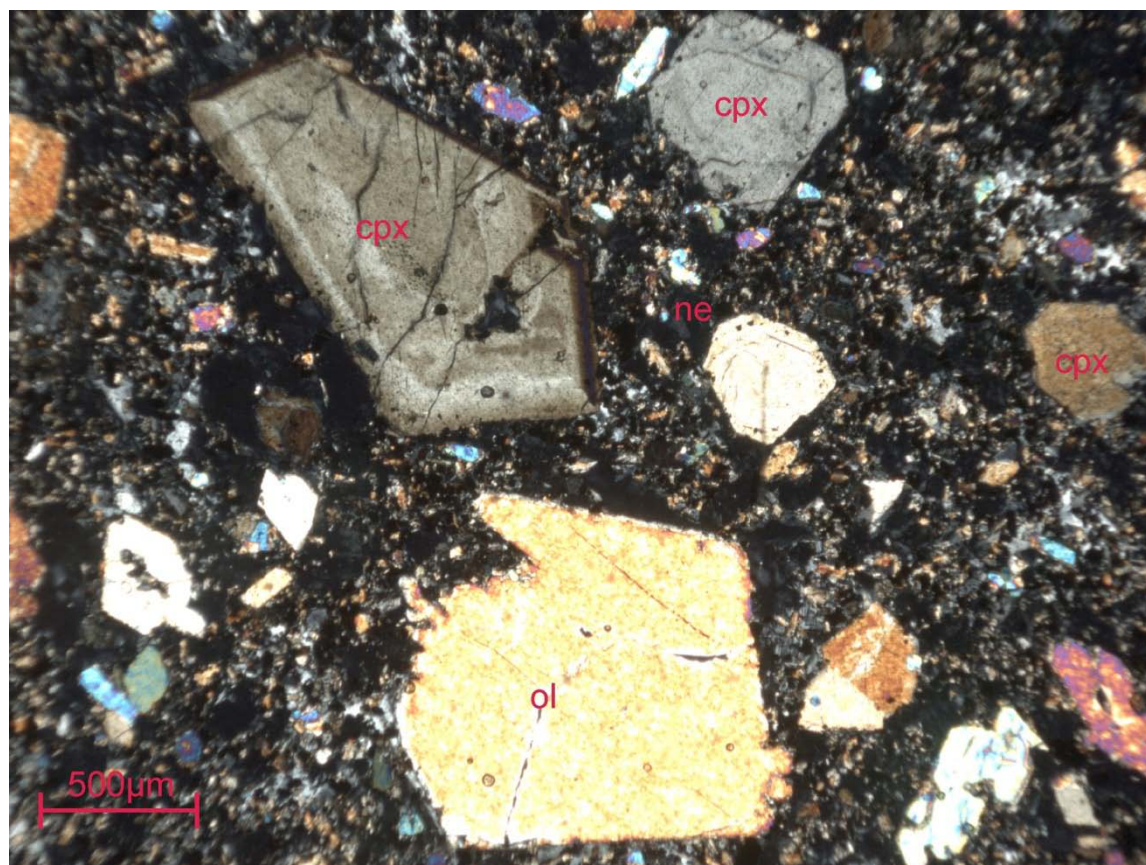
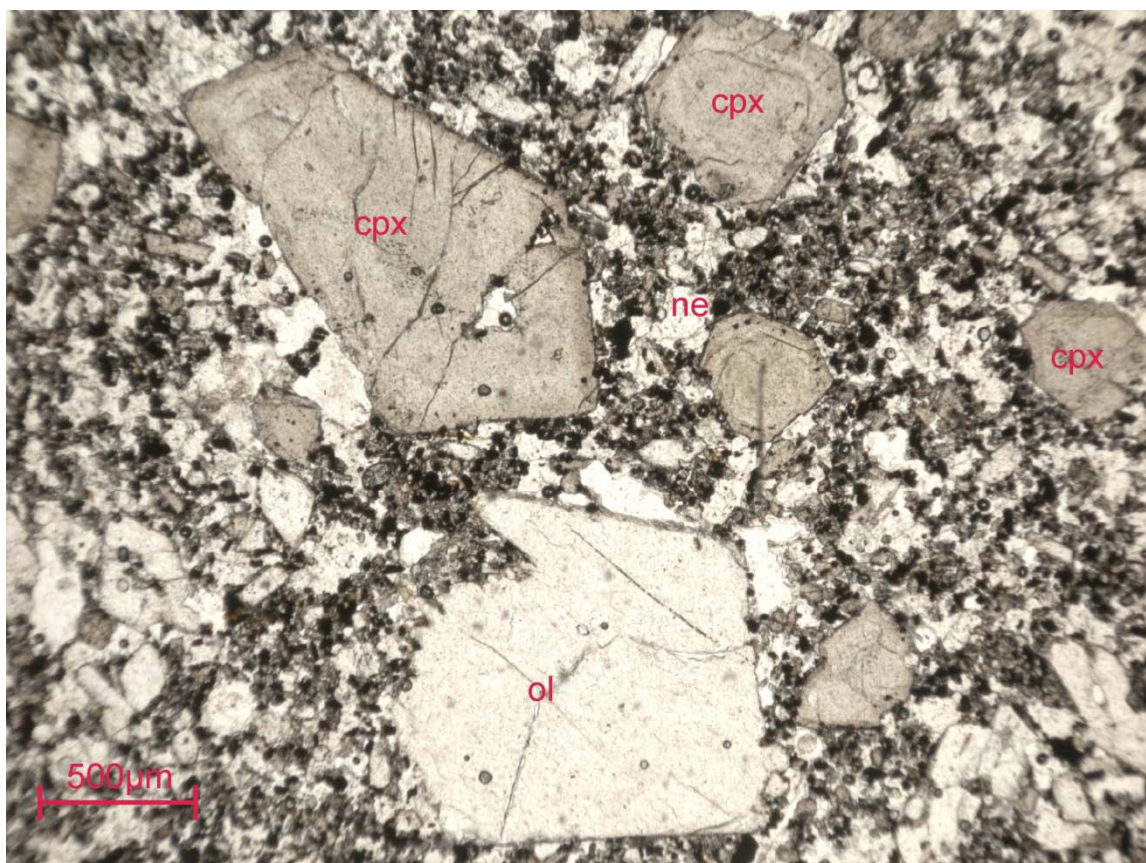


Abb. B3: Mauerley (oben Durchlicht, unten gekreuzte Polarisatoren).

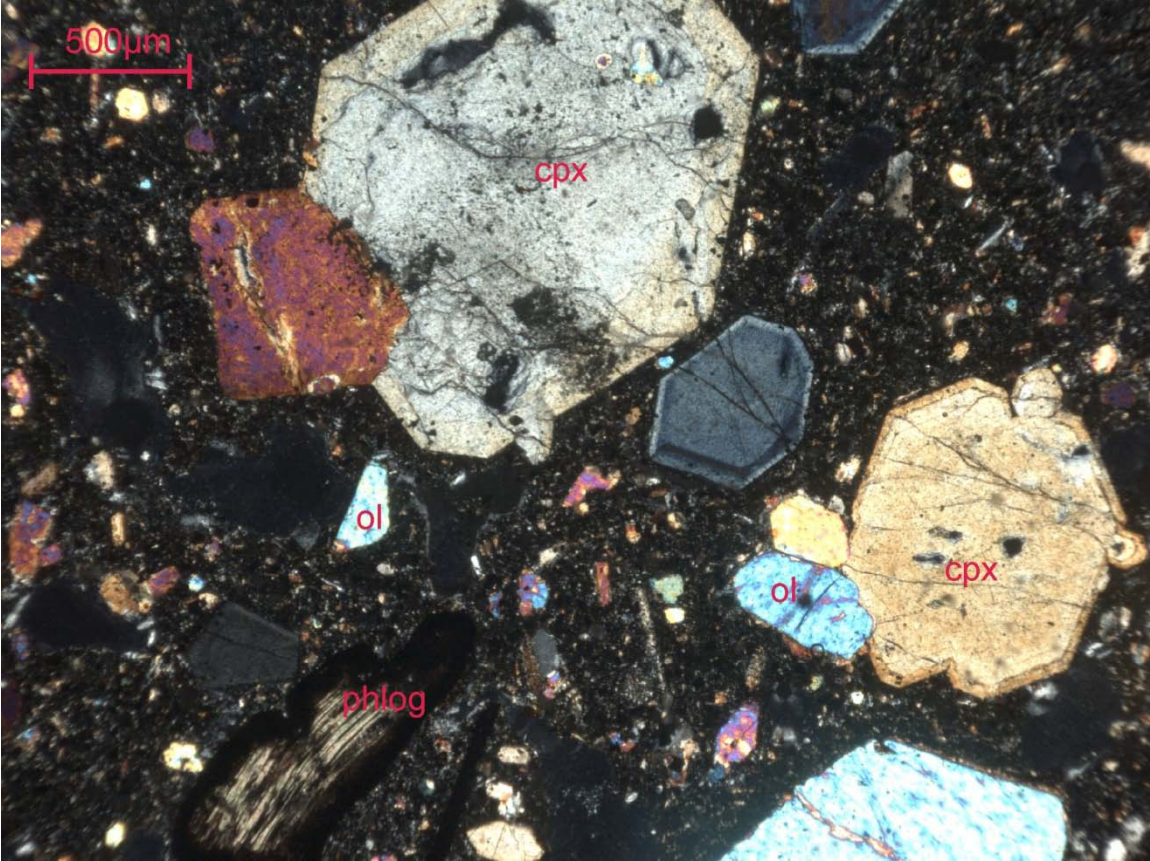
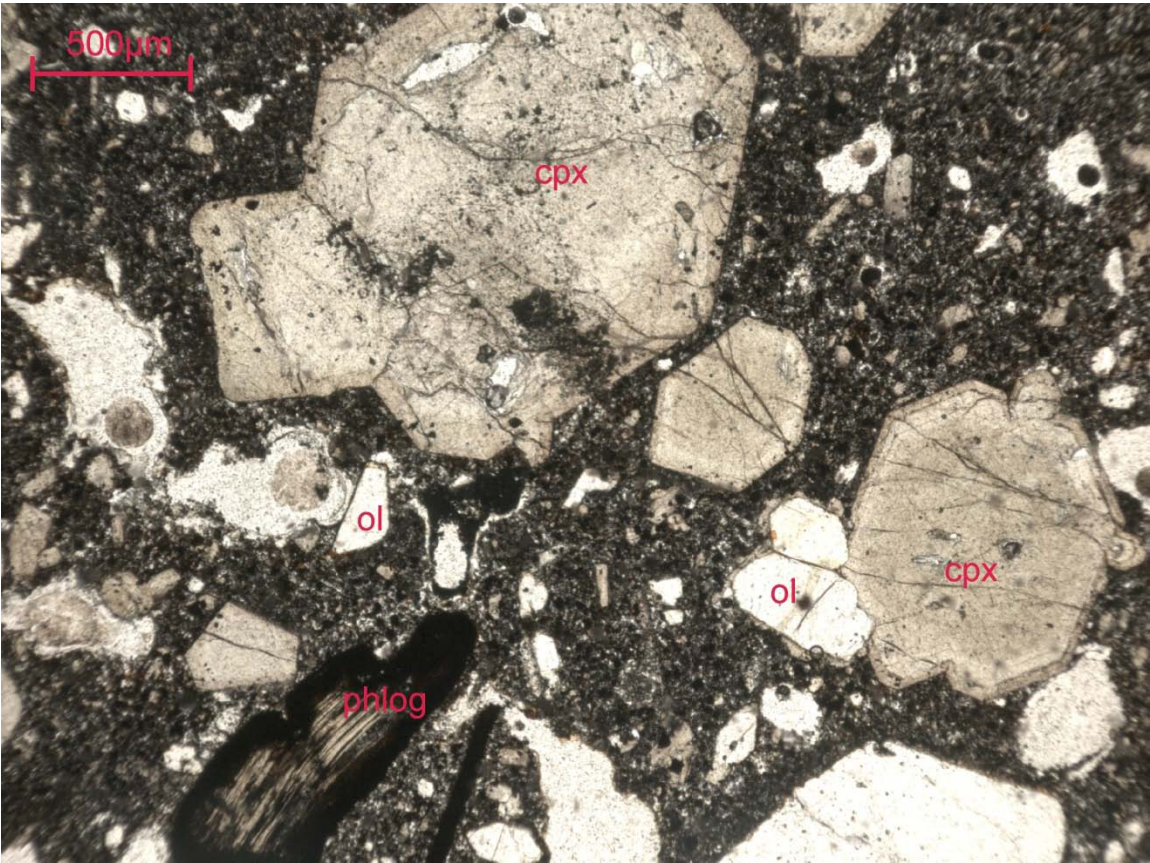


Abb. B4: Hohe Buche (oben Durchlicht, unten gekreuzte Polarisatoren).

Gruppe 3a: basanitische Foidite mit Cpx als vorherrschendem Phänokristall

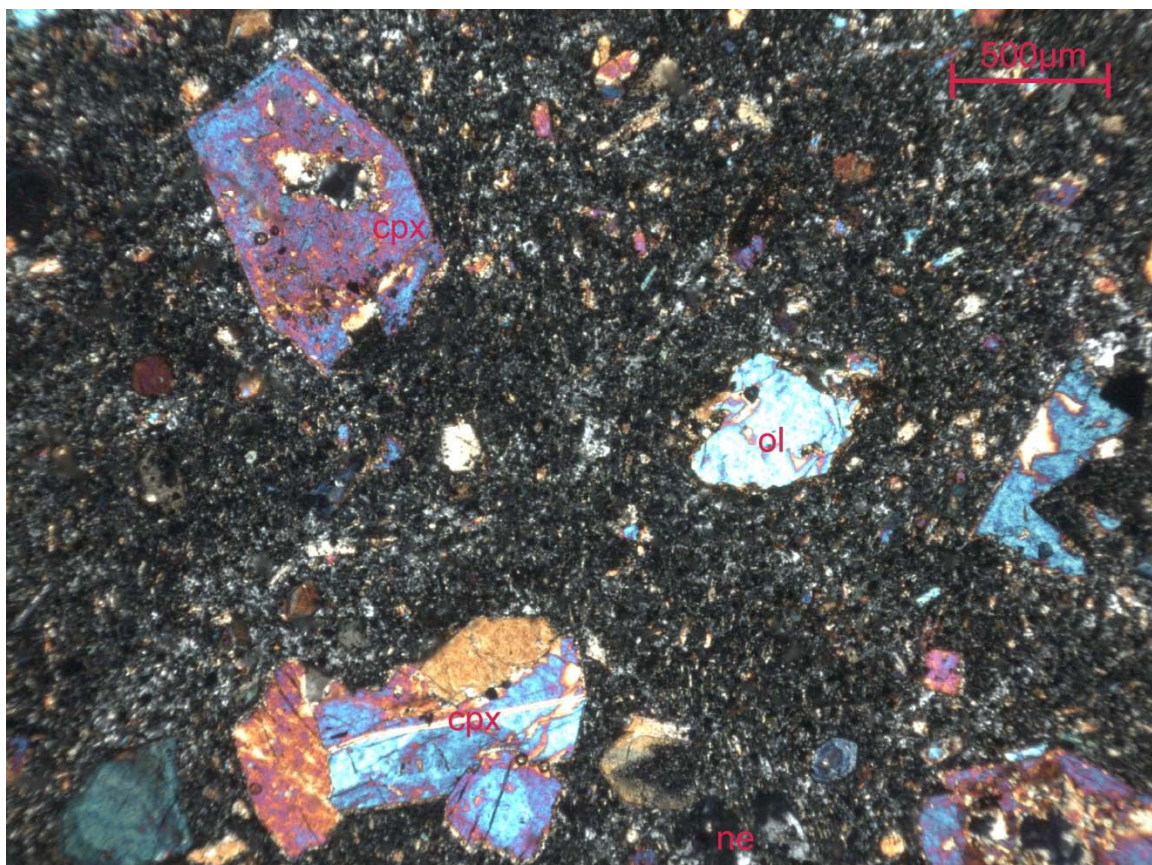
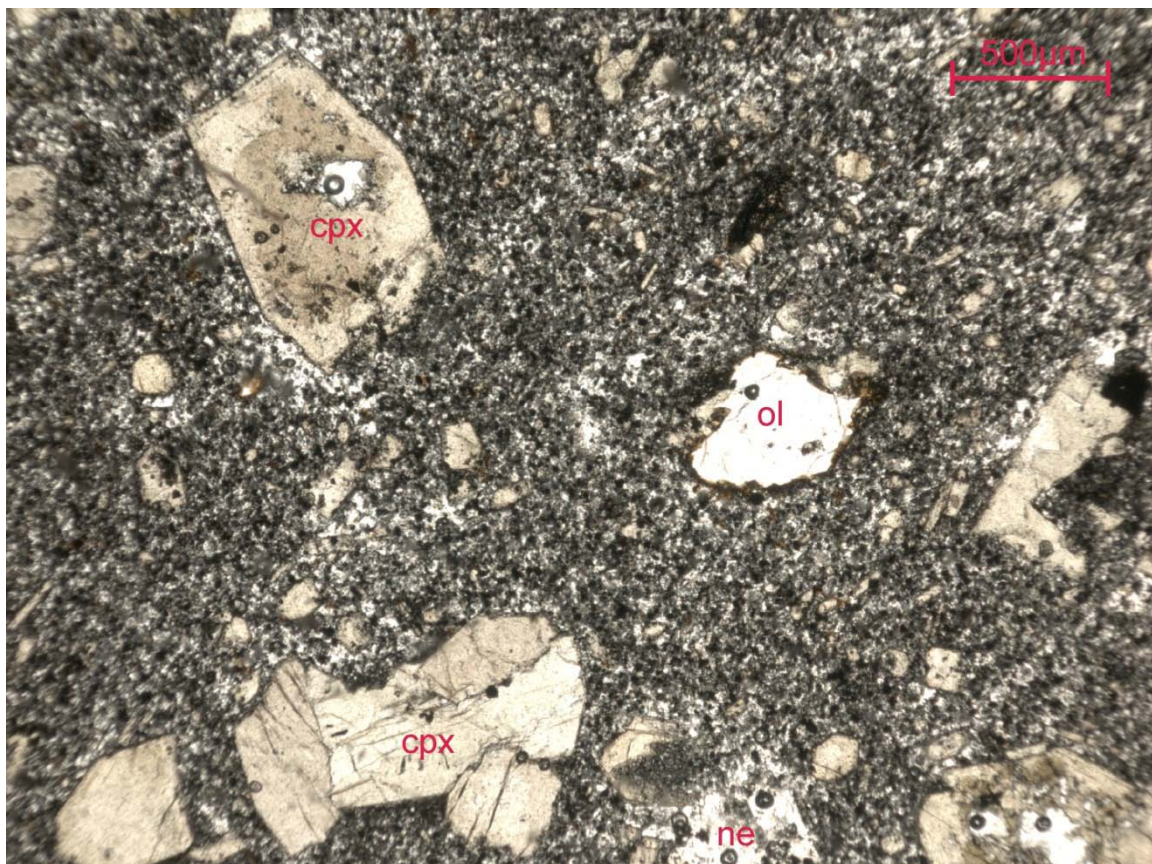


Abb. B5: Hochsimmer Lava (oben Durchlicht, unten gekreuzte Polarisatoren).

Anhang B: Dünnschliff-Fotos der Steinbruchproben

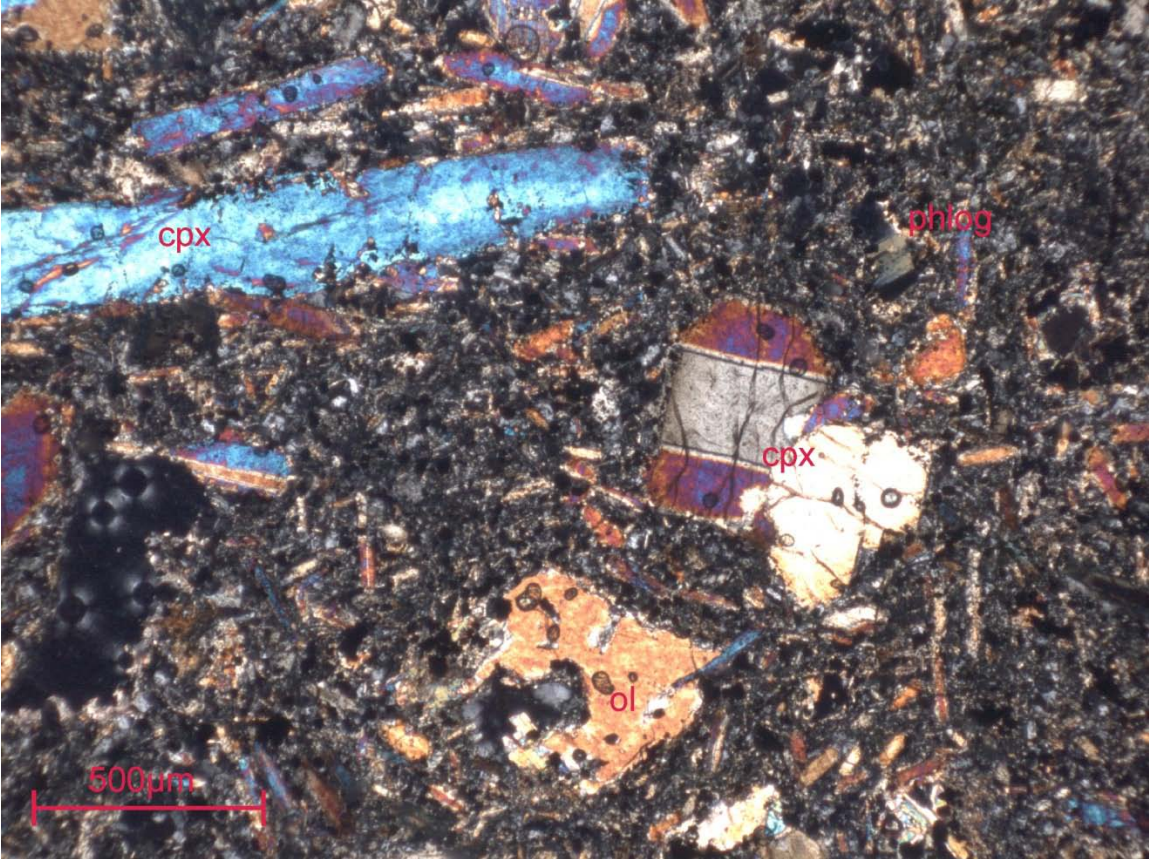
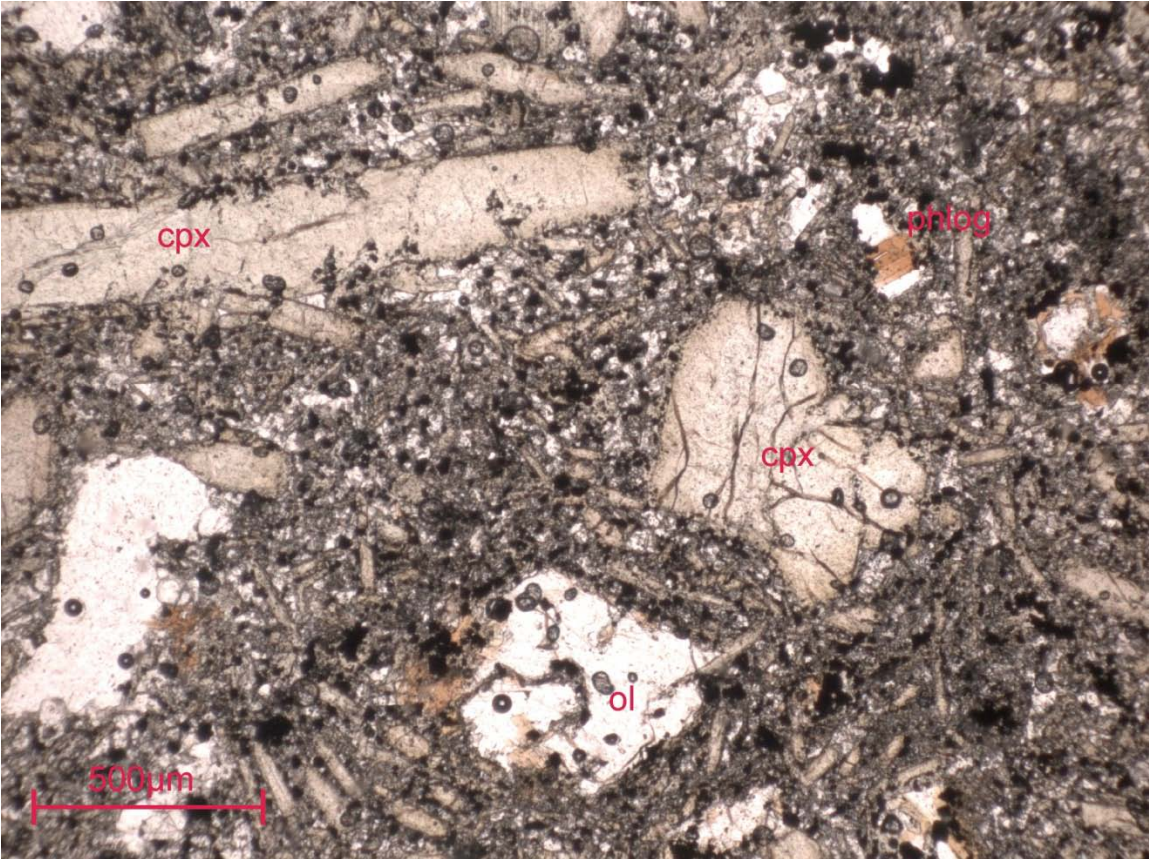


Abb. B6: Goosberg (oben Durchlicht, unten gekreuzte Polarisatoren).

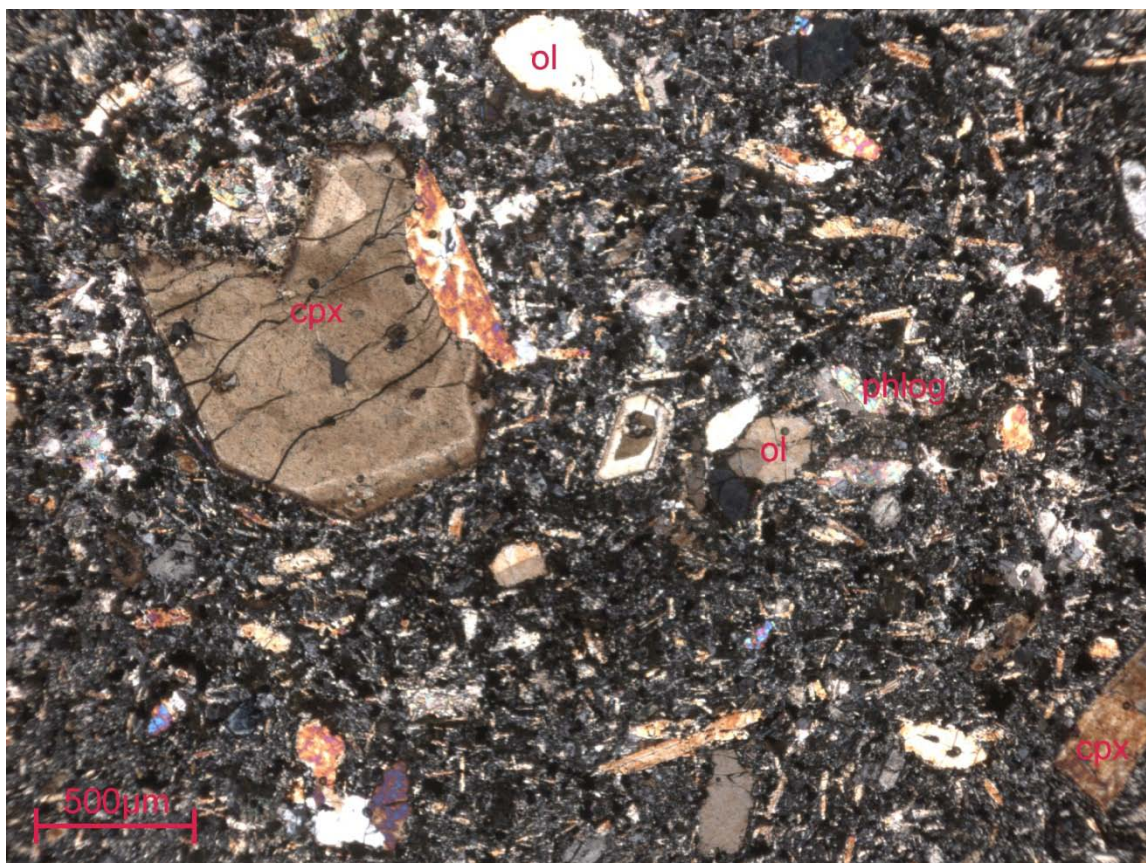
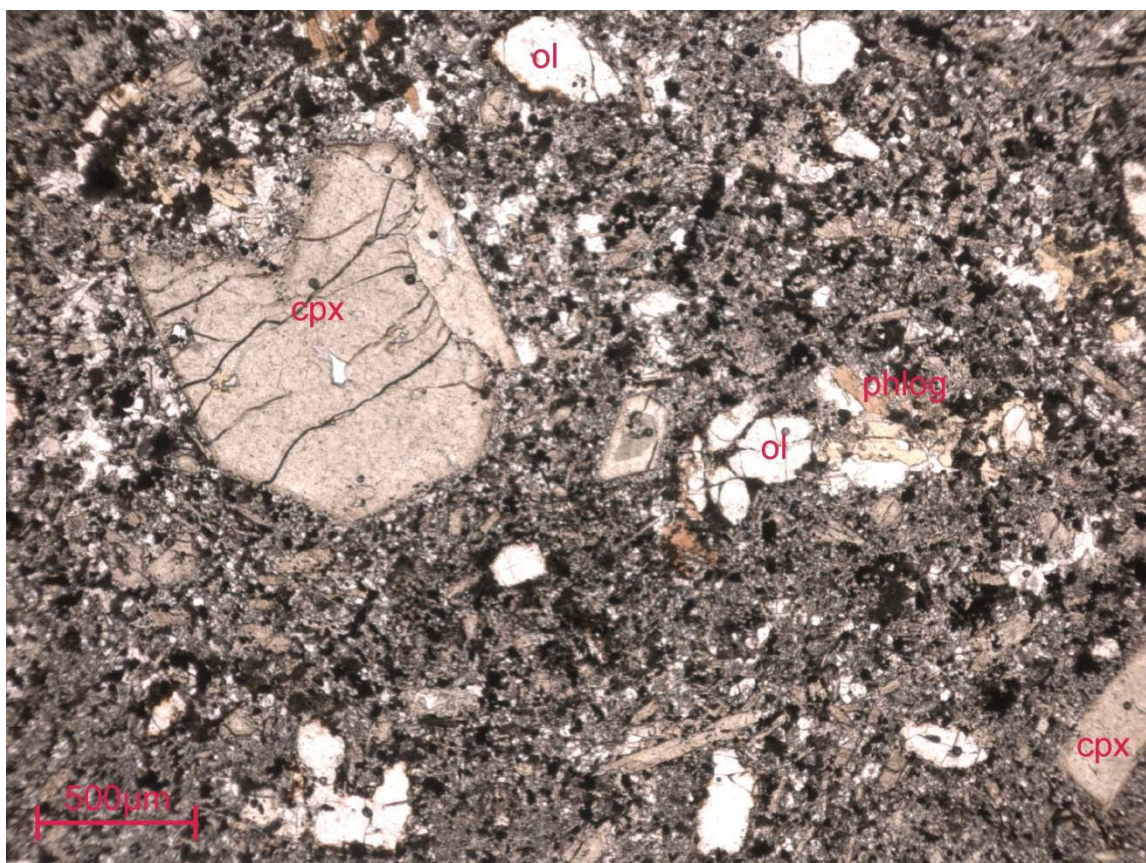


Abb. B7: Rother Kopf (oben Durchlicht, unten gekreuzte Polarisatoren).

Anhang B: Dünnschliff-Fotos der Steinbruchproben

Gruppe 4: Foidite-Basanite mit Cpx als vorherrschendem Phänokristall und Melilith in der Grundmasse

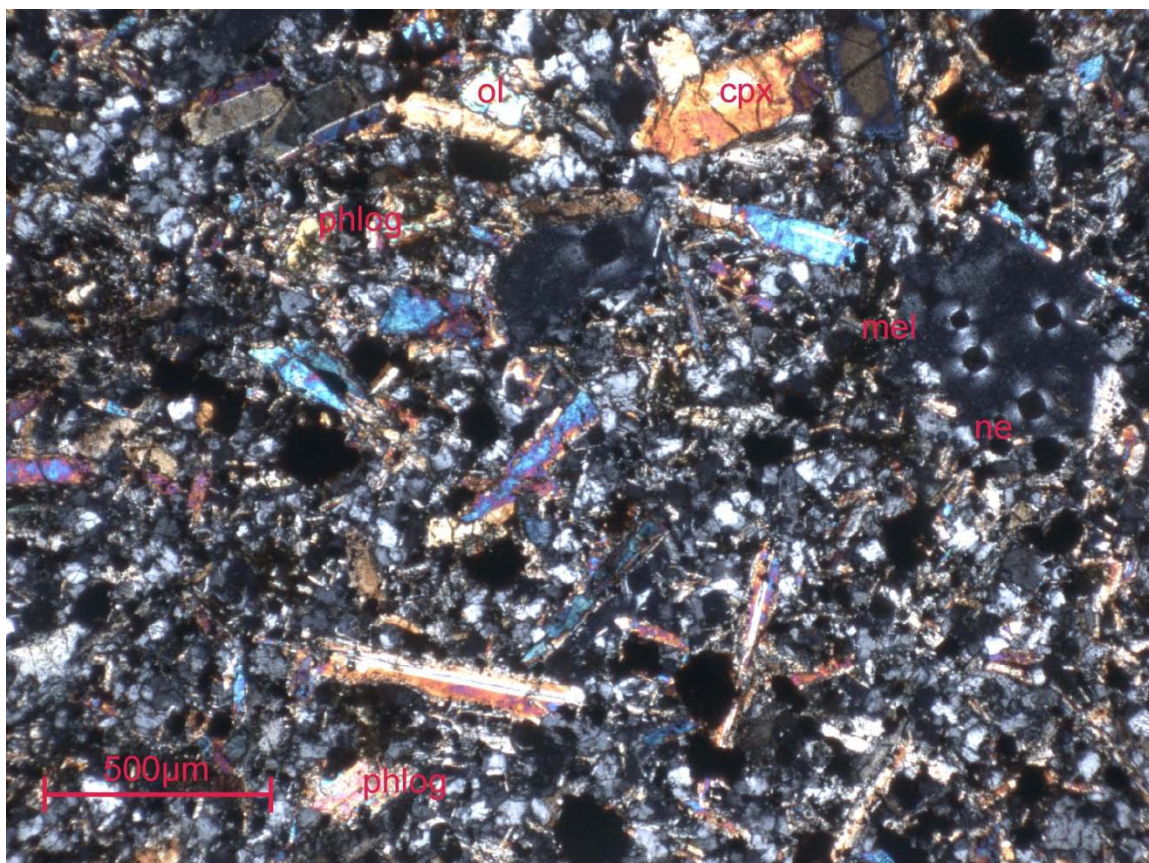
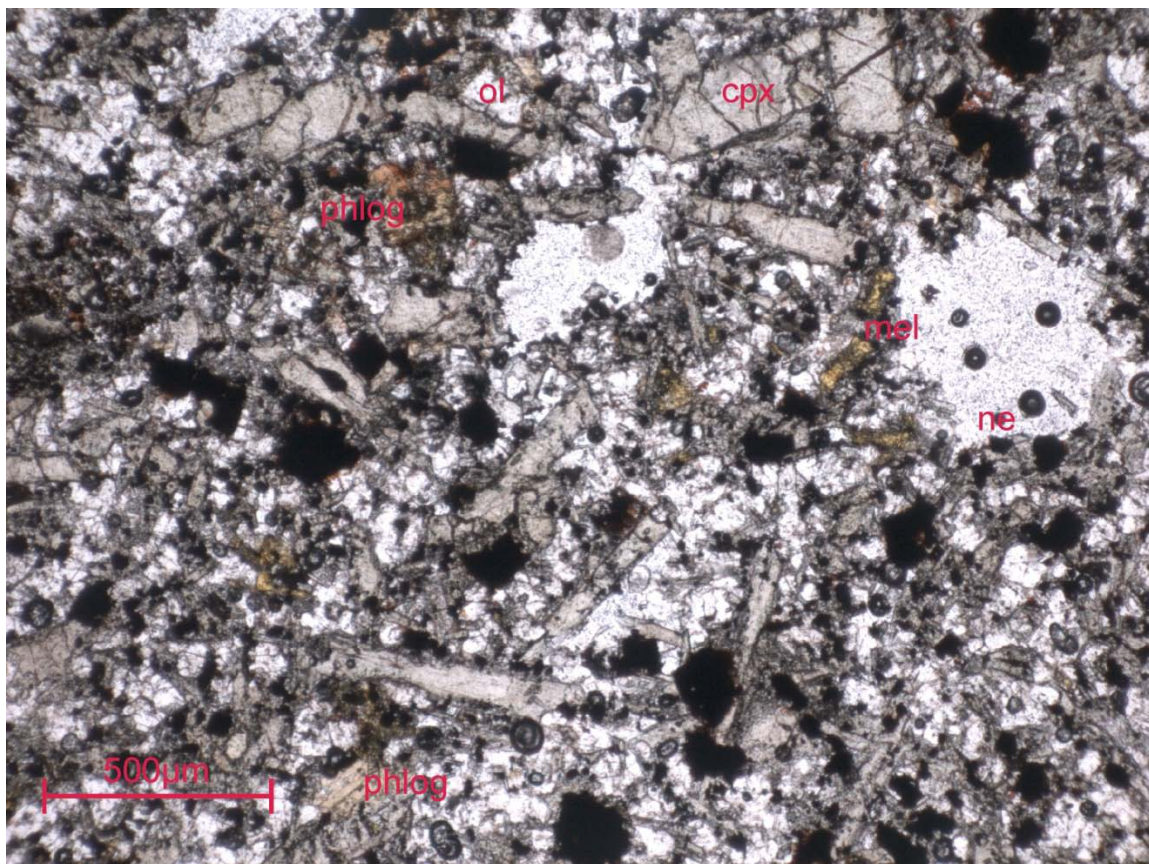


Abb. B8: Herchenberg (oben Durchlicht, unten gekreuzte Polarisatoren).

Anhang B: Dünnschliff-Fotos der Steinbruchproben

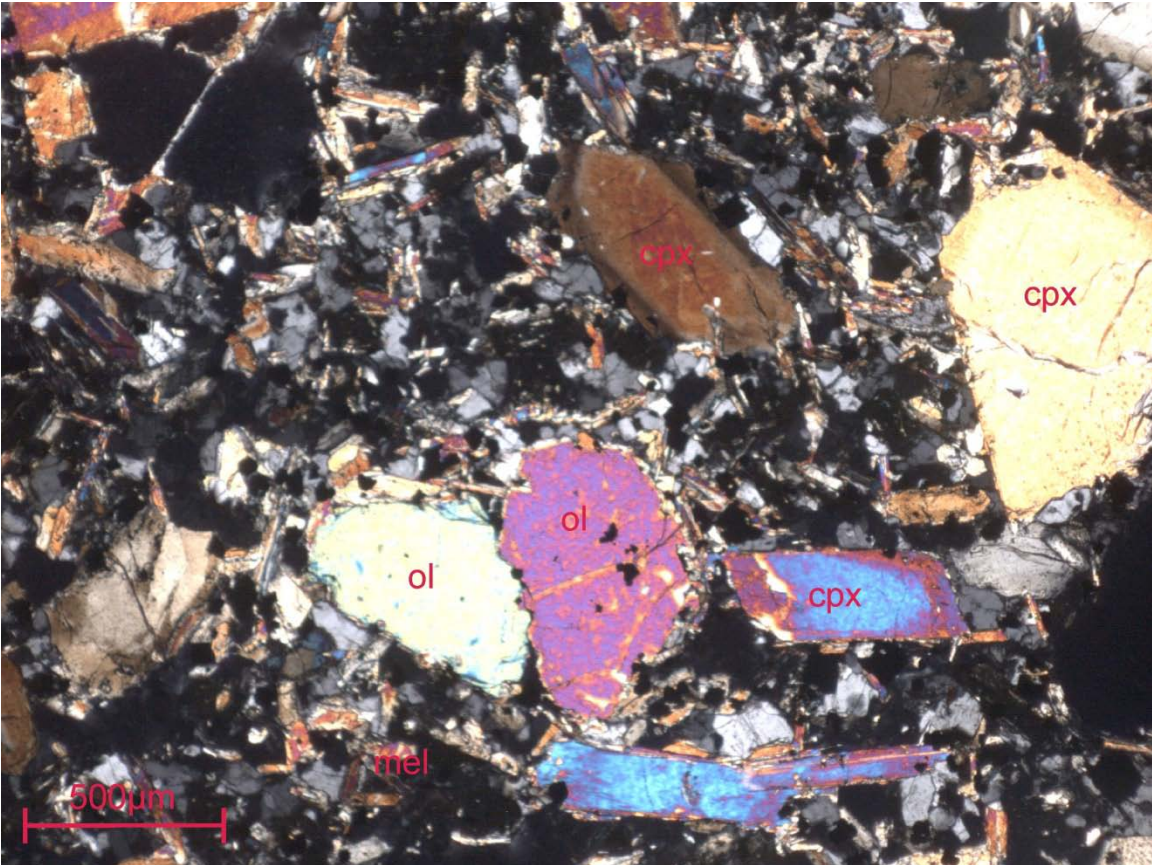
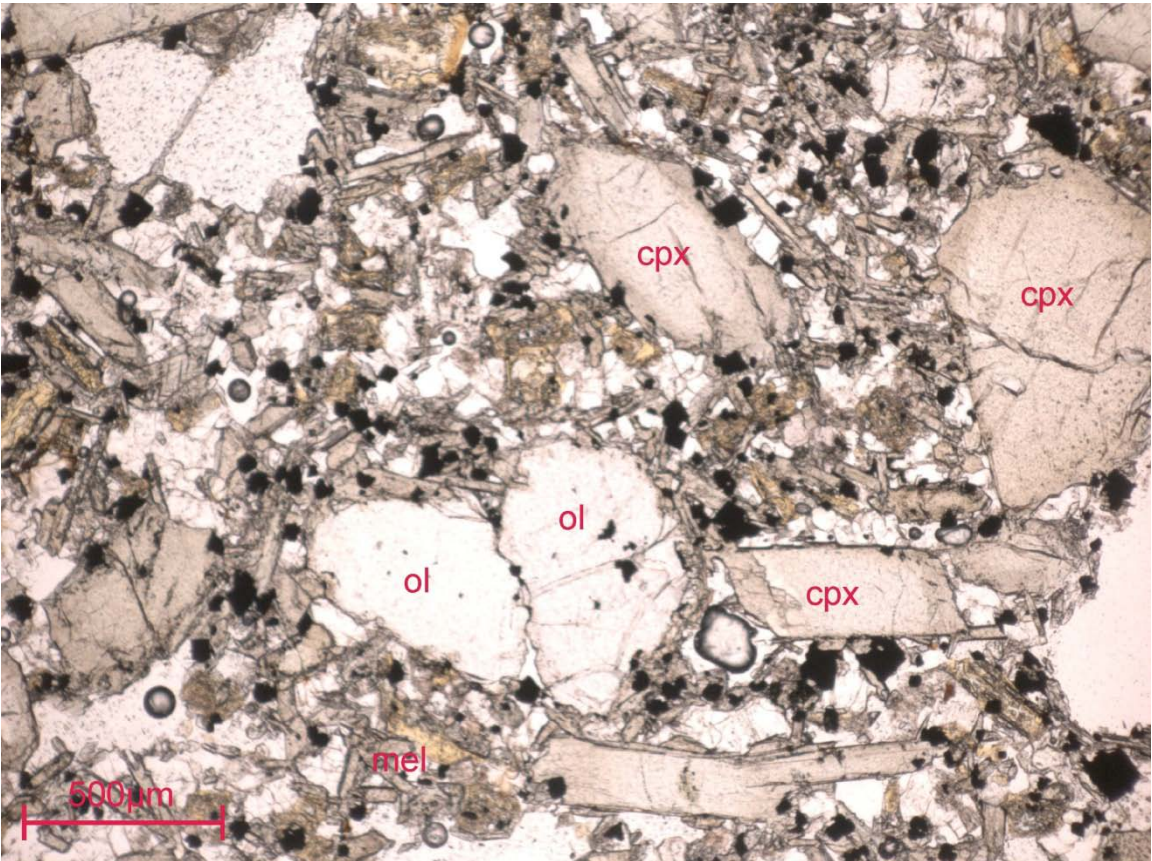


Abb. B9: Roßbüsch (oben Durchlicht, unten gekreuzte Polarisatoren).

Anhang B: Dünnschliff-Fotos der Steinbruchproben

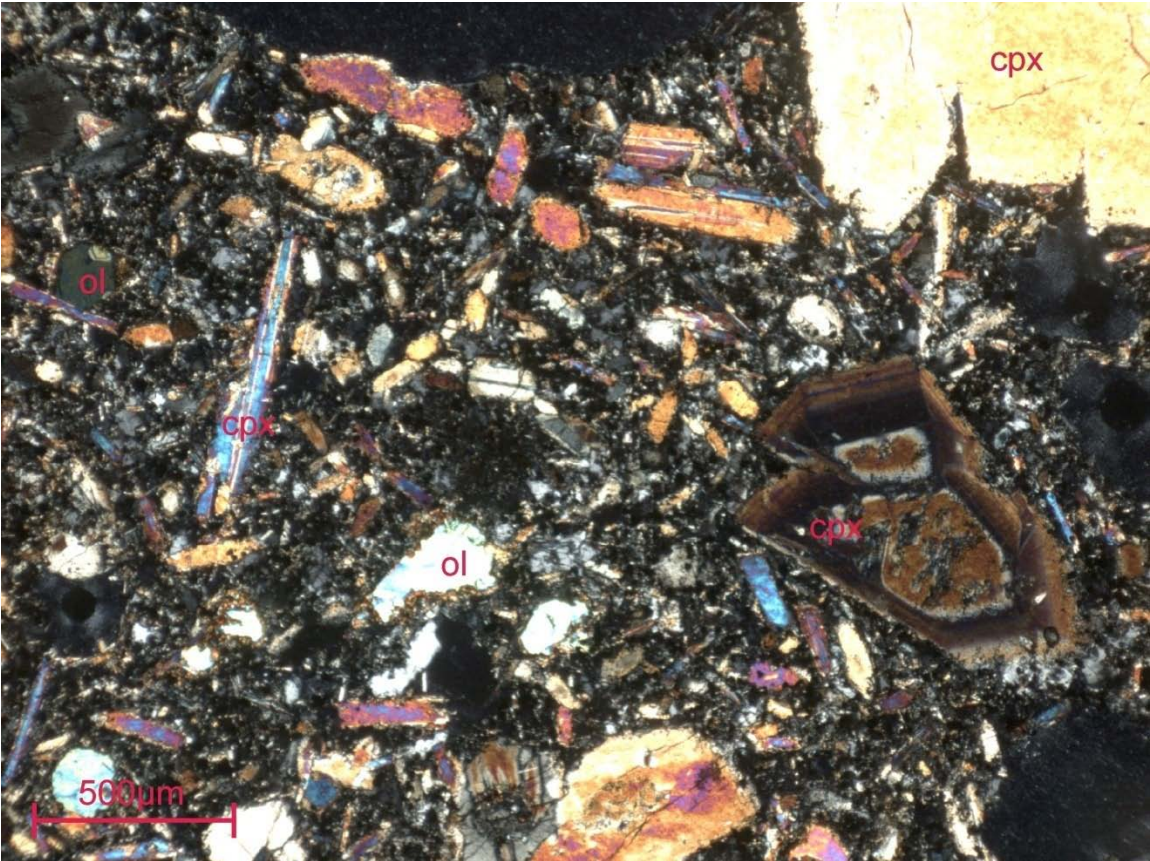
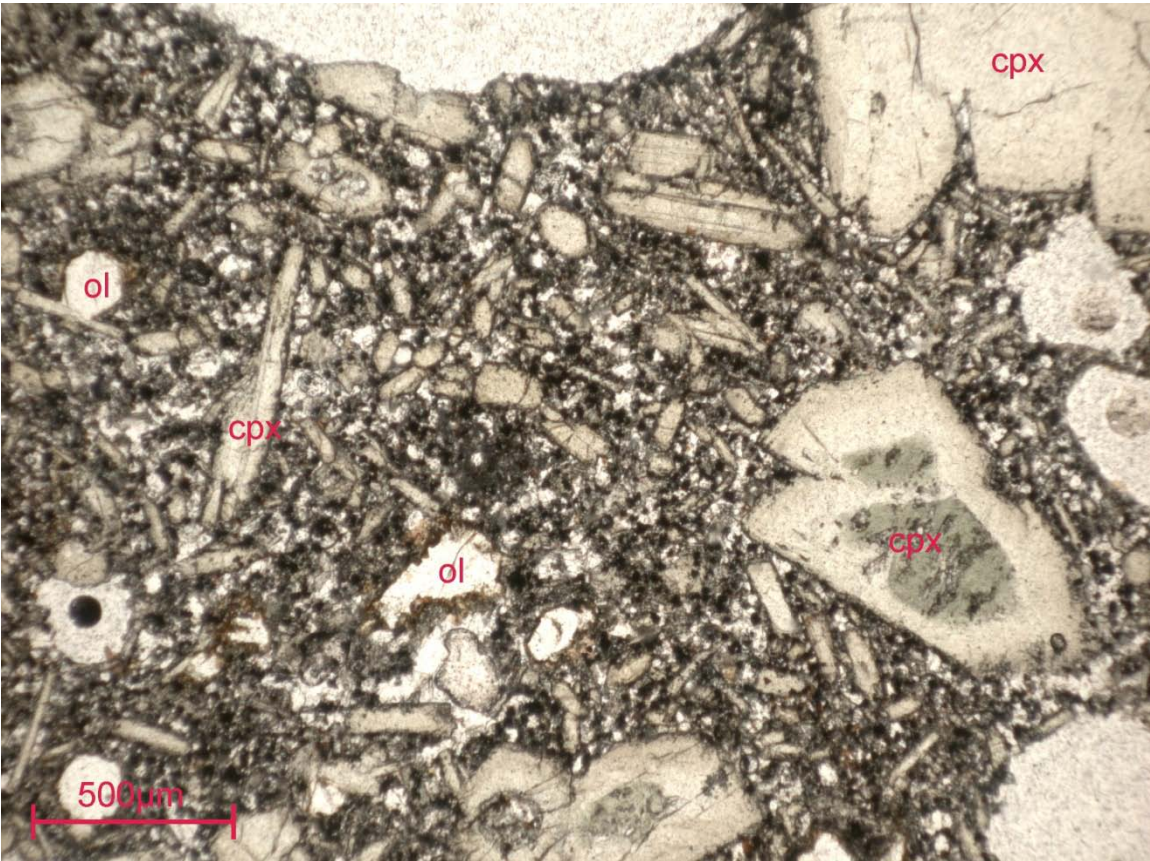


Abb. B10: Eichholz (oben Durchlicht, unten gekreuzte Polarisatoren).

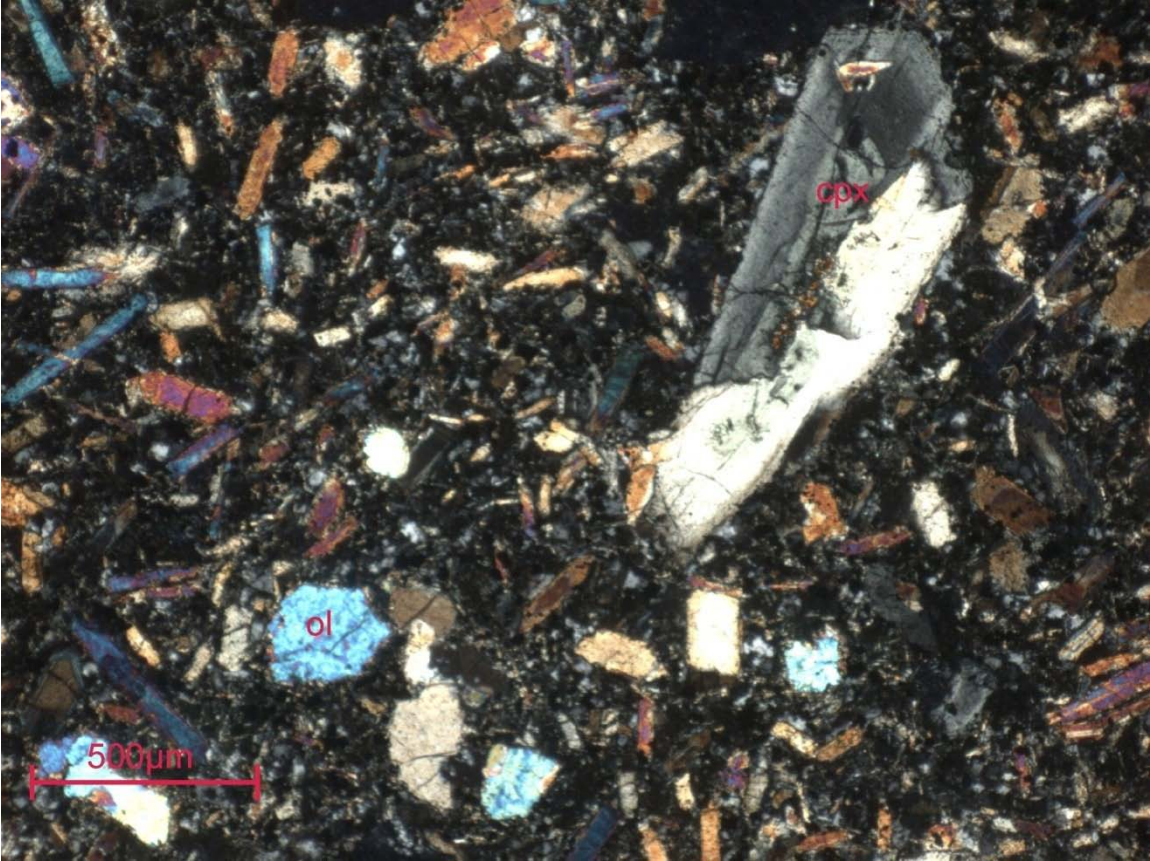
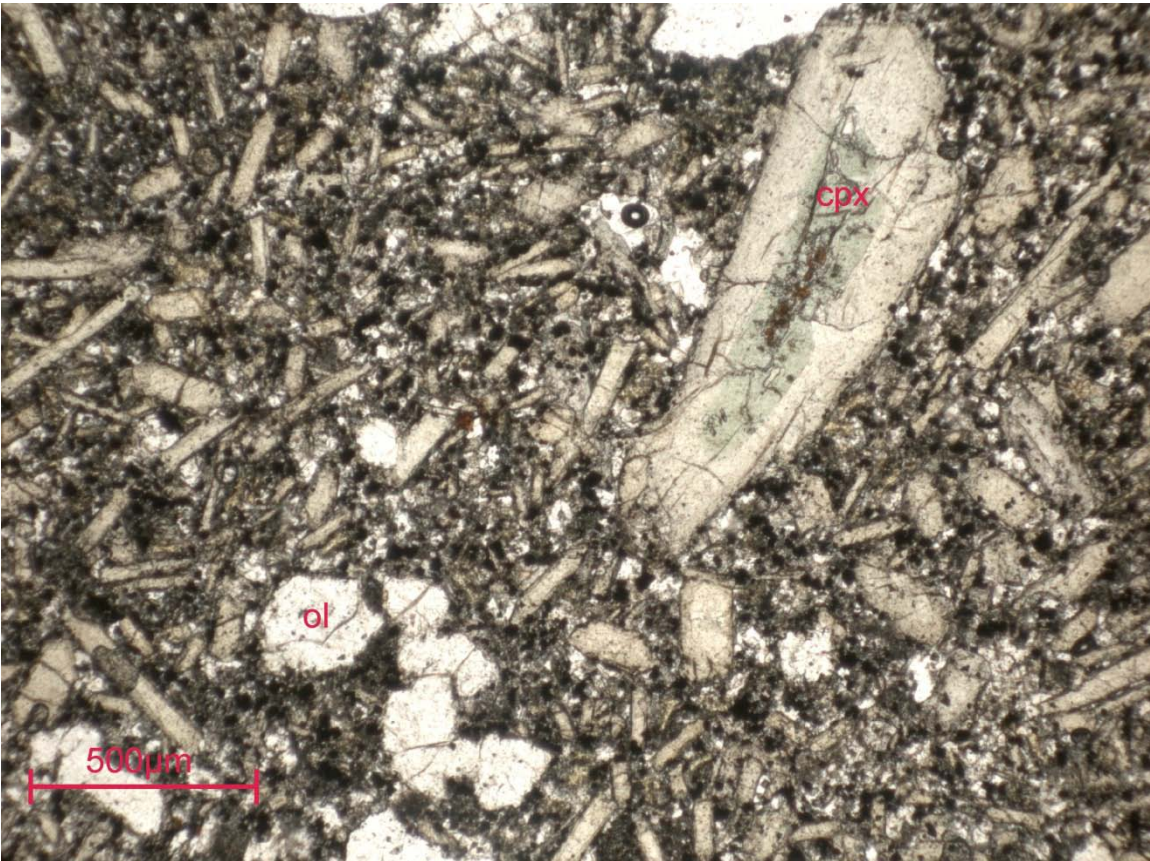


Abb. B11: Dietzenley (oben Durchlicht, unten gekreuzte Polarisatoren).

Anhang B: Dünnschliff-Fotos der Steinbruchproben

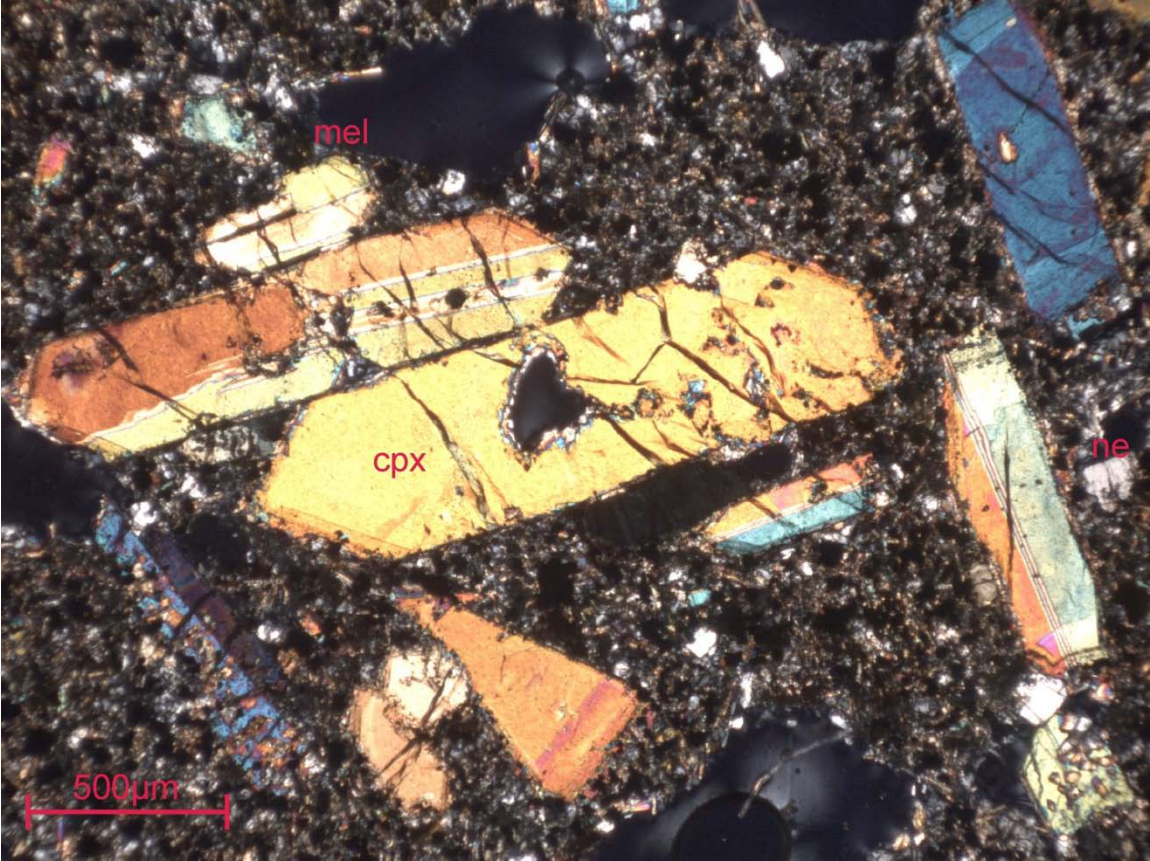
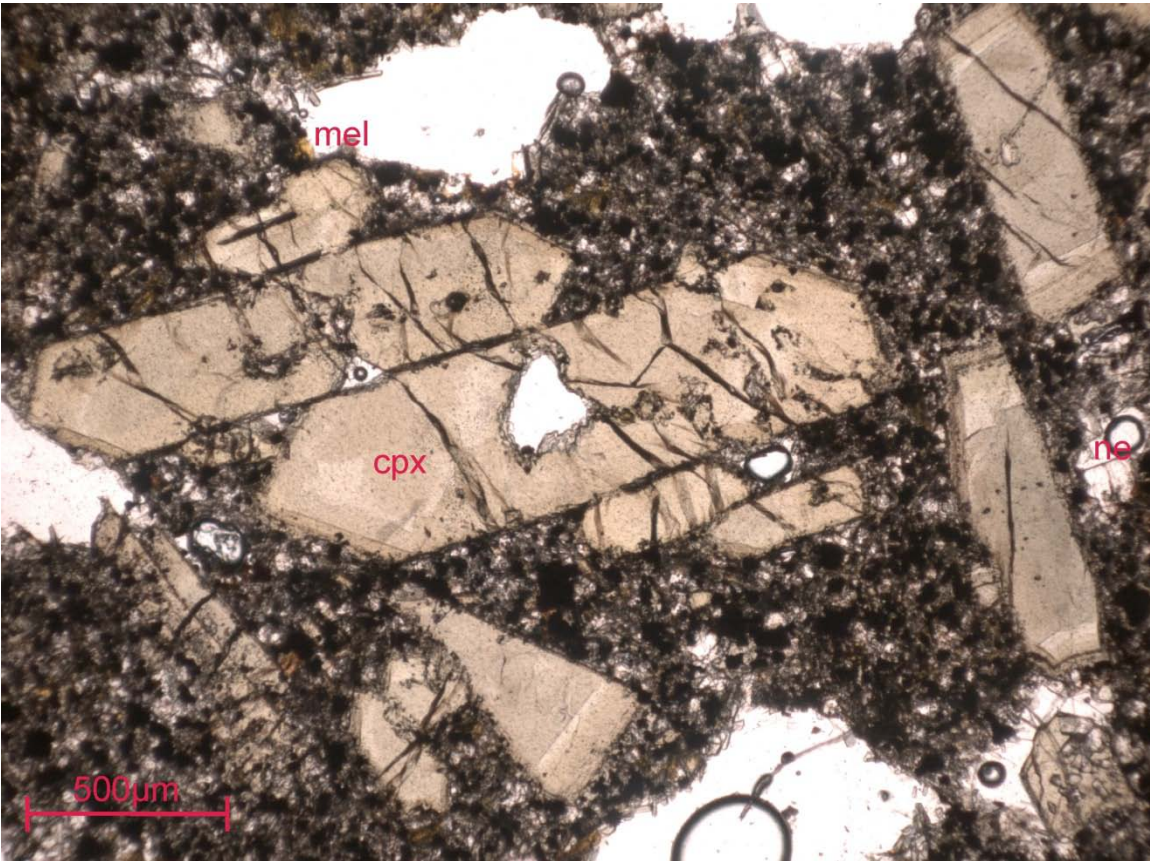


Abb. B12: Mühlberg (oben Durchlicht, unten gekreuzte Polarisatoren).

Anhang B: Dünnschliff-Fotos der Steinbruchproben

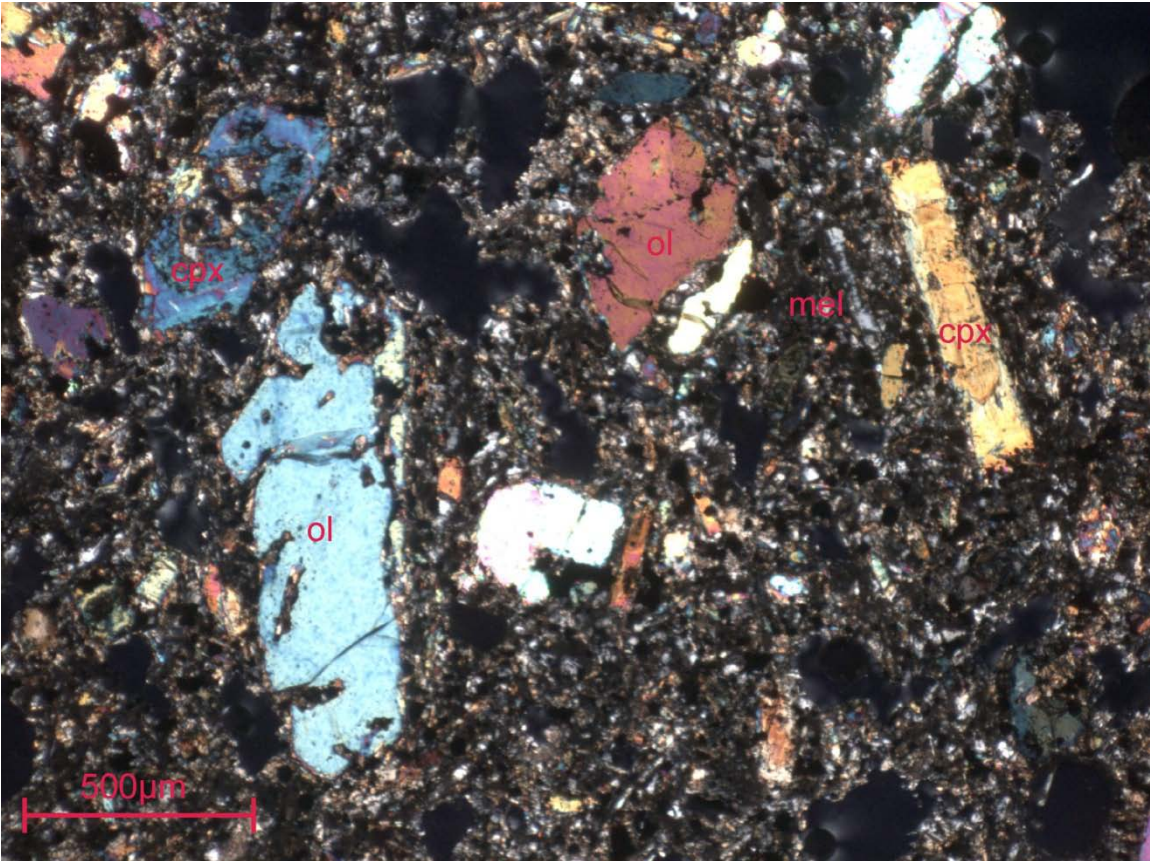
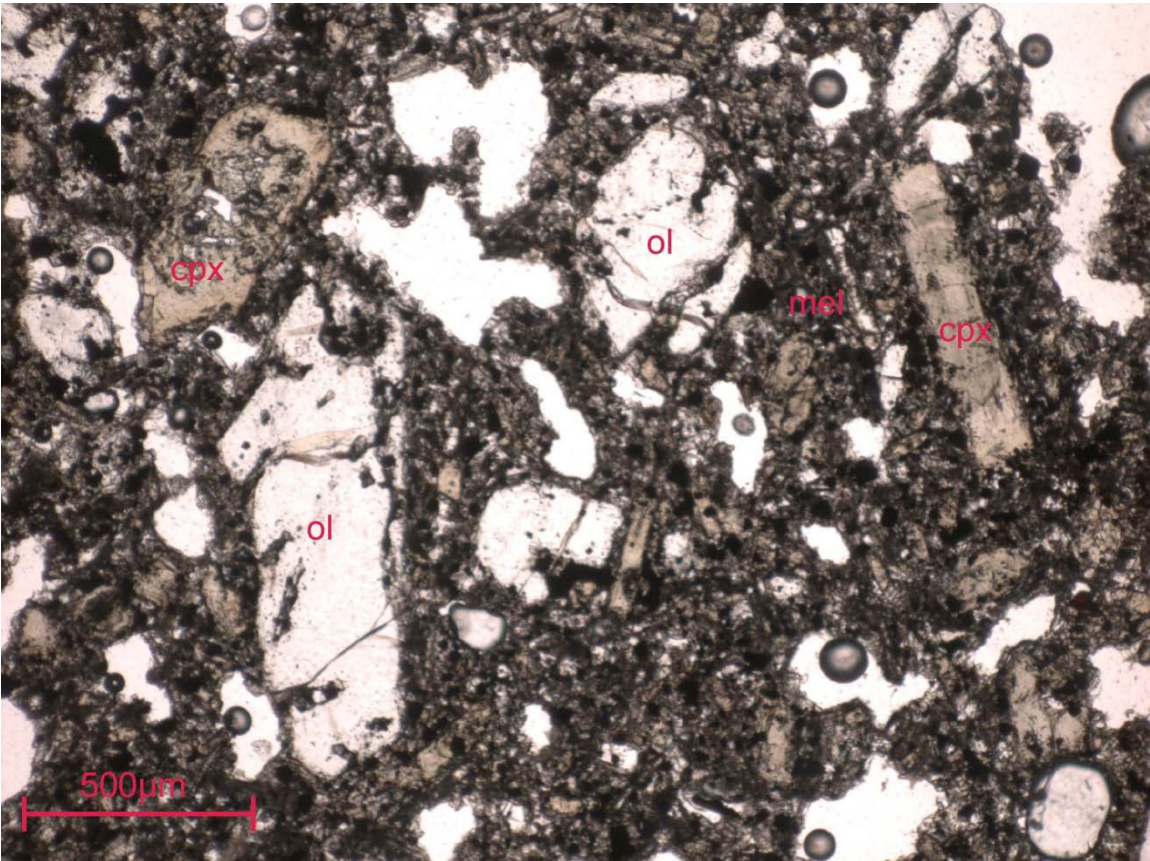


Abb. B13a: Römerberg (oben Durchlicht, unten gekreuzte Polarisatoren).

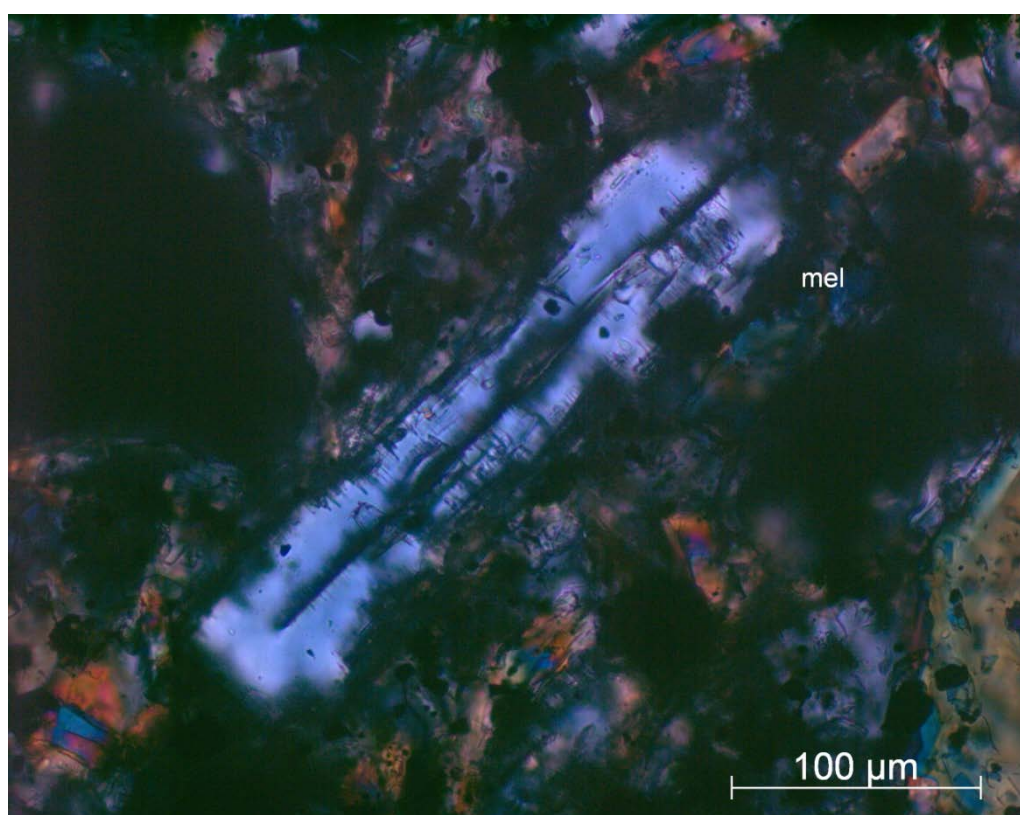
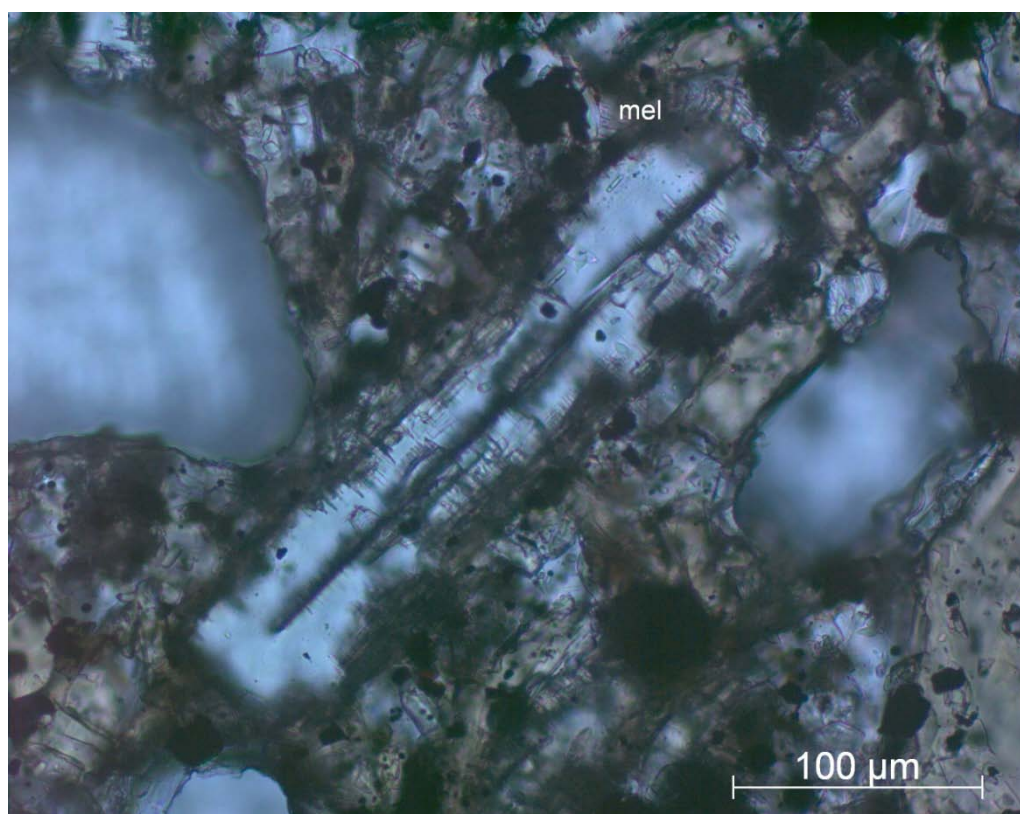


Abb. B13 b: Römerberg-Melilith (oben Durchlicht, unten gekreuzte Polarisatoren).

Gruppe 5: Foidite-Basanite mit Ol als vorherrschenden Phänokristall

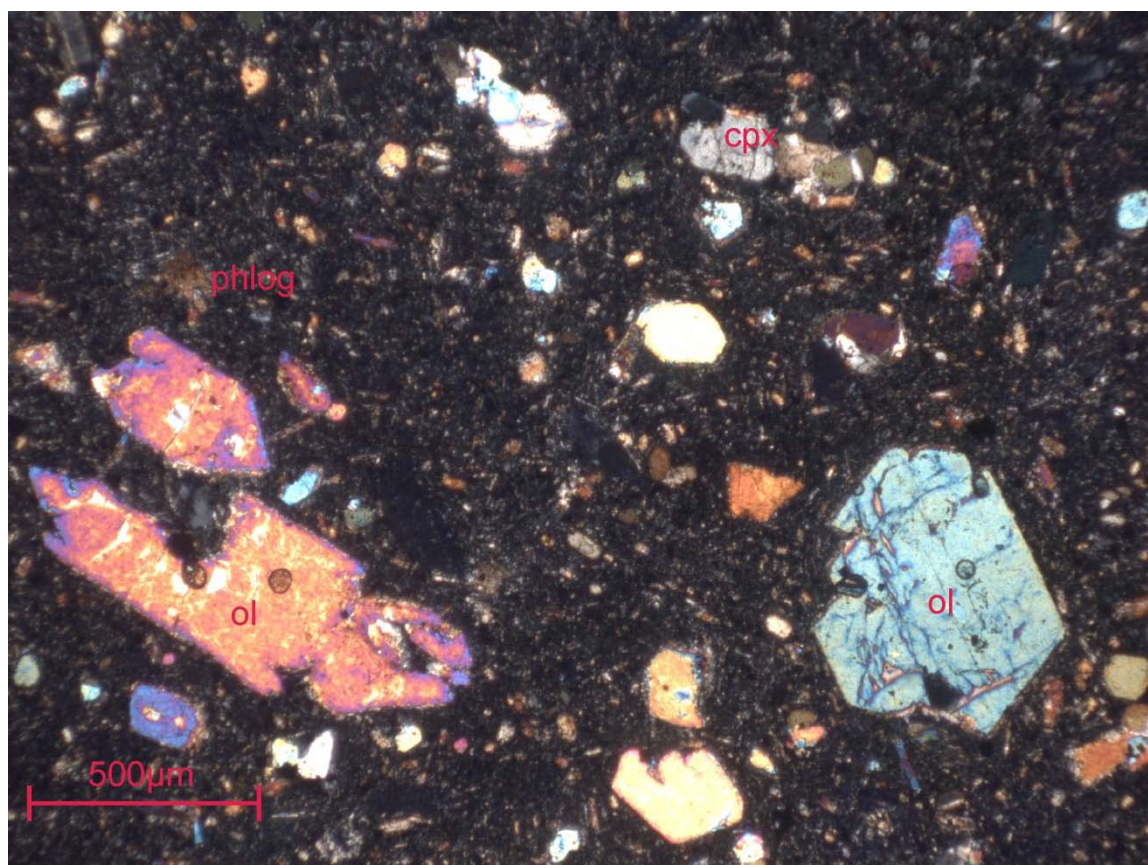
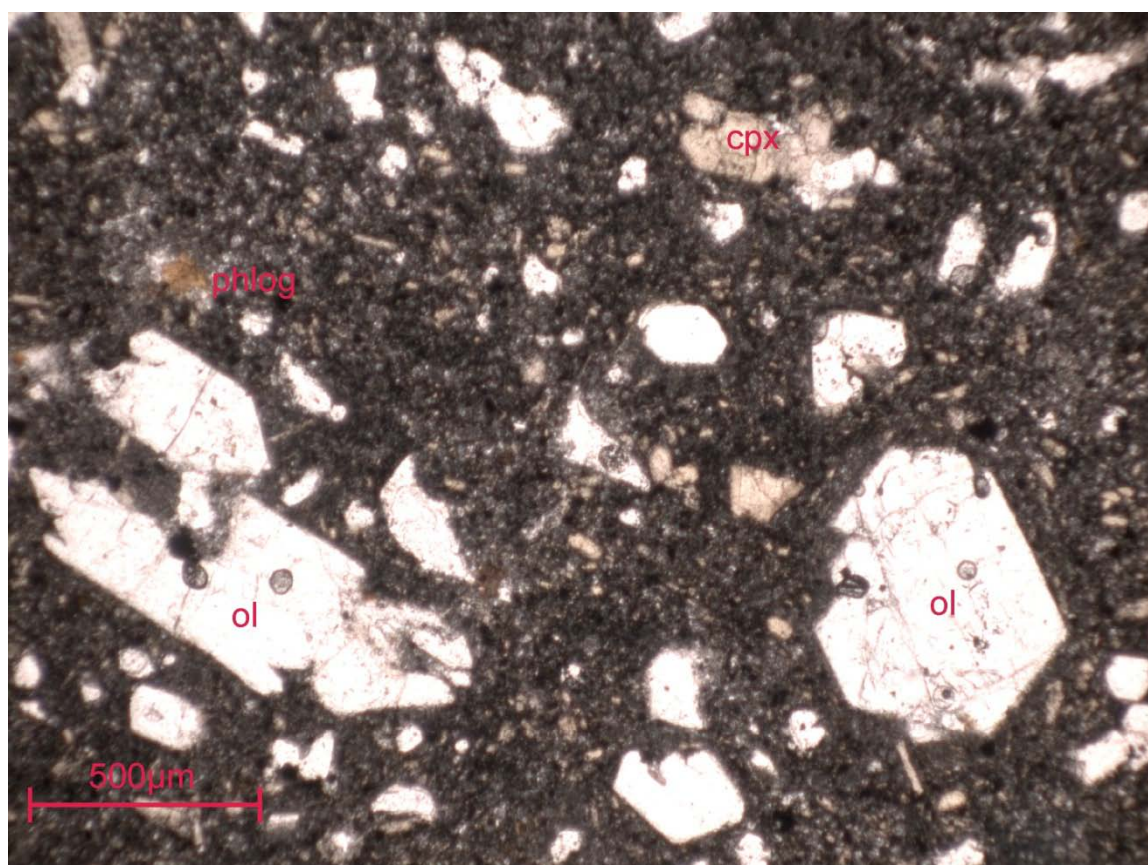


Abb. B14: Mosenberg (oben Durchlicht, unten gekreuzte Polarisatoren).

Anhang C: Herkunft, Datierung und Probenbezeichnung der Mhlsteine

Fundort	archäologische Datierung	Probenbezeichnung
Most	Spätlatène	Most
Kolín	Spätlatène	Kolin
Bibracte	Lt D1/augusteisch	Bib 5.0.8 Bib 5.6.37 Bib 28.57 Bib 538.8 Bib 984.2
Offemont	Gallo-Römisch	Off
Oberaden	11 v. Chr.-8/7 v. Chr.	OA 78.122 OA GR 151
Haltern	7/5 v. Chr.-9/16 n. Chr.	Hal Hand Hal pomp
Barkhausen	11 v. Chr.-16 n. Chr.	BaHa F47 BaHa F48
Anreppen	4-9 n. Chr.	An 90.386m An 94.232 An 92.016
Bielefeld-Sieker	1. Jh. v. Chr.-2. Jh. n. Chr.	Bie 980,59 Bie130
Salzkotten-Thüle	1. Jh. n. Chr. evtl. früher ausgehendes 2. bis 3. Jh. n. Chr. 2./3. Jh. n. Chr. 1. Jh. n. Chr.-1. Hälfte 2. Jh. n. Chr.	Salz 1 Salz 24 Salz 3 Salz 4
Saalburg	1./2. Jh. n. Chr.	SS1007 SS1078 SS1201 ZS1101 ZS1301 ZS1213
Bassou	1.-3. Jh. n. Chr.	Bassou
Hüllhorst	1. Jh. n. Chr.-1. Hälfte 2. Jh. n. Chr.	Hü177-a Hü177-b Hü232
Enger	2. Hälfte/Ende 2. Jh. n. Chr.	Eng 198
Kirchlengern	2. Hälfte 2. Jh.-Ende 3. Jh. n. Chr.	Kirch 162
Wüsten-Krutheide (Hühnebrink)	RKZ	Wü-Hü
Grastrup-Hölsen	möglicherweise 300 v. Chr.-400 n. Chr.	Gra-Hö
Niederösterreich (Fundort unbekannt)	Römische Kaiserzeit	NÖ Frag1 NÖ Frag2 NÖ Frag3
Bonn	Römische Kaiserzeit	Bonn698-119 Bonn1276-13 Bonn698-120 Bonn698-278
Kempton	Römische Kaiserzeit	Cam 18558
Carnuntum	Römische Kaiserzeit	Car pomp

Anhang C: Herkunft, Datierung und Probenbezeichnung der Mhlsteine

Xanten	ca. 30 – 70 n. Chr. ca. 70 – 100 n. Chr. ca. 20 – 50 n. Chr. ca. 10 – 40 n. Chr. ca. 30 – 70 n. Chr. ca. 30 – 70 n. Chr. ca. 50 n. Chr. ca. 50 n. Chr. ca. 50 n. Chr.	X 17701 X 37542 X 17892 X 39444 X 17811i1-a X 17811i1-b X 39957-a X 39957-b X 39957-c
Preny	6./7. Jh. n. Chr.	PrST 252 PrST 250 PrST 247 A PrST 247 B
Pratz	7. Jh. n. Chr.	Pratz
Erfststadt-Niederberg	10./11. Jh. n. Chr.	NWSt2-188 NWSt2-188(2) NWSt2-138 NW ohne Nr.
Mirebeau	Gallo-Römisch	Mirebeau
Longvic	Gallo-Römisch	Long
Burgile	Gallo-Römisch	Burg Meta Burg Cat

Tabellenanhang Tabelle 1: Haupt-, Spurenelemente und normativer Mineralbestand der Steinbruchproben, Haupt- und Spurenelemente der Laven zu Kap. 6

		Mayener Grubenfeld												
Probe:		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13
	SiO ₂ (Gew%)	48,90	49,18	48,81	48,59	48,95	48,79	49,00	48,70	49,42	48,71	48,80	49,03	48,78
	TiO ₂	2,13	2,11	2,15	2,02	2,13	2,03	2,12	2,16	2,06	2,16	2,16	2,11	2,17
	Al ₂ O ₃	16,24	16,25	16,28	16,70	16,41	16,82	16,32	16,35	16,34	16,32	16,22	16,39	16,36
	Fe ₂ O ₃	8,78	8,73	8,80	8,43	8,79	8,39	8,77	8,81	8,65	8,87	8,93	8,73	8,92
	MnO	0,18	0,19	0,18	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18
	MgO	5,16	5,13	5,16	4,79	5,24	4,87	5,17	5,27	5,06	5,27	5,30	5,13	5,26
	CaO	9,37	9,27	9,36	9,01	9,34	9,03	9,28	9,41	9,24	9,39	9,39	9,29	9,41
	Na ₂ O	4,59	4,48	4,63	5,18	4,34	4,98	4,62	4,53	4,51	4,49	4,41	4,54	4,40
	K ₂ O	4,17	4,19	4,15	4,60	4,15	4,42	4,05	4,11	4,09	4,12	4,11	4,12	4,02
	P ₂ O ₅	0,45	0,46	0,46	0,47	0,46	0,48	0,46	0,46	0,44	0,47	0,47	0,46	0,47
	Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	NiO	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	Sum	100,00	100,00	99,99	100,00	100,00	100,00	99,99	100,00	100,01	100,00	99,99	100,00	100,00
	LOI	0,34	0,38	0,25	0,46	0,51	0,69	0,45	0,52	0,37	0,48	0,46	0,47	0,47
	Sc (ppm)	16	16	18	16	18	16	18	19	20	16	17	18	18
	V	228	230	222	188	243	229	219	239	223	235	229	238	211
	Cr	44	46	45	25	50	34	46	46	48	48	46	47	44
	Co	28	23	27	25	28	26	28	24	25	29	29	29	27
	Ni	44	42	43	34	48	36	42	43	40	41	45	46	41
	Cu	41	39	43	36	44	37	39	42	46	40	42	43	35
	Zn	86	86	84	92	91	88	84	84	84	83	89	84	89
	Ga	20	20	21	21	21	22	21	20	21	19	21	20	20
	Rb	129	126	131	145	132	151	128	126	125	127	126	126	124
	Sr	1023	1038	1061	1020	1032	971	1053	1046	1058	1043	1032	1048	1044
	Y	27	27	27	24	26	24	26	27	26	27	25	27	26
	Zr	353	343	351	395	358	394	349	350	346	348	348	352	345
	Nb	103	104	106	113	106	110	102	105	103	103	103	103	103
	Ba	1231	1236	1299	1137	1238	1112	1256	1270	1253	1265	1219	1226	1233
	Pb	11	12	15	16	11	11	12	12	9	12	8	9	11
	Th	11	13	12	15	12	13	13	13	13	11	12	12	12
	U	3	4	3	2	3	3	2	3	4	3	4	3	4
	or (Gew%)	24,64	24,76	24,53	27,18	24,47	26,12	23,93	24,29	24,17	24,35	24,29	24,35	23,76
	ab	5,33	6,59	5,23	1,17	6,21	3,59	6,64	5,20	7,87	5,37	5,86	6,45	6,46
	an	11,39	11,85	11,38	8,73	13,07	10,49	11,83	12,14	12,26	12,21	12,32	12,17	13,02
	di	26,44	25,60	26,35	27,11	24,86	25,65	25,65	25,91	25,26	25,73	25,64	25,41	25,15
	ol	7,65	7,89	7,68	6,70	8,57	7,08	7,97	8,05	7,85	8,18	8,33	7,94	8,41
	mt	1,28	1,28	1,28	0,64	1,28	1,22	1,28	1,28	1,26	1,29	1,29	1,26	1,29
	il	4,05	4,01	4,08	3,84	4,05	3,86	4,03	4,10	3,91	4,10	4,10	4,01	4,12
	ap	0,98	1,00	1,00	1,03	1,00	1,05	1,00	1,00	0,96	1,03	1,03	1,00	1,03
	ne	18,15	16,97	18,39	23,11	16,53	20,88	17,58	17,95	16,41	17,67	17,04	17,31	16,67
	lc	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	cs	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	TOTAL	99,91	99,94	99,91	99,51	100,02	99,93	99,91	99,92	99,96	99,92	99,90	99,92	99,90

Tabellenanhang Tabelle 1: Haupt-, Spurenelemente und normativer Mineralbestand der Steinbruchproben, Haupt- und Spurenelemente der Laven zu Kap. 6

Probe:	E0	E1-0	E1-1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11
SiO ₂ (Gew%)	49,63	49,17	49,41	49,18	50,94	49,43	48,93	51,34	51,21	50,03	50,93	49,03	48,88
TiO ₂	1,92	2,08	2,09	2,12	1,86	2,07	2,16	1,83	1,81	1,99	1,86	2,14	2,16
Al ₂ O ₃	16,94	16,39	16,40	16,39	16,88	16,41	16,28	16,85	16,86	16,60	16,85	16,32	16,26
Fe ₂ O ₃	7,98	8,61	8,59	8,68	7,96	8,62	8,79	7,88	7,86	8,36	8,06	8,73	8,66
MnO	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
MgO	4,53	5,02	5,04	5,19	4,31	5,05	5,34	4,28	4,30	4,77	4,35	5,27	5,29
CaO	8,48	9,09	9,01	9,24	8,03	8,98	9,43	7,99	7,99	8,62	8,08	9,28	9,46
Na ₂ O	5,26	4,72	4,59	4,68	4,99	4,63	4,45	4,92	5,00	4,82	4,87	4,47	4,48
K ₂ O	4,64	4,26	4,25	3,91	4,46	4,19	3,99	4,32	4,40	4,22	4,40	4,12	4,16
P ₂ O ₅	0,42	0,45	0,42	0,42	0,38	0,41	0,43	0,39	0,38	0,41	0,39	0,42	0,45
Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
NiO	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01
Sum	100,00	99,99	100,01	100,02	100,00	100,00	100,00	99,98	100,01	100,01	100,00	99,98	100,01
LOI	0,53	0,34	0,53	0,41	0,46	0,35	0,41	0,52	0,21	0,32	0,46	0,27	0,36
Sc (ppm)	16	17	18	18	19	20	21	17	16	17	17	20	21
V	213	211	211	239	198	220	247	186	201	204	185	226	240
Cr	30	41	54	61	49	54	61	46	41	53	44	57	60
Co	21	25	27	26	19	28	29	25	26	24	27	26	28
Ni	33	42	45	48	38	47	52	38	39	42	39	47	47
Cu	32	36	39	44	32	40	43	33	43	35	37	41	43
Zn	88	92	88	88	86	91	89	87	85	89	91	87	88
Ga	20	21	20	20	20	20	21	21	22	21	21	21	20
Rb	147	128	127	126	139	123	119	137	137	126	147	122	121
Sr	976	1022	1043	1031	1021	1033	1039	1016	1025	1041	1026	1036	1036
Y	25	26	27	26	25	26	28	25	27	26	26	26	27
Zr	400	358	341	347	363	342	340	373	371	349	369	339	336
Nb	111	104	101	104	104	101	104	104	105	104	106	103	104
Ba	1119	1213	1279	1255	1196	1244	1243	1178	1186	1239	1197	1272	1249
Pb	14	13	10	7	10	10	12	10	15	12	10	13	11
Th	16	12	11	11	13	13	11	14	16	12	12	12	12
U	4	3	3	3	4	3	4	3	3	2	3	3	2
or (Gew%)	27,42	25,18	25,12	23,11	26,36	24,76	23,58	25,53	26,00	24,94	26,00	24,35	24,58
ab	6,93	6,02	7,17	7,89	12,06	7,54	6,45	14,52	13,29	9,78	12,63	6,38	5,29
an	11,33	10,95	11,59	12,17	10,49	11,62	12,66	11,13	10,56	11,24	11,12	12,30	11,97
di	23,05	25,66	24,96	25,41	22,16	24,88	25,70	21,41	21,93	23,75	21,79	25,46	26,29
ol	7,06	7,55	7,80	7,98	7,03	7,90	8,42	7,18	7,03	7,59	7,33	8,14	7,79
mt	1,16	1,25	1,25	1,26	1,16	1,25	1,28	1,15	1,15	1,22	1,17	1,26	1,26
il	3,65	3,95	3,97	4,03	3,53	3,93	4,10	3,48	3,44	3,78	3,53	4,06	4,10
ap	0,92	0,98	0,92	0,92	0,83	0,90	0,94	0,85	0,83	0,90	0,85	0,92	0,98
ne	17,88	18,37	17,16	17,18	16,34	17,14	16,90	14,69	15,72	16,75	15,48	17,04	17,67
lc	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
cs	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	99,39	99,91	99,93	99,94	99,95	99,91	100,03	99,93	99,94	99,94	99,92	99,90	99,93

Tabellenanhang Tabelle 1: Haupt-, Spurenelemente und normativer Mineralbestand der Steinbruchproben, Haupt- und Spurenelemente der Laven zu Kap. 6

Probe:	E12	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12
Kottenheimer Winfield													
SiO ₂ (Gew%)	50,08	49,69	49,08	49,82	49,47	49,97	49,92	50,46	50,14	50,17	50,56	50,62	48,89
TiO ₂	1,96	2,11	2,20	2,11	2,12	2,08	2,12	2,00	2,07	2,06	2,00	2,00	2,21
Al ₂ O ₃	16,67	16,21	16,06	16,11	16,14	16,26	16,20	16,36	16,33	16,31	16,33	16,27	16,05
Fe ₂ O ₃	8,29	8,81	8,94	8,76	8,86	8,68	8,68	8,53	8,63	8,56	8,48	8,48	8,97
MnO	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,18	0,18	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
MgO	4,73	5,30	5,53	5,30	5,45	5,20	5,21	5,10	5,20	5,02	5,00	5,03	5,58
CaO	8,63	9,08	9,48	8,94	9,08	8,96	8,95	8,62	8,99	8,87	8,49	8,63	9,48
Na ₂ O	4,78	4,12	4,09	4,40	4,28	4,33	4,27	4,34	4,13	4,33	4,38	4,47	4,34
K ₂ O	4,25	4,05	4,00	3,95	3,97	3,90	4,07	4,01	3,89	4,09	4,17	3,91	3,86
P ₂ O ₅	0,40	0,44	0,43	0,42	0,44	0,42	0,43	0,41	0,42	0,41	0,41	0,41	0,43
Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
NiO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Sum	100,00	100,00	100,02	100,01	99,99	100,00	100,00	100,01	100,00	100,01	100,02	100,01	100,01
LOI	0,37	0,42	0,25	0,29	0,30	0,41	0,45	0,34	0,56	0,38	0,25	0,21	0,38
Sc (ppm)	18	20	16	19	20	20	19	17	19	17	18	20	20
V	208	201	228	212	228	214	205	224	231	210	216	231	239
Cr	53	64	58	64	68	59	59	69	64	54	65	67	66
Co	22	26	30	24	29	28	26	28	27	26	24	27	28
Ni	46	48	52	52	54	53	47	55	46	47	47	50	53
Cu	39	44	45	40	41	41	43	42	41	41	42	35	43
Zn	91	85	83	85	84	87	84	86	83	82	84	84	86
Ga	19	20	20	20	20	19	20	21	20	21	22	21	20
Rb	129	121	122	113	118	122	118	125	123	123	127	127	113
Sr	1054	989	996	977	979	989	975	956	999	1001	952	946	996
Y	27	26	27	27	26	27	27	27	26	26	26	26	28
Zr	357	327	329	326	320	332	321	335	334	327	324	330	321
Nb	105	96	97	93	93	95	94	94	98	98	93	92	94
Ba	1236	1246	1244	1231	1229	1218	1210	1188	1220	1240	1171	1179	1216
Pb	8	12	12	13	10	12	11	12	13	11	10	11	11
Th	12	12	10	11	10	12	11	11	13	11	13	12	12
U	4	2	3	5	4	4	2	2	3	3	4	3	4
or (Gew%)	25,12	23,88	23,64	23,34	23,46	23,05	24,05	23,70	22,99	24,17	24,64	23,11	22,81
ab	9,73	10,26	7,58	10,86	9,60	11,82	10,69	12,62	12,78	11,41	12,85	13,97	7,36
an	11,48	13,80	13,65	12,54	13,10	13,41	13,02	13,31	14,53	12,99	12,58	12,78	12,91
di	23,65	23,31	25,09	23,88	23,87	23,25	23,48	22,82	22,45	23,30	22,09	22,49	25,69
ol	7,50	9,10	8,92	8,83	9,20	8,82	8,77	8,70	9,08	8,36	8,74	8,65	8,82
mt	1,20	1,28	1,30	1,28	1,29	1,26	1,26	1,23	1,25	1,25	1,23	1,23	1,30
il	3,72	4,01	4,18	4,01	4,03	3,95	3,93	3,80	3,93	3,91	3,80	3,80	4,20
ap	0,87	0,96	0,94	0,92	0,96	0,92	0,94	0,90	0,92	0,90	0,90	0,90	0,94
ne	16,64	13,33	14,64	14,29	14,42	13,45	13,78	13,06	12,01	13,67	13,11	12,92	15,91
lc	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
cs	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	99,91	99,93	99,95	99,94	99,93	99,93	99,93	100,14	99,93	99,95	99,95	99,85	99,94

Tabellenanhang Tabelle 1: Haupt-, Spurenelemente und normativer Mineralbestand der Steinbruchproben, Haupt- und Spurenelemente der Laven zu Kap. 6

Probe:	Hohe Buche												
	Men10	Men11	HB1-0	HB1-1	HB2	HB3	HB4	HB5	HB6	HB7	HB8	HB9	HB10
SiO ₂ (Gew%)	48,55	48,62	42,83	42,81	42,69	42,77	42,87	42,82	42,84	42,71	42,69	42,97	42,91
TiO ₂	2,08	2,09	2,94	2,98	2,99	2,98	2,97	2,97	3,00	3,00	2,98	2,97	2,97
Al ₂ O ₃	17,05	17,02	13,44	13,51	13,57	13,58	13,55	13,58	13,64	13,58	13,58	13,58	13,63
Fe ₂ O ₃	8,63	8,74	11,83	11,84	11,89	11,91	11,87	11,84	11,90	11,91	11,88	11,87	11,86
MnO	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
MgO	4,58	4,59	10,01	9,95	9,89	9,84	9,88	9,83	9,68	9,75	9,81	9,83	9,84
CaO	8,95	9,00	12,40	12,36	12,28	12,32	12,39	12,30	12,33	12,30	12,23	12,34	12,31
Na ₂ O	4,94	4,72	2,67	2,68	2,77	2,71	2,64	2,70	2,69	2,80	2,76	2,76	2,67
K ₂ O	4,47	4,44	3,13	3,07	3,14	3,12	3,03	3,18	3,12	3,17	3,23	2,89	3,06
P ₂ O ₅	0,54	0,57	0,54	0,55	0,56	0,55	0,55	0,55	0,55	0,56	0,57	0,56	0,55
Cr ₂ O ₃	0,00	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
NiO	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
Sum	100,00	100,00	100,00	99,99	100,01	99,99	99,98	100,00	99,98	100,00	99,99	100,00	100,01
LOI	0,71	0,91	-0,06	0,12	0,12	0,01	0,22	0,00	0,15	0,17	-0,19	0,30	0,14
Sc (ppm)	15	17	31	36	33	32	35	33	34	34	33	35	34
V	225	222	334	318	328	333	323	328	336	299	344	333	331
Cr	31	38	190	197	192	189	199	196	193	193	197	198	195
Co	26	26	48	48	50	50	47	44	48	46	45	47	49
Ni	29	31	118	116	113	115	116	115	111	107	112	119	111
Cu	29	30	72	68	70	76	72	80	76	68	49	73	67
Zn	91	91	78	84	78	81	81	79	81	81	81	82	79
Ga	20	20	18	17	19	19	18	18	18	18	17	18	18
Rb	121	119	84	84	88	85	91	81	86	83	84	88	86
Sr	1523	1533	766	760	779	777	771	777	784	771	785	777	779
Y	32	31	24	24	24	24	25	26	24	24	25	22	24
Zr	343	342	262	265	266	272	268	266	272	270	270	267	266
Nb	131	130	72	72	71	73	71	72	72	71	72	73	72
Ba	1638	1661	1051	997	1078	1062	1006	1053	1012	987	1029	1010	1061
Pb	14	15	9	6	6	9	7	7	4	6	3	5	4
Th	11	12	5	6	5	6	7	6	5	6	5	5	6
U	2	2	<1,6	3	3	0	1	3	2	0	2	2	2
or (Gew%)	26,43	26,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ab	3,50	4,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
an	11,14	12,14	15,42	15,77	15,32	15,67	16,16	15,53	15,91	15,15	14,96	16,17	16,17
di	24,55	23,74	29,17	29,47	28,55	29,05	29,98	29,03	29,60	28,69	28,24	31,20	29,90
ol	7,18	7,60	18,01	17,78	18,03	17,80	17,50	17,72	17,27	17,75	18,01	16,96	17,44
mt	1,25	1,27	1,73	1,73	1,73	1,73	1,72	1,72	1,73	1,73	1,73	1,72	1,72
il	3,95	3,96	5,58	5,66	5,68	5,66	5,65	5,64	5,70	5,69	5,65	5,67	5,65
ap	1,18	1,25	1,18	1,20	1,22	1,20	1,20	1,20	1,20	1,23	1,24	1,22	1,19
ne	20,75	19,19	12,24	12,29	12,70	12,42	12,11	12,39	12,34	12,82	12,82	12,64	12,22
lc	0,00	0,00	14,50	14,23	14,55	14,46	14,05	14,74	14,47	14,68	14,99	13,38	14,20
cs	0,00	0,00	2,07	1,76	2,11	1,89	1,49	1,91	1,63	2,14	2,25	0,93	1,40
TOTAL	99,92	99,92	99,89	99,87	99,89	99,88	99,87	99,88	99,87	99,89	99,87	99,89	99,90

Tabellenanhang Tabelle 1: Haupt-, Spurenelemente und normativer Mineralbestand der Steinbruchproben, Haupt- und Spurenelemente der Laven zu Kap. 6

Probe:	Mauerley										Hochsimmer				
	HB11	ML1-0	ML1-1	ML2	ML3	ML5	ML6	ML9	ML10	ML11	ML12	MLneu	Hs		
SiO ₂ (Gew%)	42,77	43,21	43,02	43,62	43,03	43,02	43,01	44,44	42,96	42,99	43,03	43,04	45,10		
TiO ₂	2,97	2,88	2,93	2,98	2,97	2,96	2,96	2,81	2,97	2,93	2,91	2,93	2,08		
Al ₂ O ₃	13,63	12,96	13,37	13,98	14,06	13,99	13,45	14,14	13,61	13,23	13,28	13,53	17,02		
Fe ₂ O ₃	11,88	11,47	11,74	11,91	11,92	11,99	11,78	11,34	11,71	11,66	11,58	11,68	10,63		
MnO	0,19	0,17	0,17	0,17	0,18	0,19	0,18	0,17	0,18	0,17	0,17	0,17	0,29		
MgO	9,74	10,57	10,40	10,35	9,27	9,09	10,13	9,13	9,99	10,40	10,47	10,12	4,46		
CaO	12,27	12,99	12,24	11,76	12,02	12,17	12,23	11,92	12,18	12,57	12,51	12,29	10,84		
Na ₂ O	2,85	2,30	2,42	3,95	2,99	2,87	2,51	2,10	2,73	2,40	2,39	2,50	4,42		
K ₂ O	3,12	2,90	3,11	0,68	2,90	3,07	3,17	3,37	3,07	3,08	3,07	3,16	4,31		
P ₂ O ₅	0,56	0,50	0,53	0,56	0,62	0,63	0,54	0,53	0,56	0,52	0,53	0,54	0,82		
Cr ₂ O ₃	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,00		
NiO	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00		
Sum	100,01	100,01	99,99	100,01	99,99	100,00	100,01	100,00	100,00	99,99	99,99	100,00	99,99		
LOI	0,19	0,10	0,05	1,23	0,23	0,26	0,07	1,00	0,04	0,11	0,02	0,04	1,57		
Sc (ppm)	32	36	33	28	28	28	33	31	30	35	34	33	11		
V	330	335	326	323	311	322	322	326	321	324	344	329	300		
Cr	187	237	214	190	132	132	181	201	188	225	226	209	27		
Co	47	46	53	49	45	42	46	45	45	48	53	50	25		
Ni	110	140	136	147	102	96	124	144	126	136	148	131	24		
Cu	70	73	84	59	67	74	92	89	89	85	74	79	37		
Zn	81	76	78	81	81	82	77	82	79	76	82	77	123		
Ga	18	16	17	17	17	18	18	17	17	18	18	17	20		
Rb	88	80	87	86	99	98	88	92	89	82	85	85	110		
Sr	782	706	764	809	865	873	774	805	780	746	745	787	2141		
Y	25	22	23	24	25	24	24	25	23	22	22	23	38		
Zr	270	233	244	254	285	288	248	282	249	241	245	252	299		
Nb	73	66	71	76	82	81	72	73	73	69	71	72	215		
Ba	1032	1041	1156	1083	1166	1132	1174	1100	1176	1067	1058	1127	933		
Pb	6	7	5	7	3	10	2	8	6	8	5	5	13		
Th	7	5	5	5	8	8	5	8	6	5	8	7	17		
U	2	2	2	2	1	4	1	0	1	2	2	1	5		
or (Gew%)	0,00	0,00	0,00	4,02	0,00	0,00	0,00	8,21	0,00	0,00	0,00	0,00	8,72		
ab	0,00	0,00	0,00	5,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
an	15,19	16,47	16,43	18,41	16,42	16,25	16,05	19,18	15,82	16,24	16,47	16,36	13,87		
di	29,12	31,67	29,93	29,45	31,67	31,21	29,93	29,74	30,02	29,94	30,02	29,87	28,80		
ol	17,59	17,79	18,35	18,57	15,87	15,81	17,89	15,81	17,52	18,26	18,29	17,79	7,80		
mt	1,73	1,67	1,71	1,73	1,73	1,74	1,71	1,65	1,70	1,69	1,68	1,70	1,55		
il	5,63	5,47	5,57	5,65	5,63	5,62	5,61	5,33	5,64	5,56	5,52	5,56	3,95		
ap	1,22	1,09	1,16	1,22	1,36	1,38	1,18	1,15	1,22	1,13	1,16	1,18	1,79		
ne	13,05	10,54	11,09	14,89	13,69	13,14	11,53	9,63	12,52	10,99	10,94	11,46	20,26		
lc	14,44	13,44	14,41	0,00	13,42	14,21	14,67	9,19	14,22	14,26	14,21	14,64	13,13		
cs	1,92	1,74	1,22	0,00	0,08	0,53	1,32	0,00	1,23	1,80	1,59	1,32	0,00		
TOTAL	99,89	99,89	99,87	99,89	99,88	99,89	99,89	99,88	99,89	99,87	99,87	99,88	99,88		

Tabellenanhang Tabelle 1: Haupt-, Spurenelemente und normativer Mineralbestand der Steinbruchproben, Haupt- und Spurenelemente der Laven zu Kap. 6

Probe:	Herchenberg										Dietzenley Ringwall		
	HL1	HL2	HL3	HL4a	HL4b	HL5	HL6	HL7	HerBe1	HerBe2	HerBe3	Dilb	DilM
SiO ₂ (Gew%)	43,98	43,95	44,73	45,04	45,57	45,15	45,09	44,95	39,72	39,66	39,71	41,57	40,56
TiO ₂	2,16	2,15	2,03	1,99	1,98	1,99	1,98	2,00	3,11	3,12	3,10	3,00	2,92
Al ₂ O ₃	15,36	15,25	16,65	16,91	16,92	16,93	16,94	16,86	13,73	13,70	13,76	11,89	11,55
Fe ₂ O ₃	10,54	10,57	10,34	10,40	10,31	10,36	10,33	10,37	11,76	11,72	11,71	12,25	11,94
MnO	0,25	0,25	0,27	0,28	0,27	0,27	0,27	0,28	0,22	0,21	0,22	0,21	0,21
MgO	6,49	6,58	4,32	4,40	4,32	4,35	4,31	4,25	9,00	9,02	8,89	9,79	9,85
CaO	11,33	11,44	10,54	9,93	9,75	9,96	9,93	10,21	14,73	14,71	14,71	14,58	15,71
Na ₂ O	4,99	4,92	5,70	5,57	5,57	5,60	5,86	5,48	3,63	3,67	3,74	2,78	3,26
K ₂ O	4,12	4,16	4,62	4,66	4,49	4,58	4,47	4,79	3,42	3,48	3,45	3,03	3,16
P ₂ O ₅	0,72	0,71	0,80	0,80	0,79	0,80	0,80	0,79	0,67	0,68	0,68	0,84	0,79
Cr ₂ O ₃	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05
NiO	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Sum	99,98	100,01	100,00	99,99	99,97	100,00	99,98	100,00	100,01	100,00	99,99	100,00	100,01
LOI	0,19	0,28	0,34	0,43	0,60	0,62	0,68	0,49	1,07	1,01	0,89	0,91	0,15
Sc (ppm)	16	18	11	10	11	11	11	13	28	26	30	32	35
V	316	309	314	312	293	310	307	306	387	384	393	466	450
Cr	97	99	26	35	31	31	34	30	116	113	119	300	287
Co	29	30	27	21	22	27	27	23	41	38	42	42	44
Ni	64	63	18	27	25	26	24	25	64	63	66	130	125
Cu	57	57	44	35	36	36	36	38	83	84	87	133	122
Zn	103	99	112	114	115	115	115	113	80	90	86	86	83
Ga	19	19	21	21	20	22	21	21	17	17	19	18	17
Rb	97	96	103	108	113	115	119	123	83	83	84	116	98
Sr	1771	1747	2186	2165	2105	2122	2106	2187	967	952	1011	583	881
Y	34	35	38	38	39	37	38	39	27	27	26	24	24
Zr	276	274	301	297	302	302	300	302	260	257	264	274	264
Nb	179	173	218	211	214	215	217	217	136	133	142	107	102
Ba	972	980	1005	939	954	920	920	960	1421	1399	1439	1271	1148
Pb	9	12	15	16	17	14	13	13	4	1	7	7	6
Th	15	14	16	19	18	17	16	17	10	9	10	5	6
U	3	4	5	5	4	4	4	5	3	1	3	<1,6	2
or (Gew%)	0,00	0,00	0,00	4,28	10,59	5,41	4,90	1,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ab	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
an	7,34	6,23	6,20	7,37	7,90	7,53	6,72	7,26	11,07	10,63	10,57	11,01	7,57
di	30,29	32,99	32,93	30,56	29,43	30,56	31,12	31,90	11,76	11,28	11,67	26,47	19,85
ol	10,77	5,69	5,71	6,85	7,03	6,71	6,40	6,03	22,14	22,28	21,92	19,05	21,23
mt	1,54	1,51	1,51	1,51	1,49	1,51	1,49	1,51	1,71	1,70	1,70	1,78	1,73
il	4,10	3,86	3,86	3,78	3,76	3,78	3,76	3,80	5,91	5,91	5,89	5,69	5,54
ap	1,57	1,75	1,75	1,75	1,73	1,75	1,75	1,73	1,46	1,49	1,49	1,83	1,72
ne	22,87	26,13	26,13	25,53	25,53	25,67	26,86	25,12	16,64	16,82	17,14	12,76	14,93
lc	19,09	21,36	21,41	18,24	12,51	16,98	16,87	20,96	15,85	16,13	15,99	14,02	14,63
cs	2,27	0,39	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,37	13,64	13,51	7,23	12,63
TOTAL	99,85	99,90	99,91	99,87	99,97	99,89	99,87	99,88	99,91	99,86	99,87	99,83	99,85

Tabellenanhang Tabelle 1: Haupt-, Spurenelemente und normativer Mineralbestand der Steinbruchproben, Haupt- und Spurenelemente der Laven zu Kap. 6

Probe:	Dietzenely/Davitskreuz												
	Dil1-1	Dil1-2	Dil1-3	Dil1-4	Dil1-5	Dil1-6	Dil1-7	Dil1-8	Dil1-9	Dil1-10	Dil2-1	Dil2-2	Dil2-3
SiO ₂ (Gew%)	40,52	40,46	40,70	40,48	40,62	41,27	40,92	40,45	40,72	41,45	40,77	40,97	41,24
TiO ₂	2,91	2,92	2,91	2,94	2,91	2,94	2,95	2,92	2,94	3,04	2,90	2,90	2,96
Al ₂ O ₃	11,63	11,58	11,57	11,56	11,57	11,70	11,66	11,52	11,71	12,09	11,59	11,71	11,83
Fe ₂ O ₃	11,87	11,94	11,89	12,04	11,90	12,11	11,98	12,00	11,91	12,47	11,88	11,93	12,20
MnO	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,21	0,21	0,22
MgO	9,74	9,90	9,78	9,93	9,80	9,82	9,80	9,91	9,76	9,98	9,76	9,60	9,97
CaO	15,52	15,47	15,66	15,48	15,67	15,05	15,65	15,54	15,57	14,75	16,02	16,06	16,52
Na ₂ O	3,29	3,13	3,21	3,11	3,25	2,85	2,97	3,21	3,16	2,50	3,08	2,85	2,14
K ₂ O	3,46	3,53	3,18	3,40	3,18	3,14	3,01	3,42	3,18	2,61	2,87	2,82	1,99
P ₂ O ₅	0,79	0,76	0,80	0,77	0,81	0,82	0,79	0,78	0,78	0,83	0,86	0,88	0,88
Cr ₂ O ₃	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05
NiO	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Sum	100,00	99,98	99,99	100,00	100,00	99,99	100,00	100,01	100,00	100,00	100,01	100,00	100,01
LOI	0,04	0,56	0,29	0,19	0,25	0,87	0,39	0,02	0,33	1,30	0,97	1,24	2,20
Sc (ppm)	35	34	34	36	35	36	34	36	38	35	36	31	32
V	436	440	460	453	450	398	421	487	467	463	416	425	409
Cr	303	306	310	307	299	301	294	314	305	315	290	276	295
Co	42	45	41	44	42	42	40	43	43	46	46	41	47
Ni	122	132	126	127	125	127	122	133	125	133	120	115	125
Cu	142	133	138	147	131	129	118	140	135	107	160	112	114
Zn	85	90	92	85	86	89	88	87	85	89	86	88	90
Ga	18	18	17	17	17	17	18	18	18	18	17	17	17
Rb	101	106	90	97	90	111	131	104	102	85	110	96	79
Sr	959	750	904	795	905	678	978	812	971	560	1011	1067	1100
Y	25	22	25	25	23	23	24	23	24	27	25	25	25
Zr	265	263	270	266	269	272	269	267	270	279	278	282	283
Nb	102	101	103	94	100	105	103	98	104	110	107	112	110
Ba	1141	1099	1228	1035	1174	1008	1204	1091	1202	1259	1153	1211	1168
Pb	6	9	6	5	4	4	3	7	4	8	10	6	4
Th	8	8	6	7	8	6	6	7	7	10	6	9	7
U	1	2	2	2	3	2	3	2	1	1	2	2	3
or (Gew%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ab	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
an	6,77	7,10	7,75	7,52	7,59	9,84	9,59	6,92	8,41	14,06	9,30	10,80	16,80
di	18,35	17,60	20,65	18,37	20,19	24,15	22,50	18,09	20,58	27,25	22,41	23,81	28,52
ol	21,48	22,11	20,77	21,99	20,98	19,83	20,21	22,03	20,75	19,32	20,10	19,41	18,64
mt	1,73	1,74	1,73	1,75	1,73	1,76	1,74	1,74	1,73	1,81	1,73	1,73	1,77
il	5,52	5,55	5,53	5,58	5,53	5,59	5,60	5,54	5,58	5,78	5,51	5,50	5,62
ap	1,72	1,66	1,75	1,67	1,77	1,80	1,71	1,70	1,71	1,81	1,87	1,92	1,92
ne	15,07	14,36	14,73	14,28	14,90	13,08	13,61	14,69	14,47	11,45	14,14	13,09	9,82
lc	16,03	16,38	14,75	15,77	14,74	14,57	13,95	15,87	14,72	12,09	13,31	13,09	9,22
cs	13,16	13,32	12,17	12,91	12,40	9,21	10,92	13,27	11,90	6,26	11,47	10,49	7,54
TOTAL	99,84	99,82	99,82	99,84	99,84	99,82	99,84	99,85	99,84	99,83	99,84	99,83	99,84

Tabellenanhang Tabelle 1: Haupt-, Spurenelemente und normativer Mineralbestand der Steinbruchproben, Haupt- und Spurenelemente der Laven zu Kap. 6

Probe:	Dietzenley/Flemmingshöhe				Roßbütsch								
	Dil3-1	Dil3-2	Dil3-3	Dil3-4	RoBü1-0	RoBü1-1	RoBü1-2	RoBü1-3	RoBü1-4	RoBü1-5	RoBü1-6	RoBü1-7	RoBü1-8
SiO ₂ (Gew%)	43,01	41,58	41,11	40,90	42,23	42,16	42,05	41,73	42,49	42,25	42,00	42,04	42,36
TiO ₂	2,91	3,02	3,01	3,06	2,39	2,38	2,42	2,40	2,56	2,43	2,35	2,41	2,40
Al ₂ O ₃	13,43	13,46	13,61	13,63	11,05	11,26	11,47	11,47	11,67	11,24	11,06	11,53	11,27
Fe ₂ O ₃	12,35	12,52	12,54	12,70	11,05	10,51	10,62	10,52	11,68	10,99	10,83	10,62	10,90
MnO	0,22	0,22	0,22	0,23	0,20	0,19	0,20	0,19	0,22	0,21	0,20	0,20	0,21
MgO	8,18	8,32	8,45	8,57	11,30	10,83	10,63	10,45	11,60	10,93	11,17	10,43	10,77
CaO	13,16	13,87	13,87	13,98	15,44	15,91	15,51	15,62	14,63	15,32	15,48	15,40	15,17
Na ₂ O	3,21	3,61	3,69	3,75	2,77	2,92	3,28	3,52	2,15	2,90	3,12	3,36	3,06
K ₂ O	2,62	2,48	2,53	2,22	2,46	2,96	2,90	3,20	1,90	2,54	2,66	3,07	2,74
P ₂ O ₅	0,87	0,91	0,93	0,93	1,04	0,81	0,84	0,85	1,01	1,10	1,04	0,85	1,04
Cr ₂ O ₃	0,02	0,02	0,02	0,02	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05
NiO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
Sum	100,01	100,02	99,99	100,00	100,00	100,00	100,01	100,01	100,00	100,00	100,01	99,99	100,00
LOI	1,19	1,21	0,91	1,06	0,94	0,86	0,57	0,16	2,08	1,34	1,02	0,60	1,20
Sc (ppm)	28	30	29	30	30	34	30	33	32	34	35	33	33
V	299	320	334	261	339	205	302	371	348	276	274	307	256
Cr	134	137	135	147	361	382	348	361	395	361	384	358	365
Co	38	42	39	44	42	44	44	39	44	43	44	39	41
Ni	76	73	68	73	178	172	165	166	193	178	178	164	175
Cu	64	61	69	61	95	74	110	108	100	96	92	140	92
Zn	98	101	97	104	80	80	82	80	84	86	85	85	85
Ga	19	19	18	19	15	15	15	16	16	16	16	17	16
Rb	88	80	80	89	78	105	107	106	96	101	90	115	99
Sr	1325	1390	1407	1365	656	1118	924	972	633	775	710	1076	836
Y	33	32	33	33	28	25	24	24	28	27	26	28	28
Zr	318	323	323	330	236	239	239	242	262	257	237	250	248
Nb	116	121	122	124	105	103	106	107	122	120	100	117	117
Ba	1236	1274	1316	1215	1424	1117	1189	1272	1301	1383	1064	1419	1325
Pb	2	9	8	8	8	13	3	11	5	8	6	10	9
Th	13	12	12	11	10	11	11	12	15	15	10	12	14
U	1	4	2	3	3	2	3	4	4	4	3	5	4
or (Gew%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ab	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
an	14,50	13,20	13,10	13,85	10,44	8,91	8,00	6,04	16,59	10,13	8,32	7,33	8,92
di	35,86	28,65	25,54	25,75	30,38	26,66	26,54	23,57	33,84	30,64	28,08	25,97	30,16
ol	13,01	15,90	17,29	17,56	19,70	19,54	19,33	19,93	19,58	18,87	20,08	19,17	18,67
mt	1,80	1,81	1,83	1,84	1,60	1,53	1,54	1,53	1,70	1,60	1,57	1,54	1,58
il	5,53	5,74	5,72	5,81	4,54	4,53	4,59	4,56	4,87	4,61	4,47	4,58	4,55
ap	1,90	1,99	2,03	2,03	2,27	1,78	1,84	1,86	2,21	2,41	2,27	1,86	2,27
ne	14,71	16,55	16,91	17,14	12,68	13,37	15,05	16,13	9,83	13,31	14,30	15,38	14,04
lc	12,14	11,49	11,72	10,29	11,42	13,70	13,44	14,82	8,81	11,76	12,35	14,24	12,70
cs	0,41	4,55	5,71	5,57	6,75	9,82	9,48	11,39	2,35	6,46	8,36	9,73	6,90
TOTAL	99,86	99,86	99,85	99,83	99,79	99,82	99,82	99,83	99,78	99,78	99,80	99,81	99,79

Tabellenanhang Tabelle 1: Haupt-, Spurenelemente und normativer Mineralbestand der Steinbruchproben, Haupt- und Spurenelemente der Laven zu Kap. 6

Probe:	Rother Kopf											RothK5	
	RoBü2-1	RoBü2-2	RoBü2-3	RoBü3-1	RoBü3-2	RoBü3-3	RoBü3-4	RothK0	RothK1	RothK2	RothK3		RothK4
SiO ₂ (Gew%)	42,24	42,04	42,35	42,24	42,21	42,39	42,14	40,58	40,57	40,04	40,53	39,56	39,21
TiO ₂	2,33	2,32	2,37	2,41	2,35	2,43	2,46	2,95	2,91	2,89	2,92	2,86	2,85
Al ₂ O ₃	10,99	11,22	11,15	11,42	11,04	11,44	11,60	11,21	11,08	11,06	11,00	10,87	10,90
Fe ₂ O ₃	10,64	10,56	10,80	10,76	10,57	10,77	10,98	12,75	12,63	12,56	12,65	12,45	12,38
MnO	0,20	0,20	0,20	0,20	0,19	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20
MgO	11,20	10,84	10,95	10,92	11,09	10,89	11,14	10,69	10,82	10,83	10,89	10,95	10,41
CaO	15,75	15,62	15,71	15,40	15,49	15,02	15,46	14,80	15,87	16,16	15,84	16,58	17,37
Na ₂ O	3,05	3,30	2,95	3,00	3,15	2,97	2,79	2,63	2,60	2,77	2,63	2,68	2,67
K ₂ O	2,54	2,89	2,47	2,70	2,95	2,92	2,23	3,40	2,56	2,72	2,60	3,10	3,28
P ₂ O ₅	0,96	0,93	0,95	0,88	0,88	0,89	0,91	0,70	0,68	0,68	0,67	0,67	0,67
Cr ₂ O ₃	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04
NiO	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Sum	100,00	100,02	99,99	100,01	99,99	100,00	99,99	99,99	100,01	100,00	100,00	99,99	100,00
LOI	0,90	0,71	1,20	0,84	0,30	0,83	1,49	0,72	0,91	0,84	1,01	1,64	2,46
Sc (ppm)	33	34	32	33	33	33	29	34	38	39	40	40	39
V	283	317	295	378	353	348	298	451	422	447	427	451	465
Cr	401	398	394	384	410	380	371	275	296	292	293	297	289
Co	45	41	43	41	46	46	42	48	54	50	49	48	48
Ni	173	166	174	179	182	177	179	132	131	131	139	128	131
Cu	90	100	110	101	83	102	93	157	160	214	150	148	146
Zn	83	83	83	83	81	80	87	85	89	84	89	83	87
Ga	16	16	17	15	16	15	16	15	18	16	18	17	17
Rb	97	96	79	93	95	107	64	101	111	143	103	83	103
Sr	803	823	863	704	743	707	772	499	618	673	614	695	679
Y	26	25	28	26	26	26	29	21	21	22	21	21	21
Zr	241	234	254	247	238	244	248	221	220	221	221	212	209
Nb	108	100	119	109	102	110	111	92	93	95	94	90	87
Ba	1142	1033	1219	1338	1105	1159	1257	1202	882	859	901	1081	1091
Pb	11	5	6	9	7	7	8	6	6	3	2	5	5
Th	11	12	15	13	11	11	12	7	4	7	5	5	7
U	5	1	3	4	1	3	3	<1,6	2	1	2	2	3
or (Gew%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ab	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
an	8,79	7,28	9,88	9,70	7,29	9,26	12,53	8,73	10,97	9,69	10,56	8,48	8,06
di	29,45	26,72	30,59	28,43	27,33	28,60	29,79	18,94	21,97	18,22	21,64	13,81	11,43
ol	19,47	19,69	18,73	19,36	19,89	19,22	19,47	23,95	23,02	24,30	23,28	25,98	25,79
mt	1,55	1,53	1,57	1,56	1,54	1,56	1,60	1,85	1,84	1,82	1,84	1,81	1,80
il	4,42	4,41	4,51	4,47	4,46	4,61	4,67	5,61	5,54	5,49	5,54	5,43	5,41
ap	2,10	2,04	2,07	1,91	1,92	1,95	1,99	1,52	1,49	1,49	1,47	1,46	1,47
ne	13,99	15,11	13,52	13,76	14,43	13,61	12,80	12,05	11,93	12,71	12,04	12,28	12,25
lc	11,77	13,41	11,47	12,51	13,66	13,53	10,32	15,78	11,88	12,62	12,03	14,38	15,18
cs	8,25	9,61	7,45	7,99	9,29	7,46	6,63	11,41	11,23	13,50	11,46	16,21	18,46
TOTAL	99,80	99,82	99,79	99,82	99,80	99,81	99,79	99,84	99,86	99,85	99,86	99,84	99,85

Tabellenanhang Tabelle 1: Haupt-, Spurenelemente und normativer Mineralbestand der Steinbruchproben, Haupt- und Spurenelemente der Laven zu Kap. 6

Probe:	Römerberg												
	RothK6	RothK7	RothK8	RothK9	RB0	RB1	RB2	RB3	RB4	RB5	RB6	RB7	RB8
SiO ₂ (Gew%)	39,52	40,14	40,27	40,14	38,47	38,70	38,61	38,31	38,44	38,56	38,43	38,70	38,61
TiO ₂	2,85	2,86	2,93	2,93	2,66	2,66	2,67	2,67	2,68	2,68	2,65	2,66	2,68
Al ₂ O ₃	10,88	10,94	11,00	11,11	11,12	11,15	11,18	11,07	11,06	11,05	11,02	11,08	11,19
Fe ₂ O ₃	12,34	12,39	12,74	12,67	11,62	11,49	11,51	11,61	11,62	11,51	11,50	11,58	11,52
MnO	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22
MgO	10,77	10,69	10,90	10,70	13,72	12,56	12,64	12,52	12,76	12,64	12,86	12,81	12,48
CaO	17,00	16,61	17,00	15,75	14,83	15,58	15,50	15,93	15,71	15,74	15,78	15,32	15,61
Na ₂ O	2,54	2,66	2,05	2,74	3,95	4,16	4,22	4,17	4,06	4,14	4,11	4,10	4,19
K ₂ O	3,15	2,78	2,13	2,98	1,93	2,00	1,99	2,01	1,98	1,97	1,95	2,03	2,00
P ₂ O ₅	0,68	0,66	0,70	0,68	1,40	1,41	1,39	1,40	1,39	1,38	1,39	1,38	1,40
Cr ₂ O ₃	0,05	0,04	0,05	0,05	0,07	0,07	0,06	0,06	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07
NiO	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Sum	99,99	99,99	99,99	99,99	100,00	100,02	100,01	99,99	100,01	99,99	100,01	99,99	99,99
LOI	1,76	0,80	1,35	0,72	1,33	1,10	0,73	1,08	1,90	1,18	1,16	1,32	1,08
Sc (ppm)	41	38	40	41	26	29	29	30	30	28	31	32	29
V	427	473	469	432	344	276	287	277	319	266	261	288	270
Cr	294	292	314	297	410	423	426	415	431	433	451	454	445
Co	49	48	49	50	46	45	45	49	48	51	46	48	48
Ni	128	130	137	135	221	225	230	222	220	228	235	238	224
Cu	154	151	150	130	75	73	76	69	75	71	68	65	65
Zn	83	83	89	87	94	93	95	97	94	96	94	96	96
Ga	16	16	16	17	16	15	15	15	15	16	16	17	17
Rb	89	99	83	102	55	55	54	55	55	54	55	56	55
Sr	729	814	851	596	1279	1327	1361	1502	1490	1506	1514	1422	1521
Y	21	22	22	22	33	36	33	35	32	34	34	33	36
Zr	212	217	220	222	266	269	274	269	266	270	266	274	278
Nb	90	93	94	95	152	153	157	156	151	160	150	151	166
Ba	958	1123	1035	954	1452	1388	1424	1429	1445	1416	1327	1362	1466
Pb	5	3	3	7	6	5	7	5	6	3	6	7	9
Th	6	7	6	5	15	18	17	16	17	17	16	17	17
U	3	2	0	0	10	6	4	8	6	7	7	6	7
or (Gew%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ab	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
an	9,00	9,74	14,50	9,19	6,90	5,84	5,67	5,54	6,08	5,75	5,86	5,85	5,84
di	13,36	18,47	22,10	18,00	12,05	13,91	13,32	11,88	12,52	13,32	12,42	13,67	13,48
ol	25,70	23,81	23,22	24,23	30,75	27,90	28,26	28,68	28,89	28,25	28,99	28,56	27,96
mt	1,79	1,80	1,85	1,84	1,69	1,67	1,67	1,69	1,69	1,67	1,67	1,68	1,67
il	5,41	5,43	5,57	5,57	5,05	5,06	5,07	5,07	5,08	5,10	5,03	5,05	5,09
ap	1,48	1,45	1,52	1,49	3,05	3,07	3,03	3,05	3,03	3,01	3,05	3,00	3,05
ne	11,63	12,17	9,40	12,57	18,13	19,07	19,34	19,11	18,63	19,00	18,85	18,78	19,18
lc	14,61	12,87	9,88	13,83	8,93	9,29	9,24	9,33	9,18	9,11	9,04	9,42	9,28
cs	16,86	14,11	11,79	13,11	13,19	13,93	14,14	15,37	14,64	14,50	14,84	13,70	14,18
TOTAL	99,85	99,85	99,84	99,84	99,73	99,74	99,74	99,72	99,74	99,72	99,73	99,72	99,72

Tabellenanhang Tabelle 1: Haupt-, Spurenelemente und normativer Mineralbestand der Steinbruchproben, Haupt- und Spurenelemente der Laven zu Kap. 6

Probe:	Mosenberg												
	RB9	RB10	RB11	Mos1-a	Mos1-b	Mos1-1	Mos1-2	Mos1-3	Mos1-4	Mos1-5	Mos1-6	Mos2-1	Mos3-1
SiO ₂ (Gew%)	38,38	38,64	38,45	40,70	40,91	41,48	40,64	40,62	40,52	40,61	40,66	41,26	40,55
TiO ₂	2,69	2,65	2,68	2,61	2,58	2,75	2,65	2,64	2,67	2,66	2,66	2,81	2,67
Al ₂ O ₃	11,16	11,02	11,04	11,21	11,32	12,36	11,40	11,37	11,50	11,51	11,49	12,51	11,37
Fe ₂ O ₃	11,53	11,46	11,73	11,85	11,83	11,79	11,73	11,77	11,75	11,72	11,77	11,93	11,75
MnO	0,21	0,21	0,22	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20
MgO	12,39	12,69	12,57	14,44	14,28	11,66	13,75	13,97	13,50	13,49	13,75	11,42	13,89
CaO	15,91	15,77	15,65	12,89	12,68	13,00	13,15	13,03	13,26	13,18	13,17	13,11	13,24
Na ₂ O	4,16	4,11	4,15	3,22	3,55	3,74	3,43	3,38	3,50	3,53	3,30	3,76	3,40
K ₂ O	2,08	1,99	2,03	1,87	1,67	2,04	2,03	2,02	2,06	2,07	1,99	2,03	1,88
P ₂ O ₅	1,39	1,37	1,39	0,87	0,86	0,88	0,89	0,89	0,92	0,91	0,89	0,89	0,91
Cr ₂ O ₃	0,06	0,07	0,07	0,09	0,10	0,07	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,06	0,09
NiO	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05
Sum	100,00	100,00	100,00	100,00	100,02	99,99	100,01	100,00	100,01	100,00	100,01	100,00	100,00
LOI	1,70	1,19	1,19	0,08	0,65	-0,10	-0,14	-0,07	-0,21	-0,19	0,17	-0,16	0,10
Sc (ppm)	29	30	31	29	27	28	29	29	29	29	27	28	30
V	321	272	281	276	269	283	282	275	284	285	284	288	284
Cr	407	445	489	617	637	447	614	614	614	592	609	410	628
Co	47	48	48	57	57	51	53	52	50	55	57	50	55
Ni	215	233	228	377	383	237	349	368	335	334	351	219	357
Cu	72	68	65	80	70	72	82	75	64	69	70	71	84
Zn	94	96	100	93	98	100	99	96	97	96	97	102	93
Ga	15	16	16	16	15	18	17	17	18	16	17	19	17
Rb	56	54	57	53	54	66	60	59	59	58	59	66	59
Sr	1519	1570	1491	974	1050	1093	1072	1045	1094	1089	1048	1096	1023
Y	33	35	33	28	29	31	29	30	30	31	29	32	29
Zr	272	301	275	230	228	255	243	243	246	244	236	256	242
Nb	162	158	158	109	109	119	114	115	116	116	115	115	114
Ba	1472	1422	1397	861	892	904	896	905	906	902	873	910	822
Pb	6	0	5	2	<2	4	6	5	4	5	2	4	11
Th	16	19	16	9	10	11	10	11	11	11	9	11	11
U	6	5	5	3	4	3	5	2	3	3	3	3	2
or (Gew%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ab	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
an	5,64	5,76	5,50	10,61	10,03	10,90	9,71	9,88	9,59	9,47	10,64	11,28	10,21
di	11,95	13,41	12,70	21,82	23,73	26,98	21,30	21,06	20,81	21,19	21,50	26,01	21,47
ol	28,30	28,29	28,62	28,93	28,00	21,95	27,73	28,24	27,43	27,27	27,67	21,95	27,91
mt	1,67	1,66	1,70	1,72	1,72	1,71	1,70	1,71	1,71	1,70	1,71	1,73	1,71
il	5,12	5,03	5,10	4,96	4,91	5,23	5,03	5,01	5,07	5,05	5,06	5,34	5,07
ap	3,04	2,98	3,03	1,89	1,89	1,92	1,93	1,93	2,00	1,98	1,94	1,94	1,98
ne	19,06	18,82	19,03	14,76	16,26	17,16	15,74	15,50	16,04	16,16	15,13	17,22	15,58
lc	9,66	9,23	9,39	8,68	7,73	9,44	9,41	9,36	9,56	9,60	9,24	9,42	8,73
cs	15,29	14,53	14,66	6,36	5,51	4,50	7,21	7,07	7,54	7,34	6,88	4,91	7,09
TOTAL	99,73	99,73	99,72	99,75	99,77	99,79	99,76	99,75	99,76	99,76	99,76	99,79	99,75

Tabellenanhang Tabelle 1: Haupt-, Spurenelemente und normativer Mineralbestand der Steinbruchproben, Haupt- und Spurenelemente der Laven zu Kap. 6

Probe:	Eichholz												
	Mos3-2	Mos3-3	EiHob	EiHom	EiHo1	EiHo2	EiHo3	EiHo4	EiHo5	EiHo8	EiHo9	EiHo10	EiHo11
SiO ₂ (Gew%)	42,76	40,60	42,08	41,60	42,38	42,77	42,60	42,22	42,09	41,10	42,25	42,10	42,31
TiO ₂	2,55	2,67	2,57	2,47	2,59	2,63	2,58	2,65	2,57	2,65	2,64	2,57	2,64
Al ₂ O ₃	13,61	11,47	11,45	11,62	11,76	11,77	11,84	12,02	11,64	11,21	11,89	11,67	11,98
Fe ₂ O ₃	12,90	11,82	11,55	11,11	11,62	10,75	11,59	11,84	11,51	11,96	11,77	11,46	11,81
MnO	0,19	0,19	0,21	0,21	0,21	0,18	0,21	0,22	0,21	0,22	0,22	0,21	0,21
MgO	11,34	13,80	10,27	9,60	10,14	10,42	10,21	10,35	10,08	10,47	10,36	10,00	10,45
CaO	11,69	13,20	16,00	15,51	15,42	14,74	15,74	15,84	15,85	16,34	15,82	15,95	15,94
Na ₂ O	3,26	3,26	2,65	3,78	2,93	2,56	2,61	2,47	2,91	3,00	2,63	2,88	2,33
K ₂ O	0,98	1,94	2,24	3,10	1,95	3,44	1,63	1,35	2,16	2,02	1,43	2,17	1,32
P ₂ O ₅	0,65	0,92	0,92	0,94	0,93	0,64	0,93	0,96	0,91	0,95	0,94	0,92	0,95
Cr ₂ O ₃	0,04	0,09	0,05	0,04	0,04	0,07	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05
NiO	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Sum	100,00	100,01	100,00	100,00	100,01	99,99	100,00	100,00	100,00	99,99	100,00	100,00	100,01
LOI	0,84	0,22	0,89	0,62	1,32	0,50	1,60	1,94	1,06	1,07	1,72	1,12	2,02
Sc (ppm)	31	32	33	30	32	34	33	33	34	36	31	36	35
V	266	285	399	352	394	406	397	394	390	401	401	394	410
Cr	290	625	281	237	287	451	293	283	291	302	294	283	291
Co	55	55	41	39	42	45	42	42	42	41	41	41	43
Ni	202	352	135	109	134	164	138	140	134	129	140	133	136
Cu	74	66	100	108	104	103	106	106	93	89	107	99	118
Zn	91	95	87	82	90	79	91	93	90	83	90	88	95
Ga	18	17	18	16	17	16	17	17	16	18	17	17	17
Rb	28	58	81	90	81	110	70	54	77	53	29	79	19
Sr	795	1039	1142	1282	830	898	906	699	1198	1013	933	1220	926
Y	26	28	27	27	29	21	28	31	29	30	29	27	29
Zr	174	242	299	288	304	223	304	309	300	306	306	300	305
Nb	66	117	132	122	133	98	135	137	130	131	133	129	133
Ba	472	907	1317	1288	1252	1182	1229	1399	1171	974	1216	1212	1337
Pb	3	4	15	12	10	9	12	9	9	8	9	11	11
Th	7	11	13	14	13	8	13	14	12	12	13	12	14
U	2	3	2	4	4	0	4	1	4	3	2	5	3
or (Gew%)	5,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ab	2,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
an	19,57	10,92	12,73	5,57	13,19	10,46	15,76	17,71	12,29	11,12	16,44	12,50	18,35
di	27,77	21,58	31,12	24,90	33,95	28,12	36,22	35,30	31,38	27,29	35,14	31,42	35,82
ol	22,63	27,77	17,98	18,57	16,80	18,25	16,09	16,89	17,49	20,07	16,90	17,29	16,84
mt	1,87	1,72	1,68	1,61	1,69	1,56	1,68	1,72	1,67	1,74	1,71	1,66	1,72
il	4,84	5,08	4,87	4,69	4,92	5,00	4,90	5,04	4,88	5,03	5,01	4,88	5,02
ap	1,43	2,01	2,01	2,04	2,03	1,40	2,02	2,09	1,99	2,08	2,05	2,01	2,07
ne	13,82	14,96	12,13	17,34	13,41	11,76	11,98	11,33	13,35	13,77	12,04	13,20	10,66
lc	0,00	8,97	10,39	14,37	9,05	15,92	7,54	6,27	10,03	9,37	6,60	10,07	6,10
cs	0,00	6,75	6,92	10,72	4,78	7,34	3,62	3,46	6,75	9,33	3,92	6,79	3,24
TOTAL	99,85	99,76	99,82	99,83	99,83	99,82	99,82	99,81	99,82	99,80	99,82	99,82	99,82

Tabellenanhang Tabelle 1: Haupt-, Spurenelemente und normativer Mineralbestand der Steinbruchproben, Haupt- und Spurenelemente der Laven zu Kap. 6

Probe:	Mühlensberg												
	EiHo12	EiHo13	MB1-0	MB1-1	MB1-2	MB1-3	MB1-4	MB1-5	MB1-6	MB1-7	MB1-8	MB1-9	MB2-1
SiO ₂ (Gew%)	42,53	42,04	41,03	40,48	40,09	40,07	40,04	40,03	40,10	40,03	40,50	40,08	41,05
TiO ₂	2,70	2,53	2,95	3,02	3,01	2,98	3,01	2,97	3,05	2,97	3,02	3,01	3,02
Al ₂ O ₃	12,14	11,63	11,26	11,40	11,41	11,24	11,46	11,33	11,48	11,26	11,56	11,45	11,36
Fe ₂ O ₃	12,05	11,33	12,33	12,44	12,41	12,32	12,45	12,41	12,47	12,43	12,35	12,46	12,59
MnO	0,23	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21	0,22
MgO	10,60	9,81	9,20	9,57	9,32	9,76	9,39	9,15	9,22	9,25	9,15	9,33	9,29
CaO	16,01	15,79	16,68	15,92	16,55	16,53	16,23	16,54	16,36	17,07	16,33	16,49	16,26
Na ₂ O	1,71	3,22	2,99	3,05	3,25	3,05	3,24	3,28	3,33	3,21	3,20	3,21	2,75
K ₂ O	1,03	2,45	2,50	3,06	2,90	3,03	3,12	3,26	2,92	2,73	2,84	2,90	2,64
P ₂ O ₅	0,98	0,93	0,81	0,80	0,82	0,79	0,82	0,82	0,83	0,81	0,82	0,82	0,81
Cr ₂ O ₃	0,05	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
NiO	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Sum	100,02	100,00	100,00	99,99	100,00	100,01	100,01	100,02	99,99	100,01	100,01	100,01	100,01
LOI	2,67	0,69	0,62	0,50	0,24	0,25	0,06	0,40	0,35	0,64	0,35	0,38	0,72
Sc (ppm)	34	33	39	40	40	41	37	42	39	38	36	39	42
V	433	398	434	417	440	421	408	431	442	428	452	440	434
Cr	299	276	95	144	128	144	120	97	125	100	122	126	106
Co	47	41	46	42	48	48	38	42	42	44	42	39	41
Ni	137	128	74	82	86	86	82	77	81	74	79	83	80
Cu	110	93	157	138	174	174	137	157	140	177	146	163	152
Zn	88	84	76	84	81	79	82	88	83	84	85	83	84
Ga	17	19	17	17	18	17	19	19	18	18	19	19	18
Rb	13	83	62	79	78	78	81	80	69	72	83	79	70
Sr	744	1251	767	685	870	820	922	857	921	889	928	873	673
Y	30	28	24	25	25	25	23	26	27	26	27	25	24
Zr	305	303	282	284	286	277	285	296	305	291	307	291	294
Nb	137	134	106	103	110	98	109	112	114	107	133	110	108
Ba	1245	1230	1059	1079	1071	1169	1122	1100	1166	982	1181	1084	925
Pb	6	9	9	1	11	7	6	9	9	9	6	9	6
Th	13	14	8	10	7	7	6	8	8	8	11	10	10
U	3	4	<1,6	3	3	2	2	2	3	1	2	3	2
or (Gew%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ab	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
an	22,42	10,03	9,92	8,38	7,98	8,04	7,51	6,60	7,80	8,25	8,80	8,25	10,84
di	38,21	30,04	26,57	20,91	19,55	18,42	18,28	17,81	19,79	19,95	22,12	19,43	26,26
ol	16,49	17,31	18,09	20,80	20,82	21,94	21,44	21,20	20,59	20,64	19,54	20,94	18,59
mt	1,75	1,65	1,79	1,81	1,80	1,79	1,81	1,80	1,81	1,81	1,79	1,81	1,83
il	5,12	4,81	5,60	5,74	5,72	5,66	5,72	5,63	5,78	5,63	5,73	5,72	5,74
ap	2,13	2,03	1,78	1,75	1,79	1,73	1,79	1,79	1,81	1,78	1,80	1,79	1,78
ne	7,83	14,76	13,71	13,99	14,90	13,97	14,85	15,02	15,24	14,70	14,66	14,73	12,61
lc	4,77	11,37	11,58	14,19	13,44	14,03	14,46	15,09	13,51	12,67	13,14	13,45	12,24
cs	1,11	7,83	10,82	12,29	13,87	14,28	14,00	14,93	13,52	14,45	12,30	13,74	10,01
TOTAL	99,83	99,82	99,87	99,86	99,86	99,88	99,87	99,89	99,86	99,88	99,88	99,88	99,88

Tabellenanhang Tabelle 1: Haupt-, Spurenelemente und normativer Mineralbestand der Steinbruchproben, Haupt- und Spurenelemente der Laven zu Kap. 6

Probe:	MB2-2	MB2-3	MB2-4	Goosberg								GoBeW1-1	GoBeW1-2	GoBeW1-3	GoBeW2	GoBeT1
SiO ₂ (Gew%)	40,05	40,15	40,80	GoBe0	GoBe1	GoBe2	GoBe3	GoBe4	GoBeW1-1	GoBeW1-2	GoBeW1-3	GoBeW2	GoBeT1			
TiO ₂	2,99	2,95	3,02	3,03	3,05	3,04	3,13	3,15	3,11	3,09	2,87	3,18	3,06			
Al ₂ O ₃	11,30	11,18	11,32	11,10	11,16	11,31	11,10	11,55	11,32	11,23	12,77	11,59	11,15			
Fe ₂ O ₃	12,45	12,32	12,55	11,72	11,79	11,70	11,67	11,62	11,64	11,69	11,94	11,58	11,81			
MnO	0,22	0,21	0,22	0,19	0,20	0,20	0,19	0,20	0,20	0,20	0,21	0,19	0,20			
MgO	9,22	9,33	9,30	10,49	10,41	10,13	10,66	9,99	10,12	10,25	8,70	10,01	10,41			
CaO	16,68	17,30	16,42	15,44	15,39	15,22	15,46	14,97	15,09	15,17	15,64	14,57	15,50			
Na ₂ O	3,25	3,17	2,93	2,76	2,70	3,15	2,64	2,35	3,00	2,93	3,76	2,67	2,42			
K ₂ O	3,00	2,57	2,60	2,93	2,96	3,37	3,34	3,25	3,41	3,39	2,80	3,63	2,80			
P ₂ O ₅	0,81	0,79	0,81	0,73	0,74	0,75	0,68	0,67	0,71	0,71	0,84	0,65	0,74			
Cr ₂ O ₃	0,02	0,02	0,02	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,02	0,05	0,05			
NiO	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02			
Sum	99,99	100,00	100,01	99,99	100,00	100,00	100,00	100,01	100,00	99,99	99,97	100,00	100,01			
LOI	0,44	0,96	0,99	0,78	0,89	0,08	1,41	1,08	0,25	0,22	0,80	0,19	1,46			
Sc (ppm)	38	39	39	34	36	35	37	37	34	36	34	35	33			
V	434	429	378	344	402	414	407	332	350	413	421	362	424			
Cr	101	107	106	344	375	346	342	312	348	347	351	359	331			
Co	42	41	46	47	47	41	45	46	45	49	47	49	46			
Ni	81	80	81	140	148	134	143	122	145	137	132	142	131			
Cu	190	169	162	110	122	140	139	96	104	61	60	112	101			
Zn	83	80	87	81	82	83	81	83	86	82	82	87	83			
Ga	17	18	18	17	16	18	15	17	16	18	17	17	16			
Rb	75	66	81	103	104	102	110	114	117	98	97	67	106			
Sr	761	870	770	871	852	982	641	870	909	950	945	869	932			
Y	26	25	26	23	24	25	23	23	22	23	24	24	23			
Zr	285	284	291	255	273	277	262	273	268	274	274	270	273			
Nb	107	103	109	99	104	113	96	105	106	110	112	105	111			
Ba	1066	1229	1081	1239	1121	1251	1171	1198	1055	1184	1187	1334	1248			
Pb	5	8	9	6	5	4	3	2	3	7	3	5	8			
Th	11	7	8	9	9	8	8	8	9	9	9	8	9			
U	2	3	2	4	2	2	3	3	3	2	1	2	4			
or (Gew%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
ab	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
an	7,39	8,68	10,02	9,28	9,59	6,75	8,56	11,35	7,34	7,51	9,69	8,90	11,31			
di	19,08	21,13	25,05	26,31	26,25	21,96	21,83	28,63	23,45	23,11	19,96	25,25	28,72			
ol	20,90	20,24	19,00	19,67	19,61	20,53	21,36	17,71	19,84	20,27	19,19	18,83	18,77			
mt	1,81	1,79	1,82	1,70	1,71	1,70	1,69	1,69	1,69	1,70	1,73	1,68	1,72			
il	5,67	5,61	5,73	5,75	5,80	5,78	5,94	5,98	5,90	5,86	5,45	6,04	5,81			
ap	1,77	1,73	1,78	1,60	1,61	1,64	1,48	1,45	1,55	1,55	1,83	1,42	1,62			
ne	14,89	14,51	13,45	12,63	12,38	14,45	12,12	10,78	13,77	13,41	17,24	12,25	11,10			
lc	13,89	11,92	12,06	13,56	13,73	15,63	15,48	15,06	15,78	15,69	12,98	16,82	12,96			
cs	14,45	14,25	10,97	9,32	9,16	11,40	11,39	7,20	10,52	10,71	11,75	8,67	7,85			
TOTAL	99,86	99,87	99,88	99,82	99,83	99,83	99,84	99,86	99,84	99,82	99,83	99,86	99,84			

Tabellenanhang Tabelle 1: Haupt-, Spurenelemente und normativer Mineralbestand der Steinbruchproben, Haupt- und Spurenelemente der Laven zu Kap. 6

	GoBeT2	GoBeT3	GoBeT4	Krufter Ofen	Steinrausch1	Steinrausch2	Nerother Kopf1	Nerother Kopf2	Üdersdorf1	Üdersdorf2
SiO2 (Gew%)	41,15	41,25	41,74	45,66	45,31	44,92	42,91	43,19	41,63	42,37
TiO2	3,09	3,07	3,09	2,42	2,42	2,42	2,53	2,43	2,39	2,53
Al2O3	11,32	11,32	11,33	16,43	14,62	14,55	11,91	12,06	11,12	11,36
Fe2O3	11,76	11,73	11,89	10,69	10,95	10,70	10,65	10,38	10,76	11,29
MnO	0,20	0,20	0,20	0,24	0,22	0,21	0,17	0,17	0,19	0,20
MgO	10,18	10,17	10,57	4,61	7,60	7,56	11,01	10,98	11,02	11,38
CaO	15,33	15,29	15,52	10,27	12,09	11,89	14,33	13,75	15,94	14,35
Na2O	2,85	2,85	2,47	4,79	3,32	3,47	2,70	3,02	3,19	2,70
K2O	3,31	3,31	2,37	4,07	2,85	3,65	3,10	3,31	2,89	2,96
P2O5	0,74	0,74	0,75	0,82	0,59	0,61	0,61	0,60	0,77	0,77
Cr2O3	0,05	0,05	0,06	0,00	0,02	0,02	0,05	0,05	0,07	0,07
NiO	0,02	0,02	0,02	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Sum	99,99	100,00	100,00	100,01	100,00	100,01	100,00	99,98	100,00	100,01
LOI	0,31	0,40	1,64	0,54	1,47	0,60	0,56	0,14	0,04	0,90
Sc (ppm)	36	34	38	16	28	25	33	32	38	33
V	403	414	412	255	276	290	340	357	382	412
Cr	333	148	296	19	149	143	342	339	419	442
Co	42	34	52	27	38	36	41	45	45	43
Ni	135	88	131	26	77	75	184	194	169	173
Cu	107	127	146	29	66	76	94	96	133	118
Zn	81	82	84	112	86	84	71	68	73	85
Ga	16	19	16	21	18	18	16	15	16	16
Rb	109	72	117	123	111	108	105	101	93	96
Sr	914	1141	651	1321	1151	1062	874	920	996	533
Y	23	27	23	36	28	28	22	21	23	24
Zr	266	284	259	415	274	271	207	202	220	230
Nb	104	119	100	148	122	119	95	96	105	106
Ba	1196	1087	1103	1170	1025	1023	1117	1141	1246	1192
Pb	5	9	4	3	9	7	6	5	9	7
Th	8	9	9	11	14	12	9	9	10	9
U	2	2	1	2	4	3	2	2	2	3
or	0,00	0,00	0,00							
ab	0,00	0,00	0,00							
an	8,33	8,31	12,86							
di	22,89	23,33	29,72							
ol	20,30	20,13	18,75							
mt	1,71	1,70	1,73							
il	5,86	5,83	5,86							
ap	1,62	1,62	1,64							
ne	13,05	13,06	11,31							
lc	15,33	15,34	10,96							
cs	10,73	10,51	7,00							
TOTAL	99,83	99,84	99,83							

Tabellenanhang Tabelle 1: Haupt-, Spurenelemente und normativer Mineralbestand der Steinbruchproben, Haupt- und Spurenelemente der Laven zu Kap. 6

	Mosenberg-W	Alftal	Rüderbüsch	Tiefenbach	Kellert	Feuerberg	Sassenberg	SE Kirchweiler
SiO2 (Gew%)	41,81	44,03	41,99	41,74	42,29	41,79	42,55	41,90
TiO2	2,71	2,77	2,56	2,76	2,80	3,00	2,59	2,96
Al2O3	12,22	12,90	10,91	11,62	11,89	11,86	11,83	11,78
Fe2O3	11,91	11,98	11,21	12,04	11,50	11,87	11,40	11,71
MnO	0,20	0,17	0,20	0,19	0,19	0,19	0,18	0,19
MgO	12,31	10,71	11,82	10,83	10,14	10,20	10,04	9,65
CaO	12,69	11,67	14,49	15,47	14,58	14,95	14,71	15,32
Na2O	3,43	3,29	2,96	2,33	2,47	2,21	2,62	2,63
K2O	1,78	1,57	3,06	2,17	3,48	3,27	3,34	3,21
P2O5	0,85	0,82	0,69	0,77	0,60	0,60	0,67	0,61
Cr2O3	0,06	0,06	0,08	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04
NiO	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Sum	100,01	100,00	100,00	100,01	100,00	99,99	100,01	100,01
LOI	0,64	-0,14	0,09	1,16	0,38	1,33	0,50	0,63
Sc (ppm)	28	28	33	31	35	38	35	34
V	274	254	372	392	440	414	380	369
Cr	446	357	536	334	286	270	314	275
Co	49	46	41	44	48	46	41	39
Ni	265	212	228	165	131	123	151	118
Cu	151	74	87	123	120	136	123	115
Zn	98	98	82	78	81	82	74	80
Ga	17	18	16	16	17	17	16	16
Rb	65	47	90	80	103	133	100	103
Sr	1026	918	958	881	737	641	831	806
Y	31	28	22	23	22	21	22	22
Zr	239	217	255	238	208	211	244	230
Nb	108	79	104	105	77	86	89	88
Ba	955	722	1114	1188	1068	1152	1190	1251
Pb	6	7	6	4	6	7	6	5
Th	9	8	8	6	6	5	6	6
U	3	2	<1,6	3	2	<1,6	1	2

Tabellenanhang Tabelle 2: Spurenelemente und Seltene Erden der Steinbruchproben und der Laven zu Kap. 6

		Element (ppm)										
		Rb	Ba	Th	Nb	Ta	Ce	Sr	Nd	Sm		
Steinbrüche	Proben											
Mayener Grubenfeld	M1	112,62	1090,13	11,72	103,60	5,33	142,66	990,00	52,46	8,22		
	M2	110,15	1169,01	12,38	109,00	5,64	144,52	1039,41	55,52	8,51		
	M3	116,93	1143,88	11,42	104,08	5,23	138,16	1048,34	52,28	7,93		
	M4	129,57	1114,58	14,60	114,35	5,51	149,00	1025,82	53,50	8,32		
Ettringer Lay	E1	125,63	1004,94	13,45	106,78	4,98	138,95	924,76	48,54	7,54		
	E1-a	101,51	1058,48	11,51	100,05	5,08	131,20	965,27	50,28	7,92		
Kottenheimer Winfeld	K1	91,61	1017,09	9,59	90,91	4,77	120,29	897,90	48,29	7,88		
	K2	97,86	1048,76	9,55	91,61	4,97	122,66	916,02	49,48	8,02		
Niedermendig Lava	Men1	90,23	1521,93	12,39	132,75	7,38	168,29	1403,34	63,38	9,63		
	Men2-1	97,89	1597,24	12,27	134,57	7,31	168,99	1432,62	62,80	9,40		
	Men2-2	93,40	1573,05	12,14	133,76	7,41	166,64	1423,85	62,79	9,49		
	Men2-3	96,74	1512,18	12,91	142,02	7,49	172,61	1432,23	63,04	9,60		
Hochsimmer Lava	Hs	103,28	841,75	14,36	207,30	9,19	283,25	1848,05	94,36	13,19		
	HL6	93,30	858,09	16,40	216,05	10,07	270,50	2045,56	95,69	13,53		
Hohe Buche	HB1-0	61,27	890,73	5,72	67,15	4,36	104,29	702,69	49,44	8,50		
	ML1-0	65,89	932,15	5,13	62,37	3,79	95,78	663,19	45,49	7,93		
Herchenberg	HerBe2	66,41	1232,23	8,26	130,44	6,94	154,86	937,45	68,27	11,05		
	Dietzenley	93,52	970,51	7,18	105,06	6,29	141,93	565,44	62,12	10,10		
Roßbüsch	Dil-b	79,82	880,55	7,21	101,55	6,38	135,67	826,20	59,34	9,97		
	Dil-m	59,11	1046,73	11,49	105,18	5,62	174,79	652,75	75,26	12,04		
Rother Kopf	RoBü1-0	77,27	1020,09	6,37	91,13	5,71	126,30	481,60	59,63	9,56		
	RothK0	39,04	1328,00	15,21	148,37	7,21	231,20	1246,20	88,20	13,94		
Römerberg	Mos1	41,78	765,20	9,87	106,26	5,76	144,75	922,04	60,26	9,85		
	Mos2	42,80	814,37	9,99	105,09	5,78	147,87	1017,74	60,17	10,01		
Eichholz	EiHo-b	64,50	1035,52	12,79	129,16	7,11	187,41	1101,73	78,22	12,10		
	EiHo-m	75,48	1080,50	12,26	124,44	6,66	192,27	1267,87	77,02	11,67		
Goosberg	GoobE0	81,17	1063,69	7,70	95,59	5,62	134,44	861,66	60,29	10,06		
	MüB0	47,48	852,55	8,61	102,54	6,40	148,00	750,15	67,94	11,37		
Lokationen zu Kap. 6												
Alftal/Sprink	AS	34,61	661,66	7,42	72,27	3,94	113,18	838,13	48,74	8,86		
	NK1	88,72	989,03	7,74	94,21	5,09	131,36	854,95	54,56	8,68		
Nerother Kopf	NK2	73,40	987,38	7,86	91,28	4,92	127,32	872,60	54,05	8,26		
	Üst	68,34	1049,91	10,19	99,76	5,66	150,78	942,49	63,63	9,93		
Üdersdorf	ÜH	75,06	995,99	9,36	101,86	5,77	153,20	522,34	65,88	10,07		
	MosWin	58,00	808,58	9,76	105,41	5,53	146,81	990,25	60,91	10,25		
Ruderbüsch	RuBü	71,75	980,19	8,41	101,76	5,81	139,67	897,26	58,48	9,25		
	TB	59,13	935,88	7,93	103,97	6,36	139,27	859,49	62,35	10,10		
Kellert	Kell	88,68	930,80	4,94	71,72	4,46	97,99	712,92	44,63	7,97		
	FeuBe	114,60	1009,19	5,51	83,76	5,10	110,10	634,60	49,73	8,07		
Sassenberg	SassBe	79,87	919,19	7,29	88,30	4,94	127,16	792,98	55,24	8,69		
	H650	78,15	921,30	6,72	87,78	5,31	116,04	768,36	52,04	8,75		
SE Kirchweiler	KO	100,06	1078,42	12,18	146,19	9,52	200,05	1244,60	81,62	13,04		
	StfV	96,59	922,60	11,76	122,71	6,77	168,26	1117,91	66,81	10,55		
Steinrausch	StfS	100,17	951,80	10,98	112,94	6,39	162,37	1057,33	65,35	10,30		

Tabellenanhang Tabelle 2: Spurenelemente und Seltene Erden der Steinbruchproben und der Laven zu Kap. 6

	Zr	Ti	Y	Yb	La	Pr	Eu	Gd	Tb	Dy
M1	329,09	15300,83	25,17	2,41	79,13	14,49	2,29	6,31	0,88	5,02
M2	373,10	15686,74	26,64	2,52	83,49	15,10	2,36	6,67	0,88	5,16
M3	323,18	14792,40	24,52	2,32	78,55	14,48	2,21	6,31	0,81	5,05
M4	399,11	15016,02	24,98	2,46	90,90	15,01	2,26	6,45	0,83	4,88
E1	370,41	13326,92	22,54	2,27	82,58	13,83	2,00	5,76	0,74	4,32
E1-a	335,07	14430,58	24,50	2,36	76,97	13,94	2,13	6,12	0,83	4,87
K1	285,51	14548,23	24,14	2,30	68,30	13,08	2,16	6,03	0,81	4,68
K2	299,43	15044,87	24,61	2,30	69,85	13,38	2,21	6,47	0,83	5,04
Men1	337,81	14041,89	27,37	2,43	95,82	17,70	2,69	7,28	0,95	5,54
Men2-1	329,17	13414,90	26,43	2,45	94,77	17,62	2,65	7,36	0,95	5,47
Men2-2	334,31	14115,49	27,07	2,34	95,69	17,49	2,67	7,22	0,95	5,46
Men2-3	353,57	13695,21	26,91	2,46	97,44	17,89	2,62	7,47	0,87	5,30
Hs	266,63	14089,93	32,64	2,88	152,61	27,66	3,57	9,53	1,17	6,59
HL6	289,87	13522,91	35,03	3,17	163,53	27,68	3,62	9,97	1,17	7,05
HB1-0	246,33	19865,51	21,14	1,77	53,71	12,42	2,33	6,27	0,76	4,65
ML1-0	218,55	19819,79	19,68	1,63	48,25	11,29	2,06	6,19	0,75	4,27
HerBe2	250,04	21208,06	25,40	2,18	83,20	17,99	2,85	8,15	1,11	5,74
Dil-b	260,26	17381,52	22,63	1,71	70,44	16,25	2,85	7,64	0,89	4,74
Dil-m	246,57	16368,61	20,86	1,62	67,25	15,33	2,67	7,35	0,85	4,70
RoBu1-0	230,17	16710,84	25,23	1,93	94,88	19,61	3,14	8,77	1,11	5,54
RothK0	208,58	19516,47	19,91	1,61	61,27	14,99	2,71	7,07	0,85	4,47
RB0	253,56	18298,99	29,97	2,19	127,50	24,16	3,81	10,31	1,24	6,76
Mos1	218,09	18221,00	25,62	2,18	80,00	15,66	3,05	8,36	0,99	5,50
Mos2	215,36	17688,65	25,64	1,86	81,43	15,83	3,05	8,31	0,98	5,91
EiHo-b	287,52	17390,77	25,95	1,99	99,47	20,65	3,10	8,66	1,03	5,78
EiHo-m	268,15	16727,42	24,71	2,00	99,27	20,53	3,06	8,42	0,96	5,24
GooBe0	248,98	21221,13	21,10	1,55	68,66	15,39	2,71	7,40	0,91	4,87
MB0	272,91	20917,32	23,35	1,91	74,61	17,12	3,00	8,04	0,99	5,19
AS	197,40	19369,58	24,25	1,82	62,11	12,55	2,62	7,77	1,00	5,39
NK1	191,16	17774,24	18,78	1,50	66,25	14,42	2,35	5,92	0,72	4,28
NK2	191,98	16603,47	18,82	1,46	66,27	14,26	2,31	6,35	0,76	4,09
Üst	213,41	16558,77	21,21	1,69	82,44	16,76	2,73	7,55	0,83	4,70
ÜH	223,09	17883,04	21,74	1,71	81,82	17,43	2,82	7,54	0,87	4,73
MosWin	221,91	18570,46	26,84	2,15	81,04	15,95	3,13	8,51	1,03	5,86
RuBü	239,55	17547,55	19,88	1,62	72,49	15,66	2,44	6,96	0,79	4,43
TB	236,09	19169,75	21,78	1,69	70,62	16,02	2,62	7,22	0,89	4,78
Kell	186,98	17789,06	18,43	1,54	46,67	11,32	2,20	5,82	0,71	4,09
FeuBe	199,10	18690,11	18,35	1,45	53,78	12,89	2,23	6,18	0,74	4,02
SassBe	231,12	16422,84	19,74	1,61	64,54	14,44	2,32	6,48	0,78	4,31
H650	219,00	16705,55	20,03	1,58	66,83	13,54	2,46	6,62	0,81	4,54
KO	404,89	16661,03	33,07	2,97	106,57	21,93	3,51	9,63	1,21	6,89
StrV	255,42	16624,65	25,77	2,24	89,89	18,12	2,82	7,82	0,95	5,62
StrS	251,24	16569,75	25,78	2,30	87,64	17,64	2,79	7,93	0,99	5,56

Tabellenanhang Tabelle 2: Spurenelemente und Seltene Erden der Steinbruchproben und der Laven zu Kap. 6

	Ho	Er	Tm	Lu
M1	0,95	2,58	0,36	0,37
M2	0,97	2,62	0,36	0,41
M3	0,91	2,48	0,34	0,32
M4	0,89	2,52	0,35	0,36
E1	0,81	2,29	0,31	0,35
E1-a	0,87	2,49	0,34	0,35
K1	0,91	2,45	0,33	0,32
K2	0,93	2,46	0,37	0,33
Men1	1,01	2,67	0,37	0,35
Men2-1	0,99	2,64	0,37	0,34
Men2-2	1,02	2,67	0,39	0,37
Men2-3	1,03	2,72	0,36	0,36
Hs	1,21	3,25	0,50	0,41
HL6	1,26	3,48		0,43
HB1-0	0,81	2,05	0,27	0,27
ML1-0	0,77	1,90	0,24	0,20
HerBe2	0,97	2,38		0,35
Dil-b	0,86	2,02	0,27	0,25
Dil-m	0,78	2,00	0,25	0,24
RoBü1-0	0,95	2,47	0,32	0,29
RothK0	0,80	1,98	0,24	0,23
RB0	1,14	2,82	0,38	0,31
Mos1	0,98	2,37	0,29	0,27
Mos2	1,02	2,48	0,31	0,28
EiHo-b	1,02	2,53	0,32	0,30
EiHo-m	0,96	2,31	0,30	0,29
GooBe0	0,80	2,01	0,27	0,26
MB0	0,90	2,20	0,25	0,25
AS	0,91	2,35	0,30	0,22
NK1	0,74	1,74	0,25	0,23
NK2	0,69	1,88	0,24	0,18
Üst	0,81	2,18	0,30	0,24
ÜH	0,84	2,02	0,29	0,23
MosWin	1,02	2,47	0,35	0,28
RuBü	0,78	1,88	0,26	0,21
TB	0,84	2,04	0,29	0,23
Kell	0,73	1,69	0,23	0,21
FeuBe	0,70	1,72	0,22	0,21
SassBe	0,74	1,90	0,24	0,23
H650	0,76	1,93	0,24	0,23
KO	1,26	3,32	0,43	0,42
StRv	0,98	2,57	0,34	0,32
StRs	1,03	2,55	0,34	0,34

Tabellenanhang Tabelle 3: Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung der Variablen

Mayener Grubenfeld

Tabellenwert bei Signifikanzniveau von 0,5 für N=13 Proben: **0,361**

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sc	V
N		13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,689	0,326	1,214	0,941	-0,736	0,711	0,968	0,662	0,621	-0,333	1,239	2,353
	Standardabweichung	0,002	0,010	0,005	0,008	0,011	0,013	0,006	0,022	0,016	0,009	0,033	0,029
Extremste Differenzen	Absolut	0,188	0,203	0,282	0,257	0,406	0,253	0,203	0,265	0,318	0,235	0,241	0,188
	Positiv	0,188	0,138	0,282	0,128	0,406	0,154	0,182	0,265	0,318	0,156	0,241	0,127
	Negativ	-0,107	-0,203	-0,174	-0,257	-0,267	-0,253	-0,203	-0,129	-0,153	-0,235	-0,228	-0,188
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,677	0,731	1,017	0,925	1,465	0,913	0,731	0,955	1,146	0,847	0,869	0,677
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,750	0,659	0,252	0,359	0,027	0,375	0,658	0,322	0,145	0,470	0,437	0,749
		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
N		13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,635	1,426	1,621	1,607	1,937	1,312	2,115	3,015	1,416	2,551	2,021	3,089
	Standardabweichung	0,082	0,033	0,041	0,035	0,015	0,016	0,026	0,010	0,019	0,020	0,013	0,019
Extremste Differenzen	Absolut	0,388	0,194	0,192	0,143	0,255	0,265	0,257	0,205	0,255	0,339	0,264	0,279
	Positiv	0,217	0,140	0,097	0,092	0,255	0,214	0,257	0,146	0,207	0,339	0,264	0,138
	Negativ	-0,388	-0,194	-0,192	-0,143	-0,129	-0,265	-0,206	-0,205	-0,255	-0,215	-0,197	-0,279
Kolmogorov-Smirnov-Z		1,398	0,701	0,692	0,517	0,920	0,956	0,928	0,738	0,918	1,223	0,953	1,007
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,040	0,710	0,725	0,952	0,366	0,320	0,355	0,647	0,368	0,100	0,323	0,262

Ettringer Lay

Tabellenwert bei Signifikanzniveau von 0,5 für N=14 Proben: **0,349**

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sc	V
N		14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,698	0,301	1,220	0,922	-0,742	0,682	0,941	0,677	0,629	-0,383	1,259	2,328
	Standardabweichung	0,008	0,028	0,007	0,018	0,001	0,037	0,028	0,021	0,019	0,025	0,040	0,039
Extremste Differenzen	Absolut	0,188	0,213	0,246	0,246	0,138	0,199	0,178	0,103	0,116	0,136	0,186	0,137
	Positiv	0,188	0,150	0,246	0,161	0,138	0,166	0,169	0,103	0,116	0,119	0,186	0,137
	Negativ	-0,170	-0,213	-0,212	-0,246	-0,134	-0,199	-0,178	-0,086	-0,099	-0,136	-0,138	-0,119
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,703	0,797	0,920	0,920	0,516	0,745	0,665	0,387	0,434	0,510	0,696	0,512
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,707	0,549	0,366	0,366	0,953	0,636	0,768	0,998	0,992	0,957	0,719	0,956
		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
N		14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,694	1,399	1,631	1,581	1,947	1,311	2,115	3,012	1,418	2,551	2,018	3,087
	Standardabweichung	0,086	0,052	0,054	0,049	0,010	0,016	0,030	0,008	0,015	0,021	0,010	0,016
Extremste Differenzen	Absolut	0,209	0,207	0,159	0,150	0,177	0,248	0,199	0,202	0,232	0,150	0,259	0,203
	Positiv	0,144	0,112	0,129	0,114	0,177	0,242	0,199	0,144	0,232	0,150	0,259	0,098
	Negativ	-0,209	-0,207	-0,159	-0,150	-0,165	-0,248	-0,122	-0,202	-0,196	-0,124	-0,241	-0,203
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,781	0,776	0,596	0,562	0,661	0,926	0,745	0,755	0,869	0,560	0,969	0,761
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,576	0,584	0,870	0,910	0,774	0,358	0,636	0,619	0,437	0,913	0,305	0,608

Kottenheimer Winfeld

Tabellenwert bei Signifikanzniveau von 0,5 für N=13 Proben: **0,361**

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sc	V
N		13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,698	0,319	1,210	0,939	-0,746	0,719	0,952	0,632	0,600	-0,372	1,274	2,341
	Standardabweichung	0,005	0,014	0,003	0,008	0,010	0,015	0,014	0,012	0,010	0,011	0,034	0,023
Extremste Differenzen	Absolut	0,128	0,152	0,129	0,117	0,468	0,183	0,180	0,196	0,113	0,180	0,251	0,160
	Positiv	0,095	0,152	0,098	0,117	0,284	0,183	0,180	0,149	0,113	0,180	0,210	0,146
	Negativ	-0,128	-0,111	-0,129	-0,088	-0,468	-0,106	-0,151	-0,196	-0,072	-0,126	-0,251	-0,160
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,462	0,549	0,465	0,421	1,686	0,659	0,648	0,705	0,408	0,648	0,905	0,578
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,983	0,924	0,982	0,994	0,007	0,778	0,794	0,702	0,996	0,795	0,385	0,892

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

Tabellenanhang Tabelle 3: Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung der Variablen

		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
N		13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,800	1,428	1,701	1,615	1,927	1,306	2,081	2,991	1,424	2,515	1,976	3,085
	Standardabweichung	0,031	0,029	0,027	0,027	0,008	0,018	0,017	0,008	0,011	0,007	0,009	0,009
Extremste Differenzen	Absolut	0,265	0,172	0,177	0,233	0,190	0,296	0,163	0,177	0,332	0,135	0,250	0,152
	Positiv	0,134	0,136	0,169	0,098	0,190	0,296	0,106	0,131	0,332	0,135	0,250	0,104
	Negativ	-0,265	-0,172	-0,177	-0,233	-0,121	-0,243	-0,163	-0,177	-0,223	-0,093	-0,118	-0,152
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,955	0,619	0,639	0,840	0,684	1,066	0,589	0,637	1,198	0,487	0,902	0,550
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,321	0,838	0,809	0,481	0,738	0,206	0,878	0,812	0,113	0,972	0,390	0,923

Niedermendig Lava

Tabellenwert bei Signifikanzniveau von 0,5 für N=14 Proben: **0,349**

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sc	V
N		14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,687	0,313	1,232	0,940	-0,712	0,649	0,954	0,684	0,646	-0,250	1,185	2,325
	Standardabweichung	0,002	0,009	0,004	0,008	0,002	0,019	0,008	0,015	0,013	0,011	0,056	0,030
Extremste Differenzen	Absolut	0,229	0,174	0,208	0,136	0,169	0,160	0,141	0,182	0,222	0,158	0,221	0,164
	Positiv	0,229	0,093	0,208	0,133	0,099	0,098	0,129	0,098	0,178	0,105	0,136	0,164
	Negativ	-0,113	-0,174	-0,110	-0,136	-0,169	-0,160	-0,141	-0,182	-0,222	-0,158	-0,221	-0,159
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,859	0,650	0,778	0,510	0,634	0,598	0,527	0,681	0,832	0,590	0,829	0,615
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,452	0,792	0,580	0,957	0,816	0,867	0,944	0,742	0,493	0,878	0,498	0,845

		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
N		14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,440	1,382	1,431	1,475	1,957	1,304	2,083	3,194	1,475	2,536	2,127	3,237
	Standardabweichung	0,127	0,045	0,051	0,040	0,016	0,012	0,011	0,016	0,024	0,009	0,015	0,020
Extremste Differenzen	Absolut	0,188	0,282	0,159	0,158	0,271	0,387	0,175	0,210	0,245	0,249	0,235	0,264
	Positiv	0,117	0,159	0,122	0,131	0,138	0,387	0,175	0,210	0,166	0,249	0,235	0,264
	Negativ	-0,188	-0,282	-0,159	-0,158	-0,271	-0,327	-0,109	-0,149	-0,245	-0,124	-0,102	-0,147
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,703	1,055	0,596	0,593	1,013	1,447	0,655	0,786	0,917	0,930	0,881	0,988
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,706	0,216	0,869	0,874	0,256	0,030	0,785	0,568	0,369	0,352	0,419	0,283

Hochsimmer Lava

Tabellenwert bei Signifikanzniveau von 0,5 für N=9 Proben: **0,432**

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sc	V
N		9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,652	0,310	1,218	1,018	-0,567	0,677	1,018	0,726	0,649	-0,108	1,087	2,488
	Standardabweichung	0,005	0,015	0,019	0,005	0,020	0,078	0,026	0,039	0,022	0,021	0,087	0,010
Extremste Differenzen	Absolut	0,249	0,263	0,347	0,270	0,297	0,415	0,216	0,291	0,183	0,335	0,365	0,203
	Positiv	0,170	0,263	0,250	0,270	0,169	0,415	0,216	0,148	0,133	0,171	0,365	0,120
	Negativ	-0,249	-0,179	-0,347	-0,165	-0,297	-0,268	-0,141	-0,291	-0,183	-0,335	-0,190	-0,203
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,748	0,788	1,042	0,810	0,890	1,246	0,647	0,873	0,548	1,006	1,095	0,608
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,631	0,564	0,227	0,528	0,407	0,090	0,797	0,432	0,925	0,263	0,181	0,853

		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
N		9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,596	1,406	1,474	1,613	2,049	1,310	2,037	3,312	1,572	2,469	2,314	2,979
	Standardabweichung	0,228	0,054	0,193	0,086	0,028	0,022	0,037	0,038	0,021	0,017	0,039	0,013
Extremste Differenzen	Absolut	0,368	0,234	0,365	0,316	0,283	0,267	0,134	0,391	0,320	0,360	0,386	0,137
	Positiv	0,368	0,130	0,365	0,316	0,226	0,177	0,134	0,236	0,174	0,264	0,261	0,137
	Negativ	-0,213	-0,234	-0,203	-0,212	-0,283	-0,267	-0,125	-0,391	-0,320	-0,360	-0,386	-0,118
Kolmogorov-Smirnov-Z		1,104	0,701	1,094	0,949	0,849	0,802	0,401	1,173	0,959	1,080	1,159	0,411
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,175	0,710	0,183	0,328	0,467	0,540	0,997	0,127	0,317	0,194	0,136	0,996

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

Tabellenanhang Tabelle 3: Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung der Variablen

Hohe Buche

Tabellenwert bei Signifikanzniveau von 0,5 für N=12 Proben: **0,375**

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sc	V
N		12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,632	0,474	1,133	1,075	-0,743	0,993	1,091	0,436	0,492	-0,257	1,525	2,516
	Standardabweichung	0,001	0,002	0,002	0,001	0,007	0,004	0,002	0,010	0,012	0,006	0,019	0,015
Extremste Differenzen	Absolut	0,122	0,202	0,243	0,103	0,376	0,161	0,102	0,189	0,225	0,181	0,142	0,253
	Positiv	0,121	0,110	0,170	0,093	0,376	0,161	0,102	0,189	0,112	0,166	0,129	0,160
	Negativ	-0,122	-0,202	-0,243	-0,103	-0,281	-0,135	-0,097	-0,109	-0,225	-0,181	-0,142	-0,253
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,423	0,700	0,840	0,358	1,303	0,558	0,355	0,655	0,779	0,628	0,490	0,878
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,994	0,712	0,480	1,000	0,067	0,914	1,000	0,784	0,579	0,825	0,970	0,424
		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
N		12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	2,287	1,676	2,055	1,841	1,906	1,255	1,933	2,890	1,384	2,428	1,857	3,013
	Standardabweichung	0,009	0,017	0,014	0,052	0,009	0,015	0,014	0,004	0,018	0,005	0,004	0,012
Extremste Differenzen	Absolut	0,133	0,167	0,160	0,305	0,284	0,339	0,143	0,239	0,322	0,179	0,252	0,166
	Positiv	0,092	0,120	0,099	0,167	0,216	0,327	0,143	0,106	0,261	0,142	0,248	0,161
	Negativ	-0,133	-0,167	-0,160	-0,305	-0,284	-0,339	-0,138	-0,239	-0,322	-0,179	-0,252	-0,166
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,461	0,579	0,553	1,056	0,983	1,176	0,495	0,829	1,116	0,620	0,873	0,574
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,983	0,891	0,919	0,215	0,288	0,126	0,967	0,498	0,165	0,836	0,432	0,897

Mauerley

Tabellenwert bei Signifikanzniveau von 0,5 für N=11 Proben: **0,391**

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sc	V
N		11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,636	0,466	1,133	1,068	-0,757	0,999	1,088	0,417	0,430	-0,260	1,500	2,513
	Standardabweichung	0,004	0,007	0,013	0,007	0,017	0,025	0,012	0,074	0,199	0,032	0,040	0,011
Extremste Differenzen	Absolut	0,380	0,227	0,200	0,133	0,265	0,239	0,192	0,226	0,473	0,226	0,225	0,210
	Positiv	0,380	0,169	0,119	0,079	0,265	0,173	0,192	0,226	0,311	0,226	0,178	0,210
	Negativ	-0,282	-0,227	-0,200	-0,133	-0,213	-0,239	-0,120	-0,138	-0,473	-0,140	-0,225	-0,198
Kolmogorov-Smirnov-Z		1,260	0,752	0,663	0,441	0,879	0,793	0,638	0,751	1,569	0,749	0,747	0,695
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,084	0,623	0,772	0,990	0,423	0,556	0,811	0,626	0,015	0,629	0,632	0,719
		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
N		11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	2,281	1,675	2,110	1,892	1,898	1,237	1,945	2,895	1,368	2,408	1,864	3,047
	Standardabweichung	0,087	0,032	0,062	0,059	0,014	0,016	0,029	0,027	0,021	0,032	0,028	0,019
Extremste Differenzen	Absolut	0,214	0,198	0,212	0,161	0,224	0,294	0,166	0,137	0,175	0,266	0,239	0,154
	Positiv	0,149	0,198	0,167	0,113	0,173	0,294	0,166	0,137	0,166	0,266	0,239	0,116
	Negativ	-0,214	-0,153	-0,212	-0,161	-0,224	-0,252	-0,126	-0,119	-0,175	-0,181	-0,140	-0,154
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,711	0,656	0,705	0,535	0,743	0,975	0,552	0,454	0,579	0,883	0,792	0,512
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,693	0,782	0,703	0,937	0,638	0,298	0,921	0,986	0,890	0,417	0,558	0,956

Herchenberg

Tabellenwert bei Signifikanzniveau von 0,5 für N=3 Proben: **0,708**

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sc	V
N		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,599	0,493	1,138	1,069	-0,658	0,953	1,168	0,566	0,537	-0,170	1,446	2,589
	Standardabweichung	0,000	0,002	0,001	0,001	0,011	0,003	0,000	0,007	0,004	0,004	0,031	0,005
Extremste Differenzen	Absolut	0,326	0,246	0,202	0,303	0,373	0,321	0,273	0,243	0,207	0,292	0,177	0,252
	Positiv	0,233	0,194	0,184	0,303	0,270	0,229	0,273	0,243	0,186	0,211	0,177	0,252
	Negativ	-0,326	-0,246	-0,202	-0,218	-0,373	-0,321	-0,201	-0,194	-0,207	-0,292	-0,176	-0,195
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,564	0,426	0,350	0,524	0,645	0,556	0,473	0,421	0,358	0,505	0,307	0,436
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,908	0,993	1,000	0,946	0,799	0,917	0,979	0,994	1,000	0,960	1,000	0,991

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

Tabellenanhang Tabelle 3: Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung der Variablen

		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
N		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	2,064	1,605	1,808	1,928	1,931	1,247	1,921	2,990	1,426	2,416	2,137	3,152
	Standardabweichung	0,011	0,023	0,010	0,011	0,026	0,028	0,003	0,014	0,009	0,006	0,014	0,006
Extremste Differenzen	Absolut	0,176	0,296	0,250	0,290	0,227	0,385	0,385	0,288	0,385	0,203	0,249	0,195
	Positiv	0,176	0,214	0,250	0,290	0,190	0,385	0,385	0,288	0,282	0,203	0,249	0,183
	Negativ	-0,174	-0,296	-0,195	-0,211	-0,227	-0,282	-0,282	-0,209	-0,385	-0,185	-0,195	-0,195
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,304	0,513	0,434	0,503	0,392	0,667	0,667	0,498	0,667	0,351	0,432	0,338
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		1,000	0,955	0,992	0,962	0,998	0,766	0,766	0,965	0,766	1,000	0,992	1,000

Dietzenley

Tabellenwert bei Signifikanzniveau von 0,5 für N=15 Proben: **0,338**

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sc	V
N		15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,611	0,468	1,067	1,080	-0,673	0,992	1,192	0,473	0,483	-0,092	1,538	2,645
	Standardabweichung	0,004	0,006	0,006	0,006	0,009	0,004	0,014	0,051	0,062	0,020	0,023	0,025
Extremste Differenzen	Absolut	0,182	0,173	0,208	0,229	0,395	0,120	0,239	0,227	0,206	0,175	0,194	0,156
	Positiv	0,182	0,173	0,208	0,229	0,395	0,120	0,169	0,192	0,146	0,175	0,157	0,100
	Negativ	-0,141	-0,143	-0,146	-0,189	-0,241	-0,114	-0,239	-0,227	-0,206	-0,090	-0,194	-0,156
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,705	0,668	0,806	0,886	1,528	0,466	0,926	0,878	0,799	0,676	0,752	0,606
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,702	0,763	0,535	0,412	0,019	0,982	0,358	0,423	0,546	0,751	0,625	0,857

		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
N		15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	2,477	1,635	2,099	2,114	1,941	1,242	2,001	2,928	1,384	2,433	2,016	3,063
	Standardabweichung	0,015	0,021	0,017	0,048	0,012	0,013	0,055	0,090	0,022	0,010	0,020	0,029
Extremste Differenzen	Absolut	0,131	0,182	0,177	0,138	0,162	0,350	0,099	0,175	0,202	0,182	0,096	0,151
	Positiv	0,084	0,182	0,132	0,084	0,162	0,350	0,080	0,104	0,202	0,182	0,096	0,085
	Negativ	-0,131	-0,109	-0,177	-0,138	-0,109	-0,316	-0,099	-0,175	-0,198	-0,114	-0,095	-0,151
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,506	0,703	0,685	0,536	0,629	1,357	0,383	0,676	0,784	0,705	0,372	0,583
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,960	0,706	0,736	0,936	0,823	0,050	0,999	0,751	0,570	0,703	0,999	0,886

Dietzenley Flemmingshöhe

Tabellenwert bei Signifikanzniveau von 0,5 für N=4 Proben: **0,624**

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sc	V
N		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,620	0,477	1,131	1,098	-0,648	0,923	1,137	0,551	0,390	-0,041	1,466	2,480
	Standardabweichung	0,010	0,009	0,003	0,005	0,009	0,009	0,012	0,030	0,031	0,013	0,014	0,047
Extremste Differenzen	Absolut	0,277	0,323	0,277	0,224	0,428	0,159	0,403	0,334	0,303	0,276	0,282	0,211
	Positiv	0,277	0,169	0,271	0,206	0,428	0,140	0,248	0,229	0,186	0,232	0,218	0,177
	Negativ	-0,213	-0,323	-0,277	-0,224	-0,300	-0,159	-0,403	-0,334	-0,303	-0,276	-0,282	-0,211
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,554	0,645	0,555	0,448	0,857	0,318	0,807	0,667	0,606	0,551	0,565	0,421
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,919	0,799	0,918	0,988	0,455	1,000	0,533	0,765	0,856	0,921	0,907	0,994

		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
N		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	2,140	1,609	1,860	1,804	2,000	1,273	1,925	3,137	1,515	2,510	2,082	3,100
	Standardabweichung	0,018	0,029	0,020	0,025	0,014	0,012	0,025	0,011	0,007	0,007	0,012	0,015
Extremste Differenzen	Absolut	0,329	0,235	0,316	0,269	0,236	0,441	0,306	0,197	0,441	0,288	0,283	0,205
	Positiv	0,329	0,235	0,184	0,269	0,236	0,309	0,306	0,163	0,309	0,288	0,172	0,205
	Negativ	-0,236	-0,182	-0,316	-0,231	-0,170	-0,441	-0,278	-0,197	-0,441	-0,212	-0,283	-0,152
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,657	0,469	0,632	0,538	0,471	0,883	0,612	0,394	0,883	0,576	0,566	0,411
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,781	0,980	0,820	0,934	0,979	0,417	0,848	0,998	0,417	0,894	0,905	0,996

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

Tabellenanhang Tabelle 3: Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung der Variablen

Roßbüsch

Tabellenwert bei Signifikanzniveau von 0,5 für N=16 Proben: **0,328**

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sc	V
N		16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,625	0,380	1,053	1,033	-0,695	1,039	1,188	0,477	0,427	-0,030	1,512	2,486
	Standardabweichung	0,002	0,010	0,008	0,011	0,019	0,012	0,009	0,048	0,057	0,040	0,022	0,068
Extremste Differenzen	Absolut	0,114	0,186	0,140	0,153	0,293	0,119	0,207	0,195	0,162	0,129	0,299	0,118
	Positiv	0,113	0,186	0,122	0,143	0,293	0,119	0,087	0,096	0,100	0,125	0,138	0,089
	Negativ	-0,114	-0,079	-0,140	-0,153	-0,254	-0,104	-0,207	-0,195	-0,162	-0,129	-0,299	-0,118
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,454	0,745	0,558	0,611	1,171	0,478	0,827	0,780	0,648	0,514	1,197	0,472
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,986	0,636	0,914	0,849	0,129	0,976	0,500	0,576	0,796	0,954	0,114	0,979
		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
N		16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	2,577	1,630	2,243	1,992	1,919	1,199	1,976	2,908	1,423	2,389	2,040	3,089
	Standardabweichung	0,021	0,022	0,018	0,061	0,012	0,018	0,064	0,072	0,026	0,014	0,029	0,044
Extremste Differenzen	Absolut	0,142	0,159	0,162	0,146	0,152	0,307	0,204	0,109	0,207	0,137	0,155	0,091
	Positiv	0,142	0,098	0,162	0,146	0,152	0,255	0,139	0,109	0,179	0,137	0,107	0,091
	Negativ	-0,119	-0,159	-0,117	-0,141	-0,141	-0,307	-0,204	-0,082	-0,207	-0,087	-0,155	-0,090
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,566	0,634	0,647	0,583	0,607	1,229	0,817	0,435	0,830	0,549	0,620	0,362
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,905	0,816	0,796	0,886	0,855	0,098	0,518	0,991	0,496	0,924	0,837	0,999

Rother Kopf

Tabellenwert bei Signifikanzniveau von 0,5 für N=10 Proben: **0,410**

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sc	V
N		10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,603	0,462	1,042	1,099	-0,680	1,032	1,212	0,413	0,454	-0,168	1,590	2,649
	Standardabweichung	0,005	0,006	0,004	0,005	0,009	0,006	0,021	0,037	0,061	0,007	0,024	0,018
Extremste Differenzen	Absolut	0,191	0,214	0,137	0,193	0,381	0,214	0,147	0,326	0,131	0,170	0,227	0,177
	Positiv	0,148	0,214	0,137	0,159	0,180	0,122	0,104	0,212	0,101	0,170	0,175	0,177
	Negativ	-0,191	-0,189	-0,115	-0,193	-0,381	-0,214	-0,147	-0,326	-0,131	-0,120	-0,227	-0,139
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,605	0,677	0,434	0,611	1,204	0,677	0,464	1,030	0,415	0,536	0,716	0,560
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,858	0,749	0,992	0,849	0,110	0,749	0,982	0,239	0,995	0,936	0,684	0,912
		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
N		10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	2,468	1,693	2,121	2,190	1,934	1,219	2,002	2,826	1,330	2,337	1,965	3,001
	Standardabweichung	0,014	0,016	0,012	0,055	0,013	0,025	0,069	0,068	0,010	0,010	0,012	0,049
Extremste Differenzen	Absolut	0,267	0,261	0,225	0,297	0,182	0,228	0,239	0,128	0,381	0,302	0,210	0,156
	Positiv	0,267	0,261	0,225	0,297	0,169	0,228	0,239	0,105	0,381	0,176	0,151	0,156
	Negativ	-0,226	-0,234	-0,123	-0,222	-0,182	-0,172	-0,162	-0,128	-0,277	-0,302	-0,210	-0,146
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,846	0,825	0,711	0,940	0,576	0,721	0,754	0,404	1,204	0,954	0,664	0,494
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,472	0,504	0,693	0,340	0,895	0,677	0,620	0,997	0,110	0,322	0,770	0,967

Römerberg

Tabellenwert bei Signifikanzniveau von 0,5 für N=12 Proben: **0,375**

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sc	V
N		12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,586	0,426	1,045	1,063	-0,665	1,104	1,193	0,616	0,300	0,143	1,469	2,459
	Standardabweichung	0,001	0,002	0,002	0,003	0,010	0,011	0,008	0,007	0,009	0,003	0,023	0,037
Extremste Differenzen	Absolut	0,156	0,119	0,169	0,222	0,303	0,250	0,208	0,184	0,121	0,206	0,219	0,242
	Positiv	0,156	0,119	0,169	0,222	0,303	0,250	0,150	0,115	0,110	0,168	0,119	0,242
	Negativ	-0,153	-0,090	-0,159	-0,103	-0,236	-0,162	-0,208	-0,184	-0,121	-0,206	-0,219	-0,137
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,540	0,413	0,584	0,769	1,049	0,864	0,721	0,639	0,420	0,713	0,758	0,838
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,932	0,996	0,885	0,595	0,221	0,444	0,677	0,809	0,995	0,689	0,614	0,484

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

Tabellenanhang Tabelle 3: Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung der Variablen

		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
N		12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	2,639	1,676	2,355	1,845	1,980	1,197	1,741	3,163	1,530	2,436	2,193	3,151
	Standardabweichung	0,022	0,016	0,013	0,025	0,008	0,021	0,007	0,028	0,017	0,015	0,014	0,013
Extremste Differenzen	Absolut	0,123	0,221	0,089	0,151	0,207	0,259	0,284	0,309	0,257	0,256	0,153	0,166
	Positiv	0,123	0,195	0,088	0,151	0,207	0,259	0,284	0,163	0,257	0,256	0,153	0,102
	Negativ	-0,097	-0,221	-0,089	-0,129	-0,141	-0,222	-0,216	-0,309	-0,160	-0,215	-0,104	-0,166
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,427	0,767	0,307	0,522	0,718	0,899	0,984	1,070	0,889	0,886	0,531	0,575
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,993	0,599	1,000	0,948	0,681	0,395	0,287	0,203	0,408	0,413	0,940	0,895

Eichholz

Tabellenwert bei Signifikanzniveau von 0,5 für N=13 Proben: **0,361**

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sc	V
N		13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,625	0,415	1,070	1,063	-0,671	1,009	1,198	0,432	0,282	-0,041	1,523	2,599
	Standardabweichung	0,004	0,010	0,009	0,014	0,025	0,012	0,011	0,081	0,151	0,046	0,023	0,020
Extremste Differenzen	Absolut	0,235	0,184	0,170	0,161	0,373	0,154	0,248	0,162	0,139	0,425	0,192	0,274
	Positiv	0,082	0,104	0,064	0,092	0,169	0,107	0,188	0,131	0,109	0,250	0,126	0,186
	Negativ	-0,235	-0,184	-0,170	-0,161	-0,373	-0,154	-0,248	-0,162	-0,139	-0,425	-0,192	-0,274
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,847	0,663	0,614	0,580	1,345	0,557	0,894	0,584	0,501	1,532	0,694	0,987
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,469	0,772	0,845	0,890	0,054	0,916	0,401	0,885	0,963	0,018	0,722	0,284

		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
N		13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	2,469	1,624	2,129	2,011	1,942	1,232	1,744	2,993	1,447	2,470	2,111	3,090
	Standardabweichung	0,061	0,020	0,038	0,034	0,023	0,022	0,284	0,087	0,042	0,037	0,038	0,038
Extremste Differenzen	Absolut	0,353	0,276	0,252	0,141	0,158	0,296	0,255	0,154	0,281	0,402	0,342	0,206
	Positiv	0,353	0,276	0,252	0,125	0,093	0,296	0,152	0,145	0,156	0,300	0,250	0,113
	Negativ	-0,246	-0,221	-0,212	-0,141	-0,158	-0,242	-0,255	-0,154	-0,281	-0,402	-0,342	-0,206
Kolmogorov-Smirnov-Z		1,272	0,995	0,910	0,509	0,571	1,068	0,918	0,556	1,013	1,451	1,234	0,741
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,079	0,275	0,380	0,958	0,900	0,204	0,368	0,916	0,256	0,030	0,095	0,642

Eichholz neu (ohne Probe EiHo2)

Tabellenwert bei Signifikanzniveau von 0,5 für N=12 Proben: **0,375**

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sc	V
N		12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,624	0,414	1,069	1,066	-0,664	1,008	1,200	0,434	0,261	-0,029	1,522	2,598
	Standardabweichung	0,004	0,010	0,010	0,010	0,011	0,012	0,007	0,084	0,136	0,009	0,024	0,020
Extremste Differenzen	Absolut	0,264	0,159	0,168	0,112	0,326	0,127	0,170	0,172	0,171	0,164	0,188	0,279
	Positiv	0,117	0,112	0,094	0,095	0,326	0,090	0,170	0,134	0,117	0,164	0,146	0,238
	Negativ	-0,264	-0,159	-0,168	-0,112	-0,208	-0,127	-0,156	-0,172	-0,171	-0,094	-0,188	-0,279
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,914	0,549	0,583	0,389	1,131	0,440	0,587	0,596	0,591	0,569	0,650	0,965
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,374	0,923	0,886	0,998	0,155	0,990	0,880	0,869	0,876	0,903	0,792	0,309

		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
N		12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	2,454	1,621	2,122	2,010	1,946	1,234	1,719	2,997	1,457	2,481	2,121	3,092
	Standardabweichung	0,027	0,019	0,029	0,035	0,019	0,021	0,281	0,090	0,020	0,008	0,014	0,039
Extremste Differenzen	Absolut	0,261	0,289	0,273	0,163	0,162	0,322	0,257	0,167	0,192	0,212	0,169	0,251
	Positiv	0,168	0,289	0,207	0,133	0,119	0,322	0,202	0,118	0,153	0,171	0,122	0,105
	Negativ	-0,261	-0,248	-0,273	-0,163	-0,162	-0,261	-0,257	-0,167	-0,192	-0,212	-0,169	-0,251
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,903	1,002	0,945	0,564	0,560	1,115	0,891	0,579	0,665	0,736	0,585	0,868
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,388	0,268	0,333	0,908	0,913	0,166	0,406	0,891	0,769	0,651	0,884	0,438

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

Tabellenanhang Tabelle 3: Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung der Variablen

Mühlenberg

Tabellenwert bei Signifikanzniveau von 0,5 für N=14 Proben: **0,349**

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sc	V
N		14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,606	0,477	1,055	1,094	-0,667	0,969	1,218	0,496	0,455	-0,090	1,593	2,631
	Standardabweichung	0,004	0,004	0,004	0,003	0,011	0,008	0,009	0,023	0,034	0,006	0,019	0,019
Extremste Differenzen	Absolut	0,315	0,241	0,099	0,149	0,303	0,254	0,182	0,225	0,151	0,230	0,185	0,228
	Positiv	0,315	0,138	0,099	0,149	0,303	0,254	0,182	0,127	0,122	0,144	0,185	0,149
	Negativ	-0,218	-0,241	-0,098	-0,114	-0,284	-0,149	-0,124	-0,225	-0,151	-0,230	-0,173	-0,228
Kolmogorov-Smirnov-Z		1,177	0,901	0,369	0,558	1,133	0,949	0,681	0,841	0,566	0,860	0,690	0,854
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,125	0,391	0,999	0,915	0,153	0,328	0,742	0,479	0,906	0,450	0,727	0,459
		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
N		14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	2,060	1,632	1,905	2,201	1,918	1,255	1,875	2,916	1,402	2,462	2,037	3,038
	Standardabweichung	0,061	0,031	0,020	0,044	0,017	0,019	0,038	0,046	0,020	0,013	0,030	0,032
Extremste Differenzen	Absolut	0,191	0,251	0,176	0,110	0,177	0,222	0,246	0,212	0,195	0,173	0,231	0,200
	Positiv	0,191	0,251	0,114	0,110	0,130	0,206	0,123	0,134	0,162	0,173	0,231	0,107
	Negativ	-0,126	-0,128	-0,176	-0,101	-0,177	-0,222	-0,246	-0,212	-0,195	-0,104	-0,136	-0,200
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,716	0,939	0,658	0,413	0,662	0,832	0,921	0,794	0,729	0,646	0,865	0,748
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,685	0,341	0,779	0,996	0,773	0,493	0,364	0,554	0,662	0,798	0,443	0,630

Goosberg

Tabellenwert bei Signifikanzniveau von 0,5 für N=13 Proben: **0,361**

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sc	V
N		13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,617	0,487	1,057	1,069	-0,700	1,006	1,184	0,446	0,495	-0,139	1,548	2,592
	Standardabweichung	0,005	0,011	0,016	0,004	0,013	0,022	0,008	0,054	0,051	0,028	0,018	0,037
Extremste Differenzen	Absolut	0,142	0,196	0,332	0,129	0,308	0,302	0,139	0,126	0,248	0,217	0,194	0,320
	Positiv	0,092	0,110	0,332	0,129	0,206	0,166	0,117	0,126	0,153	0,217	0,194	0,172
	Negativ	-0,142	-0,196	-0,236	-0,086	-0,308	-0,302	-0,139	-0,100	-0,248	-0,188	-0,146	-0,320
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,513	0,706	1,197	0,466	1,111	1,090	0,501	0,454	0,896	0,784	0,700	1,155
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,955	0,701	0,114	0,982	0,170	0,186	0,963	0,986	0,399	0,571	0,712	0,139
		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
N		13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	2,503	1,655	2,120	2,025	1,918	1,224	2,000	2,943	1,373	2,431	2,026	3,072
	Standardabweichung	0,103	0,046	0,057	0,122	0,010	0,028	0,075	0,067	0,022	0,013	0,026	0,028
Extremste Differenzen	Absolut	0,332	0,256	0,324	0,208	0,232	0,219	0,277	0,271	0,303	0,198	0,133	0,144
	Positiv	0,247	0,143	0,193	0,129	0,232	0,219	0,181	0,157	0,303	0,141	0,133	0,109
	Negativ	-0,332	-0,256	-0,324	-0,208	-0,158	-0,165	-0,277	-0,271	-0,236	-0,198	-0,127	-0,144
Kolmogorov-Smirnov-Z		1,199	0,922	1,169	0,751	0,836	0,791	1,000	0,978	1,091	0,715	0,481	0,519
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,113	0,364	0,130	0,626	0,487	0,559	0,270	0,294	0,185	0,685	0,975	0,950

Mosenberg

Tabellenwert bei Signifikanzniveau von 0,5 für N=12 Proben: **0,375**

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sc	V
N		12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,612	0,425	1,070	1,075	-0,715	1,122	1,113	0,537	0,267	-0,061	1,462	2,447
	Standardabweichung	0,007	0,011	0,025	0,011	0,011	0,038	0,015	0,022	0,090	0,040	0,022	0,011
Extremste Differenzen	Absolut	0,311	0,248	0,383	0,371	0,324	0,339	0,291	0,125	0,356	0,397	0,241	0,278
	Positiv	0,311	0,248	0,383	0,371	0,324	0,174	0,258	0,125	0,295	0,271	0,241	0,158
	Negativ	-0,256	-0,111	-0,212	-0,306	-0,234	-0,339	-0,291	-0,117	-0,356	-0,397	-0,176	-0,278
Kolmogorov-Smirnov-Z		1,078	0,861	1,327	1,286	1,124	1,174	1,006	0,432	1,234	1,376	0,834	0,963
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,196	0,449	0,059	0,073	0,160	0,127	0,263	0,992	0,095	0,045	0,490	0,312

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

Tabellenanhang Tabelle 3: Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung der Variablen

		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
N		12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	2,736	1,731	2,499	1,862	1,984	1,232	1,744	3,013	1,467	2,372	2,039	2,926
	Standardabweichung	0,106	0,021	0,098	0,036	0,014	0,028	0,098	0,039	0,024	0,044	0,070	0,080
Extremste Differenzen	Absolut	0,383	0,248	0,351	0,139	0,120	0,231	0,336	0,297	0,179	0,291	0,410	0,379
	Positiv	0,262	0,126	0,194	0,139	0,112	0,186	0,220	0,247	0,155	0,206	0,298	0,339
	Negativ	-0,383	-0,248	-0,351	-0,118	-0,120	-0,231	-0,336	-0,297	-0,179	-0,291	-0,410	-0,379
Kolmogorov-Smirnov-Z		1,326	0,858	1,217	0,480	0,415	0,801	1,162	1,029	0,619	1,007	1,421	1,313
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,059	0,453	0,103	0,975	0,995	0,543	0,134	0,240	0,839	0,263	0,035	0,064

Mosenberg neu

(ohne Proben Mos1-1, Mos2-1, Mos3-2)

Tabellenwert bei Signifikanzniveau von 0,5 für N=9 Proben: **0,432**

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sc	V
N		9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,609	0,423	1,057	1,071	-0,717	1,142	1,117	0,531	0,289	-0,049	1,462	2,448
	Standardabweichung	0,001	0,005	0,004	0,002	0,010	0,010	0,006	0,015	0,030	0,010	0,022	0,009
Extremste Differenzen	Absolut	0,234	0,218	0,182	0,184	0,352	0,155	0,287	0,141	0,198	0,190	0,287	0,288
	Positiv	0,234	0,181	0,138	0,184	0,352	0,155	0,191	0,126	0,178	0,165	0,269	0,215
	Negativ	-0,139	-0,218	-0,182	-0,146	-0,260	-0,124	-0,287	-0,141	-0,198	-0,190	-0,287	-0,288
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,702	0,654	0,546	0,553	1,056	0,466	0,862	0,422	0,595	0,571	0,861	0,864
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,708	0,786	0,927	0,920	0,214	0,982	0,447	0,994	0,871	0,900	0,449	0,444

		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
N		9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	2,790	1,736	2,551	1,863	1,982	1,221	1,761	3,020	1,466	2,379	2,056	2,947
	Standardabweichung	0,009	0,020	0,021	0,042	0,009	0,023	0,019	0,015	0,014	0,012	0,011	0,014
Extremste Differenzen	Absolut	0,199	0,245	0,146	0,223	0,170	0,321	0,338	0,184	0,252	0,329	0,297	0,269
	Positiv	0,153	0,164	0,146	0,223	0,151	0,234	0,182	0,141	0,252	0,154	0,175	0,222
	Negativ	-0,199	-0,245	-0,119	-0,158	-0,170	-0,321	-0,338	-0,184	-0,192	-0,329	-0,297	-0,269
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,596	0,735	0,438	0,668	0,511	0,964	1,014	0,553	0,757	0,986	0,892	0,806
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,870	0,652	0,991	0,763	0,956	0,310	0,255	0,920	0,616	0,286	0,404	0,535

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

Tabellenanhang Tabelle 4:Ergebnisse der Clusteranalyse/
a) Phonotephrite und Hochsimmer-Foidit

a) Cluster-Zugehörigkeit / Phonotephrite und Hochsimmer-Foidit

Fall	5 Cluster	4 Cluster	3 Cluster	2 Cluster	Fall	5 Cluster	4 Cluster	3 Cluster	2 Cluster
1:M1	1	1	1	1	41:Men1	3	3	2	1
2:M2	1	1	1	1	42:Men2-1	3	3	2	1
3:M3	1	1	1	1	43:Men2-2	3	3	2	1
4:M4	2	2	2	1	44:Men2-3	3	3	2	1
5:M5	1	1	1	1	45:Men3	3	3	2	1
6:M6	2	2	2	1	46:Men4	3	3	2	1
7:M7	1	1	1	1	47:Men5-1	3	3	2	1
8:M8	1	1	1	1	48:Men5-2	3	3	2	1
9:M9	1	1	1	1	49:Men6	3	3	2	1
10:M10	1	1	1	1	50:Men7	3	3	2	1
11:M11	1	1	1	1	51:Men8	3	3	2	1
12:M12	1	1	1	1	52:Men9	3	3	2	1
13:M13	1	1	1	1	53:Men10	3	3	2	1
14:E0	2	2	2	1	54:Men11	3	3	2	1
15:E1-0	1	1	1	1	55:Hs	4	4	3	2
16:E1-1	1	1	1	1	56:HL1	5	4	3	2
17:E2	1	1	1	1	57:HL2	5	4	3	2
18:E3	2	2	2	1	58:HL3	4	4	3	2
19:E4	1	1	1	1	59:HL4a	4	4	3	2
20:E5	1	1	1	1	60:HL4b	4	4	3	2
21:E6	2	2	2	1	61:HL5	4	4	3	2
22:E7	2	2	2	1	62:HL6	4	4	3	2
23:E8	2	2	2	1	63:HL7	4	4	3	2
24:E9	2	2	2	1					
25:E10	1	1	1	1					
26:E11	1	1	1	1					
27:E12	2	2	2	1					
28:K1	1	1	1	1					
29:K2	1	1	1	1					
30:K3	1	1	1	1					
31:K4	1	1	1	1					
32:K5	1	1	1	1					
33:K6	1	1	1	1					
34:K7	1	1	1	1					
35:K8	1	1	1	1					
36:K9	1	1	1	1					
37:K10	1	1	1	1					
38:K11	1	1	1	1					
39:K12	1	1	1	1					
40:K13	1	1	1	1					

Tabellenanhang Tabelle 4:Ergebnisse der Clusteranalyse/
a) Phonotephrite und Hochsimmer-Foidit

b) Cluster-Zugehörigkeit / Bellerberg Phonotephrite

Fall	4 Cluster	3 Cluster	2 Cluster
1:M1	1	1	1
2:M2	1	1	1
3:M3	1	1	1
4:M4	2	2	2
5:M5	1	1	1
6:M6	2	2	2
7:M7	1	1	1
8:M8	1	1	1
9:M9	1	1	1
10:M10	1	1	1
11:M11	1	1	1
12:M12	1	1	1
13:M13	1	1	1
14:E0	2	2	2
15:E1-0	1	1	1
16:E1-1	1	1	1
17:E2	1	1	1
18:E3	3	2	2
19:E4	1	1	1
20:E5	1	1	1
21:E6	3	2	2
22:E7	3	2	2
23:E8	3	2	2
24:E9	3	2	2
25:E10	1	1	1
26:E11	1	1	1
27:E12	3	2	2
28:K1	4	3	1
29:K2	4	3	1
30:K3	4	3	1
31:K4	4	3	1
32:K5	4	3	1
33:K6	4	3	1
34:K7	4	3	1
35:K8	4	3	1
36:K9	4	3	1
37:K10	4	3	1
38:K11	4	3	1
39:K12	4	3	1
40:K13	4	3	1

Tabellenanhang Tabelle 4:Ergebnisse der Clusteranalyse/
b) Melanephelinite

c) Cluster-Zugehörigkeit / Melanephelinite

Fall	13 Cluster	12 Cluster	11 Cluster	10 Cluster	9 Cluster	8 Cluster
1:HB1-0	1	1	1	1	1	1
2:HB1-1	1	1	1	1	1	1
3:HB2	1	1	1	1	1	1
4:HB3	1	1	1	1	1	1
5:HB4	1	1	1	1	1	1
6:HB5	1	1	1	1	1	1
7:HB6	1	1	1	1	1	1
8:HB7	1	1	1	1	1	1
9:HB8	1	1	1	1	1	1
10:HB9	1	1	1	1	1	1
11:HB10	1	1	1	1	1	1
12:HB11	1	1	1	1	1	1
13:ML1-0	1	1	1	1	1	1
14:ML1-1	1	1	1	1	1	1
15:ML2	1	1	1	1	1	1
16:ML3	1	1	1	1	1	1
17:ML5	1	1	1	1	1	1
18:ML6	1	1	1	1	1	1
19:ML9	1	1	1	1	1	1
20:ML10	1	1	1	1	1	1
21:ML11	1	1	1	1	1	1
22:ML12	1	1	1	1	1	1
23:MLneu	1	1	1	1	1	1
24:HerBe1	2	2	2	2	2	2
25:HerBe2	2	2	2	2	2	2
26:HerBe3	2	2	2	2	2	2
27:DiLb	3	3	3	3	3	3
28:DiLm	3	3	3	3	3	3
29:DiL1-1	3	3	3	3	3	3
30:DiL1-2	3	3	3	3	3	3
31:DiL1-3	3	3	3	3	3	3
32:DiL1-4	3	3	3	3	3	3
33:DiL1-5	3	3	3	3	3	3
34:DiL1-6	3	3	3	3	3	3
35:DiL1-7	3	3	3	3	3	3
36:DiL1-8	3	3	3	3	3	3
37:DiL1-9	3	3	3	3	3	3
38:DiL1-10	3	3	3	3	3	3
39:DiL2-1	3	3	3	3	3	3
40:DiL2-2	3	3	3	3	3	3
41:DiL2-3	3	3	3	3	3	3
42:DiL3-1	4	4	2	2	2	2
43:DiL3-2	4	4	2	2	2	2
44:DiL3-3	4	4	2	2	2	2
45:DiL3-4	4	4	2	2	2	2

Tabellenanhang Tabelle 4:Ergebnisse der Clusteranalyse/
b) Melanephelinite

46:RoBü1-0	5	5	4	4	4	4
47:RoBü1-1	5	5	4	4	4	4
48:RoBü1-2	5	5	4	4	4	4
49:RoBü1-3	5	5	4	4	4	4
50:RoBü1-4	5	5	4	4	4	4
51:RoBü1-5	5	5	4	4	4	4
52:RoBü1-6	5	5	4	4	4	4
53:RoBü1-7	5	5	4	4	4	4
54:RoBü1-8	5	5	4	4	4	4
55:RoBü2-1	5	5	4	4	4	4
56:RoBü2-2	5	5	4	4	4	4
57:RoBü2-3	5	5	4	4	4	4
58:RoBü3-1	5	5	4	4	4	4
59:RoBü3-2	5	5	4	4	4	4
60:RoBü3-3	5	5	4	4	4	4
61:RoBü3-4	5	5	4	4	4	4
62:RothK0	6	6	5	5	5	3
63:RothK1	6	6	5	5	5	3
64:RothK2	6	6	5	5	5	3
65:RothK3	6	6	5	5	5	3
66:RothK4	6	6	5	5	5	3
67:RothK5	6	6	5	5	5	3
68:RothK6	6	6	5	5	5	3
69:RothK7	6	6	5	5	5	3
70:RothK8	6	6	5	5	5	3
71:RothK9	6	6	5	5	5	3
72:RB0	7	7	6	6	6	5
73:RB1	7	7	6	6	6	5
74:RB2	7	7	6	6	6	5
75:RB3	7	7	6	6	6	5
76:RB4	7	7	6	6	6	5
77:RB5	7	7	6	6	6	5
78:RB6	7	7	6	6	6	5
79:RB7	7	7	6	6	6	5
80:RB8	7	7	6	6	6	5
81:RB9	7	7	6	6	6	5
82:RB10	7	7	6	6	6	5
83:RB11	7	7	6	6	6	5
84:Mos1-a	8	8	7	7	7	6
85:Mos1-b	8	8	7	7	7	6
86:Mos1-1	8	8	7	7	7	6
87:Mos1-2	8	8	7	7	7	6
88:Mos1-3	8	8	7	7	7	6
89:Mos1-4	8	8	7	7	7	6
90:Mos1-5	8	8	7	7	7	6
91:Mos1-6	8	8	7	7	7	6
92:Mos2-1	8	8	7	7	7	6
93:Mos3-1	8	8	7	7	7	6

Tabellenanhang Tabelle 4:Ergebnisse der Clusteranalyse/
b) Melanephelinite

94:Mos3-2	9	9	8	8	7	6
95:Mos3-3	8	8	7	7	7	6
96:EIHob	10	10	9	9	8	7
97:EIHom	10	10	9	9	8	7
98:EIHo1	10	10	9	9	8	7
99:EIHo2	5	5	4	4	4	4
100:EIHo3	10	10	9	9	8	7
101:EIHo4	10	10	9	9	8	7
102:EIHo5	10	10	9	9	8	7
103:EIHo8	10	10	9	9	8	7
104:EIHo9	11	11	10	9	8	7
105:EIHo10	10	10	9	9	8	7
106:EIHo11	11	11	10	9	8	7
107:EIHo12	11	11	10	9	8	7
108:EIHo13	10	10	9	9	8	7
109:MB1-0	12	12	11	10	9	8
110:MB1-1	12	12	11	10	9	8
111:MB1-2	12	12	11	10	9	8
112:MB1-3	12	12	11	10	9	8
113:MB1-4	12	12	11	10	9	8
114:MB1-5	12	12	11	10	9	8
115:MB1-6	12	12	11	10	9	8
116:MB1-7	12	12	11	10	9	8
117:MB1-8	12	12	11	10	9	8
118:MB1-9	12	12	11	10	9	8
119:MB2-1	12	12	11	10	9	8
120:MB2-2	12	12	11	10	9	8
121:MB2-3	12	12	11	10	9	8
122:MB2-4	12	12	11	10	9	8
123:GooBe0	13	3	3	3	3	3
124:GooBe1	13	3	3	3	3	3
125:GooBe2	3	3	3	3	3	3
126:GooBe3	13	3	3	3	3	3
127:GooBe4	13	3	3	3	3	3
128:GooBeW1-1	13	3	3	3	3	3
129:GooBeW1-2	13	3	3	3	3	3
130:GooBeW1-3	3	3	3	3	3	3
131:GooBeW2	13	3	3	3	3	3
132:GooBeT1	13	3	3	3	3	3
133:GooBeT2	3	3	3	3	3	3
134:GooBeT3	12	12	11	10	9	8
135:GooBeT4	13	3	3	3	3	3

Tabellenanhang Tabelle 5: Ergebnisse der Diskriminanzanalyse / a) Bellerberg-Phonotephrite

Allgemein: Bei jedem Schritt wird die Variable aufgenommen, die das gesamte Wilks-Lambda minimiert.
a. Maximale Anzahl der Schritte ist 42.
b. Minimaler partieller F-Wert für die Aufnahme ist 3.84
c. Maximaler partieller F-Wert für den Ausschluß ist 2.71.
d. F-Niveau, Toleranz oder VIN sind für eine weitere Berechnung unzureichend

a) Diskriminanzanalyse der Bellerberg Phonotephrite

Prüfung auf Gleichheit der Kovarianz-Matrizen

Textergebnisse

Box-M		80,162
F	Näherungswert	2,139
	df1	30
	df2	4293,353
	Signifikanz	,000

Testet die Null-Hypothese der Kovarianz-Matrizen gleicher Grundgesamtheit.

Log-Determinanten

Gruppe	Rang	Log-Determinante
1	5	-47,086
2	5	-45,535
3	5	-49,079
Gemeinsam innerhalb der Gruppen	5	-45,021

Die Ränge und natürlichen Logarithmen der ausgegebenen Determinanten sind die der Gruppen-Kovarianz-Matrizen.

Zusammenfassung der kanonischen Diskriminanzfunktionen

Eigenwerte (1)

Funktion	Eigenwert	% der Varianz	Kumulierte %	Kanonische Korrelation
1	8,974 ^a	71,7	71,7	,949
2	3,536 ^a	28,3	100,0	,883

a. Die ersten 2 kanonischen Diskriminanzfunktionen werden in dieser Analyse verwendet.

Wilks' Lambda (2)

Test der Funktion(en)	Wilks-Lambda	Chi-Quadrat	df	Signifikanz
1 bis 2	,022	133,418	10	,000
2	,220	52,920	4	,000

Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten (3)

	Funktion	
	1	2
P2O5	,446	1,276
Zn	,133	-,550
Rb	,874	1,181
Sr	1,109	,260
Nb	,334	-,877

Tabellenanhang Tabelle 5: Ergebnisse der Diskriminanzanalyse /
a) Bellerberg-Phonotephrite

Struktur-Matrix (4)

	Funktion	
	1	2
Nb	,643*	-,202
Sr	,427*	-,086
Rb	,212*	-,086
Ni ^a	-,202*	,070
K ₂ O ^a	,194*	-,099
Sc ^a	-,146*	,066
Cu ^a	,102*	,063
Y ^a	-,082*	,077
P ₂ O ₅	,232	,619*
SiO ₂ ^a	-,214	-,422*
TiO ₂ ^a	,082	,404*
MgO ^a	-,004	,393*
CaO ^a	,147	,385*
Fe ₂ O ₃ ^a	,038	,361*
Al ₂ O ₃ ^a	,115	-,338*
V ^a	-,255	,301*
Co ^a	,064	,299*
Zn	,171	-,286*
Zr ^a	,222	-,241*
Na ₂ O ^a	,004	-,215*
Ba ^a	,123	,178*

Gemeinsame Korrelationen innerhalb der Gruppen zwischen Diskriminanzvariablen und standardisierten kanonischen Diskriminanzfunktionen. Variablen sind nach ihrer absoluten Korrelationsgröße innerhalb der Funktion geordnet.

*. Größte absolute Korrelation zwischen jeder Variablen und einer Diskriminanzfunktion

a. Diese Variable wird in der Analyse nicht verwendet.

Kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten (5)

	Funktion	
	1	2
P ₂ O ₅	26,805	76,614
Zn	11,693	-48,259
Rb	34,574	46,697
Sr	128,220	30,021
Nb	31,154	-81,809
(Konstant)	-533,590	96,882

Nicht-standardisierte Koeffizienten

Funktionen bei den Gruppen-Zentroiden (6)

Gruppe	Funktion	
	1	2
1	2,827	1,909
2	1,114	-2,363
3	-4,026	,636

Nicht-standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionen, die bezüglich des Gruppen-Mittelwertes bewertet werden

Tabellenanhang Tabelle 5: Ergebnisse der Diskriminanzanalyse /
a) Bellerberg-Phonotephrite

Klassifizierungsstatistiken

A-priori-Wahrscheinlichkeiten der Gruppen (7)

Gruppe	A-priori	In der Analyse verwendete Fälle	
		Ungewichtet	Gewichtet
1	,333	13	13,000
2	,333	14	14,000
3	,333	13	13,000
Gesamt	1,000	40	40,000

Fallweise Statistiken (8)

Original	Fallnummer	Tatsächliche Gruppe	Höchste Gruppe					Zweithöchste Gruppe				Diskriminanzwerte	
			Vorhergesagte Gruppe	P(D>d G=g)		P(G=g D=d)	Quadrat Mahalanobis-Abstand	Gruppe	P(G=g D=d)	Quadrat Mahalanobis-Abstand	Funktion 1	Funktion 2	
				p	df								
1	1	1	,330	2	,998	2,214	2	,002	14,485	1,418	1,430		
2	1	1	,819	2	1,000	,398	2	,000	16,994	2,283	1,590		
3	1	1	,332	2	1,000	2,206	2	,000	32,717	4,213	2,444		
4	1	1	,029	2	1,000	7,098	2	,000	24,968	5,143	,592		
5	1	1	,396	2	,997	1,851	2	,003	13,166	3,205	,602		
6	1	1	,662	2	1,000	,825	2	,000	27,753	2,446	2,733		
7	1	1	,454	2	1,000	1,579	2	,000	33,719	2,895	3,164		
8	1	1	,987	2	1,000	,026	2	,000	19,902	2,706	1,804		
9	1	1	,609	2	,998	,992	2	,002	13,012	2,442	,990		
10	1	1	,264	2	1,000	2,663	2	,000	36,761	2,575	3,521		
11	1	1	,821	2	1,000	,395	2	,000	18,166	2,218	1,753		
12	1	1	,821	2	1,000	,394	2	,000	25,334	2,536	2,465		
13	1	1	,972	2	1,000	,057	2	,000	19,151	2,673	1,726		
14	2	2	,891	2	1,000	,231	1	,000	17,304	1,116	-1,883		
15	2	2	,134	2	,799	4,022	1	,201	6,788	1,734	-,456		
16	2	2	,216	2	,942	3,067	1	,058	8,638	1,341	-,627		
17	2	2	,955	2	1,000	,091	1	,000	19,957	,920	-2,131		
18	2	2	,717	2	1,000	,665	1	,000	29,051	,609	-3,003		
19	2	2	,531	2	1,000	1,266	3	,000	30,897	,182	-2,995		
20	2	2	,923	2	1,000	,160	1	,000	24,701	,825	-2,640		
21	2	2	,390	2	1,000	1,886	3	,000	34,678	,240	-3,423		
22	2	2	,506	2	1,000	1,364	1	,000	33,297	,647	-3,434		
23	2	2	,782	2	1,000	,491	1	,000	27,175	1,231	-3,054		
24	2	2	,316	2	1,000	2,304	1	,000	22,772	2,550	-2,855		
25	2	2	,816	2	1,000	,408	1	,000	21,608	,521	-2,127		
26	2	2	,170	2	,895	3,539	1	,105	7,827	1,415	-,506		
27	2	2	,146	2	1,000	3,844	1	,000	34,678	2,261	-3,953		
28	3	3	,211	2	1,000	3,114	1	,000	30,255	-2,672	1,767		
29	3	3	,253	2	1,000	2,753	2	,000	25,574	-2,468	1,206		
30	3	3	,238	2	1,000	2,870	2	,000	46,511	-5,403	-,352		
31	3	3	,263	2	1,000	2,674	1	,000	49,328	-4,187	2,263		
32	3	3	,598	2	1,000	1,028	2	,000	24,399	-3,181	,078		
33	3	3	,775	2	1,000	,509	2	,000	44,008	-4,502	1,168		
34	3	3	,448	2	1,000	1,604	2	,000	45,071	-5,150	,052		
35	3	3	,213	2	1,000	3,093	2	,000	18,763	-2,299	,304		

Tabellenanhang Tabelle 5: Ergebnisse der Diskriminanzanalyse /
a) Bellerberg-Phonotephrite

	36	3	3	,233	2	,999	2,913	2	,001	18,066	-2,495	-,118
	37	3	3	,330	2	1,000	2,218	2	,000	55,061	-5,429	1,138
	38	3	3	,119	2	1,000	4,256	2	,000	64,014	-5,930	1,432
	39	3	3	,860	2	1,000	,302	2	,000	30,615	-3,829	,123
	40	3	3	,268	2	1,000	2,632	2	,000	37,431	-4,799	-,790
Kreuzvalidiert ^a	1	1	1	,742	5	,997	2,730	2	,003	14,263		
	2	1	1	,966	5	1,000	,951	2	,000	17,002		
	3	1	1	,401	5	1,000	5,122	2	,000	35,943		
	4	1	1	,000	5	,998	23,115	2	,002	35,294		
	5	1	1	,307	5	,991	5,991	2	,009	15,439		
	6	1	1	,001	5	1,000	21,956	2	,000	48,419		
	7	1	1	,322	5	1,000	5,846	2	,000	38,833		
	8	1	1	,742	5	1,000	2,730	2	,000	21,589		
	9	1	1	,477	5	,995	4,523	2	,005	15,183		
	10	1	1	,406	5	1,000	5,082	2	,000	40,486		
	11	1	1	,724	5	1,000	2,844	2	,000	19,561		
	12	1	1	,869	5	1,000	1,850	2	,000	26,121		
	13	1	1	,699	5	1,000	3,007	2	,000	21,016		
	14	2	2	,000	5	,996	24,094	1	,004	35,094		
	15	2	1**	,058	5	,673	10,707	2	,327	12,152		
	16	2	2	,132	5	,820	8,482	1	,180	11,514		
	17	2	2	,969	5	1,000	,915	1	,000	20,100		
	18	2	2	,288	5	1,000	6,190	1	,000	34,500		
	19	2	2	,438	5	1,000	4,824	3	,000	32,556		
	20	2	2	,250	5	1,000	6,626	1	,000	30,242		
	21	2	2	,421	5	1,000	4,960	3	,000	35,910		
	22	2	2	,154	5	1,000	8,037	1	,000	41,155		
	23	2	2	,954	5	1,000	1,101	1	,000	27,286		
	24	2	2	,002	5	1,000	19,572	1	,000	36,443		
	25	2	2	,711	5	1,000	2,928	1	,000	23,153		
	26	2	2	,091	5	,664	9,488	1	,336	10,846		
	27	2	2	,227	5	1,000	6,915	1	,000	38,414		
	28	3	3	,542	5	1,000	4,052	2	,000	30,640		
	29	3	3	,466	5	1,000	4,604	2	,000	25,944		
	30	3	3	,333	5	1,000	5,734	2	,000	49,076		
	31	3	3	,604	5	1,000	3,630	1	,000	48,340		
	32	3	3	,655	5	1,000	3,290	2	,000	25,675		
	33	3	3	,972	5	1,000	,870	2	,000	43,716		
	34	3	3	,623	5	1,000	3,500	2	,000	46,480		
	35	3	3	,279	5	,999	6,289	2	,001	20,732		
	36	3	3	,110	5	,998	8,967	2	,002	21,448		
	37	3	3	,334	5	1,000	5,726	2	,000	61,263		
	38	3	3	,063	5	1,000	10,474	2	,000	78,780		
	39	3	3	,773	5	1,000	2,522	2	,000	31,519		
	40	3	3	,345	5	1,000	5,619	2	,000	38,562		

Tabellenanhang Tabelle 5: Ergebnisse der Diskriminanzanalyse /
a) Bellerberg-Phonotephrite

Für die Originaldaten basiert der quadrierte Mahalanobis-Abstand auf den kanonischen Funktionen.

Für die kreuzvalidierten Daten basiert der quadrierte Mahalanobis-Abstand auf den Beobachtungen.

a. Die Kreuzvalidierung wird nur für Fälle in dieser Analyse vorgenommen. In der Kreuzvalidierung ist jeder Fall durch die Funktionen klassifiziert, die von allen anderen Fällen außer diesem Fall abgeleitet werden.

** . Falsch klassifizierter Fall

Klassifizierungsergebnisse^{b,c} (9)

		Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit				
		1	2	3	Gesamt	
Original	Anzahl	1	13	0	0	13
		2	0	14	0	14
		3	0	0	13	13
	%	1	100,0	,0	,0	100,0
		2	,0	100,0	,0	100,0
		3	,0	,0	100,0	100,0
Kreuzvalidiert ^a	Anzahl	1	13	0	0	13
		2	1	13	0	14
		3	0	0	13	13
	%	1	100,0	,0	,0	100,0
		2	7,1	92,9	,0	100,0
		3	,0	,0	100,0	100,0

a. Die Kreuzvalidierung wird nur für Fälle in dieser Analyse vorgenommen. In der Kreuzvalidierung ist jeder Fall durch die Funktionen klassifiziert, die von allen anderen Fällen außer diesem Fall abgeleitet werden.

b. 100,0% der ursprünglich gruppierten Fälle wurden korrekt klassifiziert.

c. 97,5% der kreuzvalidierten gruppierten Fälle wurden korrekt klassifiziert.

Tabellenanhang Tabelle 5: Ergebnisse der Diskriminanzanalyse /
b) Melanephelinite

b) Diskriminanzanalyse der Melanephelinite

Zusammenfassung der kanonischen Diskriminanzfunktionen

Eigenwerte (1)

Funktion	Eigenwert	% der Varianz	Kumulierte %	Kanonische Korrelation
1	127,208 ^a	43,3	43,3	,996
2	84,393 ^a	28,8	72,1	,994
3	29,139 ^a	9,9	82,0	,983
4	20,741 ^a	7,1	89,1	,977
5	12,666 ^a	4,3	93,4	,963
6	9,822 ^a	3,3	96,7	,953
7	6,231 ^a	2,1	98,9	,928
8	2,174 ^a	,7	99,6	,828
9	,722 ^a	,2	99,9	,647
10	,420 ^a	,1	100,0	,544

a. Die ersten 10 kanonischen Diskriminanzfunktionen werden in dieser Analyse verwendet.

Wilks' Lambda (2)

Test der Funktion(en)	Wilks-Lambda	Chi-Quadrat	df	Signifikanz
1 bis 10	,000	2642,219	140	,000
2 bis 10	,000	2125,305	117	,000
3 bis 10	,000	1651,671	96	,000
4 bis 10	,000	1288,951	77	,000
5 bis 10	,000	961,015	60	,000
6 bis 10	,002	682,530	45	,000
7 bis 10	,018	428,890	32	,000
8 bis 10	,129	218,195	21	,000
9 bis 10	,409	95,185	12	,000
10	,704	37,321	5	,000

Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten (3)

	Funktion									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO2	-,076	,134	-,146	,406	,439	-,337	-,042	-,018	-,797	,449
TiO2	-,177	-,141	,895	1,004	-1,395	-,102	-,265	-,287	-,155	,195
Al2O3	1,468	,826	-,458	-,401	-,335	-,373	,217	,132	,732	,600
Fe2O3	-,427	-1,455	,290	-,839	1,629	,207	,297	,314	-,299	,204
MgO	1,840	1,146	-1,190	-,789	-,212	,269	,487	,534	,458	-,671
CaO	-,493	-,074	-,480	,261	-,063	-,149	-,287	,311	,089	,311
P2O5	-,072	,854	,446	,767	-,555	,173	-,237	-1,047	,099	,184
Cr	-,616	,156	,350	,558	,867	-,641	1,179	,114	,328	-,283
Ni	-,032	-,030	,958	,497	-,696	,655	-1,571	,125	-,194	,905
Cu	-,260	-,053	,072	-,053	,250	,009	-,080	-,068	,524	,583
Zn	-,128	,085	,262	-,453	,270	,196	,361	-,343	-,002	-,211
Sr	,531	-,182	,749	-,088	,292	,429	,259	-,181	-,462	,480
Zr	,832	-,111	-,826	1,052	,393	1,017	,176	,588	,608	-,450
Nb	-1,138	,446	-,232	-,956	-,542	-,386	,242	,581	-,394	,215

Tabellenanhang **Tabelle 5: Ergebnisse der Diskriminanzanalyse /**
b) Melanephelinite

Struktur-Matrix (4)

	Funktion									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CaO	-,391*	-,055	-,231	,010	,030	-,006	-,124	,038	,186	-,023
Sc ^a	-,254*	-,074	,142	,235	,122	-,206	-,123	,174	,196	-,234
Cr	-,086	,383	,535*	,162	,319	-,251	-,020	,485	,210	-,271
Ni	,019	,386	,525*	-,007	,268	,041	-,437	,508	,075	-,122
TiO2	,061	-,436	,208	,109	-,439*	,064	,332	,201	-,013	,092
Ba ^a	,007	,126	,048	-,083	-,280*	,030	,103	-,008	-,024	,273
Zr	,004	-,061	-,285	,249	-,129	,579*	,507	,053	-,050	,348
P2O5	-,231	,248	-,094	-,021	,029	,504*	,161	-,454	,042	,100
Fe2O3	-,031	-,270	,144	-,172	,064	,327*	,186	,075	,041	,108
Nb	-,251	,186	-,125	-,127	-,280	,451	,504*	,207	-,183	,383
Zn	-,045	,074	,161	-,141	,041	,328	,392*	-,161	-,034	,160
Y ^a	-,076	-,059	-,147	,054	,033	,311	,341*	,047	,075	,257
Sr	,002	,047	,009	-,011	-,077	,218	,258*	-,059	-,209	,200
Na2O ^a	,079	,020	,063	-,220	-,236	,029	,067	-,367*	,100	-,114
Co ^a	,069	,147	,078	-,073	,107	-,146	-,163	,247*	,013	-,065
Rb ^a	-,061	-,024	-,018	,026	-,055	,041	-,010	-,200*	-,142	-,101
SiO2	,173	,090	-,157	,256	,203	-,148	,012	,067	-,579*	,337
Cu	-,153	-,105	-,051	-,006	,055	-,016	-,285	,035	,445*	,329
V ^a	-,132	-,093	-,078	-,022	,006	-,103	-,066	,219	,277*	,093
Al2O3	,286	-,074	-,112	-,034	-,138	-,075	,489	-,148	,109	,593*
MgO	-,004	,207	,312	-,134	,130	,044	-,361	,436	,051	-,441*

Gemeinsame Korrelationen innerhalb der Gruppen zwischen Diskriminanzvariablen und standardisierten kanonischen Diskriminanzfunktionen Variablen sind nach ihrer absoluten Korrelationsgröße innerhalb der Funktion geordnet.

*. Größte absolute Korrelation zwischen jeder Variablen und einer Diskriminanzfunktion

a. Diese Variable wird in der Analyse nicht verwendet.

Kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten (5)

	Funktion									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO2	-18,496	32,809	-35,805	99,278	107,291	-82,486	-10,266	-4,450	-194,905	109,874
TiO2	-21,999	-17,518	111,241	124,663	-173,337	-12,719	-32,910	-35,641	-19,280	24,248
Al2O3	153,453	86,354	-47,927	-41,961	-34,991	-38,993	22,648	13,779	76,522	62,722
Fe2O3	-64,163	-218,691	43,598	-126,084	244,752	31,066	44,570	47,214	-44,936	30,591
MgO	112,791	70,240	-72,942	-48,332	-13,009	16,493	29,854	32,724	28,085	-41,107
CaO	-46,857	-7,028	-45,598	24,820	-5,982	-14,176	-27,287	29,552	8,424	29,561
P2O5	-3,271	38,867	20,292	34,893	-25,259	7,859	-10,801	-47,662	4,489	8,377
Cr	-14,538	3,669	8,248	13,156	20,458	-15,115	27,810	2,698	7,725	-6,678
Ni	-,891	-,846	26,863	13,938	-19,525	18,362	-44,056	3,505	-5,436	25,383
Cu	-4,246	-,871	1,185	-,866	4,082	,150	-1,306	-1,108	8,563	9,530
Zn	-9,286	6,148	18,976	-32,799	19,511	14,182	26,156	-24,786	-,131	-15,235
Sr	8,768	-3,005	12,361	-1,453	4,821	7,089	4,277	-2,986	-7,628	7,927
Zr	57,980	-7,747	-57,521	73,270	27,409	70,862	12,264	40,978	42,323	-31,380
Nb	-53,838	21,082	-10,960	-45,244	-25,671	-18,275	11,448	27,490	-18,626	10,167
(Konstant)	-111,111	6,051	151,136	-90,959	-385,740	-37,299	-127,031	-224,897	185,264	-276,159

Nicht-standardisierte Koeffizienten

Tabellenanhang Tabelle 5: Ergebnisse der Diskriminanzanalyse /
b) Melanephelinite

Funktionen bei den Gruppen-Zentroiden (6)

Gruppe	Funktion									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	20,401	-5,373	-1,240	1,488	1,744	-,735	,736	,270	,584	-1,214
2	20,214	-3,286	-,451	,345	,120	-1,577	-2,052	,202	-,533	1,344
3	-6,952	-3,263	3,120	3,975	,520	-,151	1,286	-,994	1,556	,526
4	-4,159	14,553	-4,301	,567	,510	-2,768	-1,871	-1,532	-,136	-,244
5	-11,935	-10,291	4,752	-7,235	5,219	-4,168	-,406	,410	-,427	-,133
6	4,434	12,787	10,407	-4,400	-1,143	4,288	-,817	,508	,109	-,130
7	-5,193	6,606	-6,908	,510	3,455	2,283	2,574	2,571	-,061	,299
8	-7,182	-10,854	-4,990	-1,325	-2,230	4,351	-3,230	-,377	-,026	-,179
9	-7,076	-2,596	4,589	7,612	-4,027	-1,744	,543	1,099	-1,135	-,294
10	1,277	-,006	-6,310	-13,028	-14,577	-5,774	4,770	1,104	1,017	,137
11	4,545	-4,293	-,877	-2,352	,993	4,292	7,734	-4,451	-1,890	,148

Nicht-standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionen, die bezüglich des Gruppen-Mittelwertes bewertet werden

Klassifizierungsstatistiken

A-priori-Wahrscheinlichkeiten der Gruppen (7)

Gruppe	A-priori	In der Analyse verwendete Fälle	
		Ungewichtet	Gewichtet
1	,091	12	12,000
2	,091	11	11,000
3	,091	15	15,000
4	,091	16	16,000
5	,091	10	10,000
6	,091	11	11,000
7	,091	12	12,000
8	,091	14	14,000
9	,091	12	12,000
10	,091	3	3,000
11	,091	4	4,000
Gesamt	1,000	120	120,000

Fallweise Statistiken (8)

Fallnummer	Tatsächliche Gruppe	Vorhergesagte Gruppe	Höchste Gruppe				Zweithöchste Gruppe			Diskriminanzwerte		
			P(D>d G=g)		P(G=g D=d)	Quadrierter Mahalanobis-Abstand zum Zentroid	Gruppe	P(G=g D=d)	Quadrierter Mahalanobis-Abstand zum Zentroid	Funktion 1	Funktion 2	
			p	df								
Original	1	1	,912	10	,999	4,679	2	,001	18,338	20,271	-5,267	
	2	1	,999	10	1,000	1,548	2	,000	24,664	20,097	-4,779	
	3	1	1,000	10	1,000	1,166	2	,000	23,369	20,998	-5,456	
	4	1	1	,999	10	1,000	1,523	2	,000	27,489	20,388	-5,770
	5	1	1	1,000	10	1,000	,565	2	,000	27,892	20,438	-5,454
	6	1	1	,999	10	1,000	1,334	2	,000	19,739	20,136	-5,286
	7	1	1	,999	10	1,000	1,534	2	,000	32,785	20,142	-6,122

Tabellenanhang **Tabelle 5: Ergebnisse der Diskriminanzanalyse /**
b) Melanephelinite

8	1	1	,989	10	1,000	2,605	2	,000	42,032	20,479	-5,856
9	1	1	,814	10	1,000	6,018	2	,000	41,480	21,202	-4,967
10	1	1	,970	10	,998	3,400	2	,002	15,730	19,603	-4,942
11	1	1	1,000	10	1,000	1,227	2	,000	27,239	20,690	-5,261
12	1	1	1,000	10	1,000	,635	2	,000	28,301	20,369	-5,315
13	2	2	,028	10	1,000	20,139	1	,000	43,213	18,051	-3,328
14	2	2	,898	10	1,000	4,894	1	,000	28,525	19,736	-3,564
15	2	2	,003	10	1,000	26,579	1	,000	80,456	23,417	-1,899
16	2	2	,006	10	,999	24,493	1	,001	39,097	21,496	-3,788
17	2	1**	,008	10	,847	23,870	2	,153	27,291	20,198	-5,024
18	2	2	,948	10	1,000	3,983	1	,000	32,858	19,726	-4,464
19	2	2	,000	10	1,000	46,609	1	,000	71,623	21,972	-1,751
20	2	2	,694	10	1,000	7,333	1	,000	45,676	19,602	-3,093
21	2	2	,613	10	1,000	8,159	1	,000	29,640	18,753	-3,911
22	2	2	,873	10	1,000	5,265	1	,000	36,903	19,269	-2,119
23	2	2	,998	10	1,000	1,629	1	,000	22,100	20,134	-3,203
24	3	3	,974	10	1,000	3,273	9	,000	39,017	-7,430	-2,979
25	3	3	,956	10	1,000	3,787	9	,000	43,862	-6,965	-3,764
26	3	3	,999	10	1,000	1,314	9	,000	57,656	-6,929	-3,298
27	3	3	,822	10	1,000	5,914	9	,000	66,327	-7,565	-3,758
28	3	3	,979	10	1,000	3,114	9	,000	66,490	-7,755	-2,890
29	3	3	,310	10	1,000	11,641	9	,000	81,249	-5,607	-5,351
30	3	3	,998	10	1,000	1,672	9	,000	51,008	-6,477	-3,207
31	3	3	,997	10	1,000	1,834	9	,000	56,727	-7,664	-2,962
32	3	3	,990	10	1,000	2,589	9	,000	50,981	-6,456	-3,803
33	3	3	,877	10	1,000	5,207	9	,000	68,667	-6,835	-4,499
34	3	3	,999	10	1,000	1,276	9	,000	46,130	-6,521	-3,348
35	3	3	,975	10	1,000	3,248	9	,000	44,883	-6,630	-3,317
36	3	3	,708	10	1,000	7,181	9	,000	59,417	-7,587	-1,931
37	3	3	,480	10	1,000	9,555	9	,000	56,946	-7,483	-1,506
38	3	3	,449	10	1,000	9,909	9	,000	60,787	-6,376	-2,335
39	4	4	,505	10	1,000	9,291	7	,000	175,662	-5,141	14,187
40	4	4	,216	10	1,000	13,132	7	,000	137,044	-1,829	13,437
41	4	4	,692	10	1,000	7,346	7	,000	150,297	-3,068	13,361
42	4	4	,683	10	1,000	7,444	7	,000	156,750	-3,527	13,774
43	4	4	,019	10	1,000	21,301	7	,000	84,297	-3,207	12,326
44	4	4	,033	10	1,000	19,659	7	,000	191,505	-6,193	16,085
45	4	4	,046	10	1,000	18,545	7	,000	202,675	-3,904	15,522
46	4	4	,202	10	1,000	13,408	7	,000	124,378	-4,868	13,846
47	4	4	,214	10	1,000	13,178	7	,000	184,194	-6,045	15,569
48	4	4	,318	10	1,000	11,530	7	,000	168,903	-4,931	16,372
49	4	4	,269	10	1,000	12,251	7	,000	184,892	-3,631	15,667
50	4	4	,198	10	1,000	13,476	7	,000	115,829	-6,594	14,990
51	4	4	,883	10	1,000	5,116	7	,000	131,549	-3,742	14,216
52	4	4	,619	10	1,000	8,098	7	,000	159,415	-3,739	14,889
53	4	4	,923	10	1,000	4,488	7	,000	161,083	-3,722	14,527
54	4	4	,734	10	1,000	6,906	7	,000	130,293	-2,400	14,076
55	5	5	,847	10	1,000	5,606	3	,000	228,546	-10,062	-10,417

Tabellenanhang **Tabelle 5: Ergebnisse der Diskriminanzanalyse /**
b) Melanephelinite

56	5	5	,988	10	1,000	2,661	3	,000	255,339	-11,540	-9,963
57	5	5	,872	10	1,000	5,275	3	,000	245,104	-11,875	-9,806
58	5	5	,997	10	1,000	1,929	3	,000	258,274	-11,650	-10,303
59	5	5	,918	10	1,000	4,568	3	,000	262,595	-11,546	-10,034
60	5	5	,289	10	1,000	11,936	3	,000	294,143	-14,210	-11,244
61	5	5	,932	10	1,000	4,324	3	,000	238,280	-12,331	-9,631
62	5	5	,994	10	1,000	2,220	3	,000	248,283	-11,783	-10,051
63	5	5	,315	10	1,000	11,572	3	,000	277,846	-12,631	-11,071
64	5	5	,997	10	1,000	1,887	3	,000	243,242	-11,721	-10,391
65	6	6	,349	10	1,000	11,114	4	,000	424,246	5,340	12,810
66	6	6	,010	10	1,000	23,153	4	,000	477,889	5,742	13,304
67	6	6	,004	10	1,000	26,148	4	,000	314,733	3,705	10,674
68	6	6	,991	10	1,000	2,478	4	,000	389,788	4,264	13,353
69	6	6	,868	10	1,000	5,330	4	,000	405,326	4,948	13,540
70	6	6	,943	10	1,000	4,091	4	,000	375,366	4,148	13,567
71	6	6	,996	10	1,000	2,049	4	,000	369,532	4,324	13,620
72	6	6	,990	10	1,000	2,539	4	,000	391,359	3,924	13,458
73	6	6	,000	10	1,000	39,621	11	,000	340,660	4,309	8,935
74	6	6	,662	10	1,000	7,662	4	,000	373,298	4,071	13,615
75	6	6	,969	10	1,000	3,443	4	,000	378,614	4,001	13,784
76	7	7	,969	10	1,000	3,454	4	,000	157,757	-5,880	6,119
77	7	7	,040	10	1,000	19,051	4	,000	101,294	-3,427	7,721
78	7	7	1,000	10	1,000	1,134	4	,000	136,198	-5,588	7,044
79	7	7	,986	10	1,000	2,763	4	,000	133,107	-5,452	7,707
80	7	7	,791	10	1,000	6,286	4	,000	135,724	-5,456	7,329
81	7	7	,961	10	1,000	3,674	4	,000	153,014	-5,005	6,312
82	7	7	,000	10	1,000	35,583	3	,000	193,621	-7,640	2,577
83	7	7	,996	10	1,000	2,048	4	,000	148,093	-4,452	6,584
84	7	7	,980	10	1,000	3,071	4	,000	136,992	-4,792	6,523
85	7	7	,884	10	1,000	5,108	4	,000	151,691	-4,332	7,058
86	7	7	,682	10	1,000	7,454	4	,000	144,656	-4,893	6,969
87	7	7	,966	10	1,000	3,530	4	,000	124,837	-5,404	7,334
88	8	8	,020	10	1,000	21,123	3	,000	285,821	-7,032	-10,999
89	8	8	,010	10	1,000	23,101	3	,000	134,751	-6,117	-9,848
90	8	8	,652	10	1,000	7,759	3	,000	164,083	-8,015	-10,409
91	8	8	,112	10	1,000	15,574	3	,000	143,702	-5,356	-10,167
92	8	8	,805	10	1,000	6,127	3	,000	180,449	-5,872	-10,391
93	8	8	,429	10	1,000	10,132	3	,000	275,698	-7,150	-11,140
94	8	8	,506	10	1,000	9,275	3	,000	174,351	-6,684	-10,683
95	8	8	,693	10	1,000	7,343	3	,000	271,754	-7,166	-11,968
96	8	8	,000	10	1,000	32,613	3	,000	211,461	-9,695	-8,242
97	8	8	,975	10	1,000	3,238	3	,000	168,145	-7,174	-10,616
98	8	8	,867	10	1,000	5,340	3	,000	240,120	-7,286	-11,899
99	8	8	,389	10	1,000	10,601	3	,000	267,414	-8,036	-11,948
100	8	8	,764	10	1,000	6,587	3	,000	257,358	-7,223	-11,862
101	8	8	,873	10	1,000	5,267	3	,000	232,785	-7,749	-11,784
102	9	9	,910	10	1,000	4,698	3	,000	48,109	-7,257	-2,650
103	9	9	,593	10	1,000	8,370	3	,000	53,009	-7,734	-2,849

Tabellenanhang Tabelle 5: Ergebnisse der Diskriminanzanalyse /
b) Melanephelinite

104	9	9	,609	10	1,000	8,199	3	,000	39,296	-8,472	-1,825	
105	9	9	,044	10	1,000	18,687	3	,000	83,591	-6,630	-3,568	
106	9	9	,234	10	1,000	12,818	3	,000	87,536	-5,317	-3,071	
107	9	9	,611	10	1,000	8,187	3	,000	81,835	-7,626	-2,462	
108	9	9	,039	10	1,000	19,093	3	,000	104,212	-6,583	-2,475	
109	9	3**	,008	10	,972	23,720	9	,028	30,841	-7,088	-1,484	
110	9	9	,295	10	1,000	11,848	3	,000	96,153	-6,046	-2,842	
111	9	9	,356	10	1,000	11,016	3	,000	53,031	-8,109	-2,465	
112	9	9	,992	10	1,000	2,413	3	,000	61,914	-7,140	-2,989	
113	9	9	,321	10	1,000	11,489	3	,000	38,160	-6,910	-2,475	
114	10	10	,984	10	1,000	2,866	11	,000	579,343	1,748	-,531	
115	10	10	,970	10	1,000	3,416	11	,000	552,343	1,627	,168	
116	10	10	,999	10	1,000	1,389	11	,000	569,219	,457	,343	
117	11	11	,020	10	1,000	21,215	3	,000	290,250	4,796	-4,305	
118	11	11	,992	10	1,000	2,435	3	,000	245,411	3,607	-4,683	
119	11	11	,842	10	1,000	5,670	3	,000	300,855	5,074	-3,857	
120	11	11	,512	10	1,000	9,217	3	,000	301,039	4,705	-4,329	
Kreuzvalidiert ^a	1	1	,963	14	,998	6,150	2	,002	18,452			
	2	1	,994	14	1,000	4,200	2	,000	26,370			
	3	1	,999	14	1,000	2,764	2	,000	24,274			
	4	1	1,000	14	1,000	2,087	2	,000	27,495			
	5	1	1,000	14	1,000	,873	2	,000	27,836			
	6	1	1,000	14	1,000	2,407	2	,000	20,238			
	7	1	1,000	14	1,000	1,898	2	,000	32,746			
	8	1	1,998	14	1,000	3,294	2	,000	42,740			
	9	1	,743	14	1,000	10,265	2	,000	44,926			
	10	1	,991	14	,997	4,522	2	,003	15,955			
	11	1	1,000	14	1,000	1,853	2	,000	27,344			
	12	1	1,000	14	1,000	,914	2	,000	28,214			
	13	2	2,001	14	1,000	36,597	1	,000	52,463			
	14	2	,911	14	1,000	7,554	1	,000	29,564			
	15	2	,000	14	1,000	50,010	1	,000	109,574			
	16	2	,000	14	,873	41,948	1	,127	45,801			
	17	2	1**	,016	14	1,000	27,550	2	,000	47,768		
	18	2	2,883	14	1,000	8,123	1	,000	35,605			
	19	2	1**	,000	14	,989	183,541	2	,011	192,526		
	20	2	2,688	14	1,000	10,973	1	,000	48,729			
	21	2	,583	14	1,000	12,291	1	,000	31,095			
	22	2	,600	14	1,000	12,080	1	,000	42,091			
	23	2	,999	14	1,000	2,917	1	,000	22,636			
	24	3	,127	14	1,000	20,107	9	,000	50,896			
	25	3	,955	14	1,000	6,425	9	,000	45,013			
	26	3	,991	14	1,000	4,562	9	,000	60,022			
	27	3	,454	14	1,000	13,939	9	,000	73,214			
	28	3	,888	14	1,000	8,021	9	,000	70,912			
	29	3	,340	14	1,000	15,580	9	,000	85,767			
	30	3	1,000	14	1,000	2,523	9	,000	51,042			
	31	3	,941	14	1,000	6,837	9	,000	60,543			

Tabellenanhang **Tabelle 5: Ergebnisse der Diskriminanzanalyse /**
b) Melanephelinite

32	3	3	,993	14	1,000	4,382	9	,000	51,665
33	3	3	,895	14	1,000	7,889	9	,000	70,877
34	3	3	,999	14	1,000	3,161	9	,000	47,129
35	3	3	,096	14	1,000	21,238	9	,000	58,189
36	3	3	,467	14	1,000	13,767	9	,000	63,789
37	3	3	,347	14	1,000	15,469	9	,000	59,890
38	3	3	,000	14	1,000	42,870	9	,000	87,381
39	4	4	,105	14	1,000	20,886	7	,000	189,250
40	4	4	,004	14	1,000	32,356	7	,000	147,178
41	4	4	,618	14	1,000	11,852	7	,000	152,146
42	4	4	,404	14	1,000	14,632	7	,000	161,845
43	4	4	,000	14	1,000	63,380	7	,000	98,516
44	4	4	,005	14	1,000	31,096	7	,000	208,278
45	4	4	,012	14	1,000	28,581	7	,000	223,236
46	4	4	,002	14	1,000	34,003	7	,000	133,776
47	4	4	,181	14	1,000	18,603	7	,000	192,779
48	4	4	,361	14	1,000	15,261	7	,000	171,987
49	4	4	,246	14	1,000	17,201	7	,000	193,293
50	4	4	,163	14	1,000	19,045	7	,000	116,105
51	4	4	,859	14	1,000	8,548	7	,000	132,272
52	4	4	,584	14	1,000	12,275	7	,000	161,919
53	4	4	,899	14	1,000	7,806	7	,000	163,536
54	4	4	,472	14	1,000	13,704	7	,000	133,045
55	5	5	,014	14	1,000	28,044	3	,000	239,627
56	5	5	,964	14	1,000	6,102	3	,000	255,459
57	5	5	,532	14	1,000	12,927	3	,000	247,305
58	5	5	,987	14	1,000	4,924	3	,000	258,347
59	5	5	,926	14	1,000	7,220	3	,000	262,162
60	5	5	,002	14	1,000	34,342	3	,000	319,952
61	5	5	,859	14	1,000	8,554	3	,000	238,300
62	5	5	,974	14	1,000	5,694	3	,000	248,274
63	5	5	,009	14	1,000	29,560	3	,000	292,591
64	5	5	,960	14	1,000	6,248	3	,000	243,954
65	6	6	,213	14	1,000	17,861	4	,000	433,669
66	6	6	,001	14	1,000	37,642	4	,000	526,960
67	6	6	,000	14	1,000	44,648	4	,000	316,522
68	6	6	,991	14	1,000	4,559	4	,000	388,305
69	6	6	,930	14	1,000	7,132	4	,000	405,210
70	6	6	,966	14	1,000	6,007	4	,000	372,660
71	6	6	,999	14	1,000	2,731	4	,000	366,357
72	6	6	,998	14	1,000	3,404	4	,000	388,871
73	6	6	,000	14	1,000	85,884	4	,000	363,628
74	6	6	,640	14	1,000	11,579	4	,000	371,153
75	6	6	,971	14	1,000	5,806	4	,000	376,497
76	7	7	,975	14	1,000	5,629	4	,000	158,582
77	7	7	,000	14	1,000	57,895	4	,000	114,240
78	7	7	,976	14	1,000	5,565	4	,000	138,300
79	7	7	,977	14	1,000	5,542	4	,000	133,616

Tabellenanhang Tabelle 5: Ergebnisse der Diskriminanzanalyse /
b) Melanephelinite

80	7	7	,069	14	1,000	22,476	4	,000	145,216
81	7	7	,935	14	1,000	6,998	4	,000	154,414
82	7	7	,000	14	1,000	85,462	3	,000	198,238
83	7	7	,996	14	1,000	3,831	4	,000	148,091
84	7	7	,964	14	1,000	6,101	4	,000	137,574
85	7	7	,297	14	1,000	16,268	4	,000	159,578
86	7	7	,008	14	1,000	29,989	4	,000	159,982
87	7	7	,607	14	1,000	11,992	4	,000	129,355
88	8	8	,001	14	1,000	36,118	3	,000	324,515
89	8	8	,001	14	1,000	37,247	3	,000	140,754
90	8	8	,684	14	1,000	11,031	3	,000	165,872
91	8	8	,013	14	1,000	28,273	3	,000	150,380
92	8	8	,821	14	1,000	9,148	3	,000	180,557
93	8	8	,123	14	1,000	20,228	3	,000	302,531
94	8	8	,550	14	1,000	12,706	3	,000	174,330
95	8	8	,657	14	1,000	11,372	3	,000	287,817
96	8	8	,000	14	1,000	61,064	3	,000	219,428
97	8	8	,994	14	1,000	4,180	3	,000	169,341
98	8	8	,743	14	1,000	10,253	3	,000	246,899
99	8	8	,385	14	1,000	14,902	3	,000	282,078
100	8	8	,664	14	1,000	11,274	3	,000	268,860
101	8	8	,765	14	1,000	9,968	3	,000	237,677
102	9	9	,853	14	1,000	8,646	3	,000	49,852
103	9	9	,634	14	1,000	11,659	3	,000	53,458
104	9	9	,129	14	1,000	20,042	3	,000	45,400
105	9	9	,005	14	1,000	31,486	3	,000	94,738
106	9	9	,135	14	1,000	19,862	3	,000	96,039
107	9	9	,486	14	1,000	13,522	3	,000	88,112
108	9	9	,001	14	1,000	35,934	3	,000	128,138
109	9	3**	,000	14	1,000	318,145	5	,000	449,119
110	9	9	,023	14	1,000	26,457	3	,000	116,157
111	9	9	,228	14	1,000	17,554	3	,000	55,198
112	9	9	,992	14	1,000	4,427	3	,000	63,105
113	9	9	,004	14	1,000	32,310	3	,000	48,730
114	10	10	,431	14	1,000	14,255	11	,000	579,116
115	10	10	,333	14	1,000	15,685	11	,000	550,274
116	10	10	,994	14	1,000	4,149	11	,000	564,593
117	11	11	,000	14	1,000	61,409	3	,000	298,835
118	11	11	,977	14	1,000	5,549	3	,000	245,833
119	11	11	,358	14	1,000	15,292	3	,000	304,627
120	11	11	,074	14	1,000	22,246	3	,000	305,290

Für die Originaldaten basiert der quadrierte Mahalanobis-Abstand auf den kanonischen Funktionen.

Für die kreuzvalidierten Daten basiert der quadrierte Mahalanobis-Abstand auf den Beobachtungen.

a. Die Kreuzvalidierung wird nur für Fälle in dieser Analyse vorgenommen. In der Kreuzvalidierung ist jeder Fall durch die Funktionen klassifiziert, die von allen anderen Fällen außer diesem Fall abgeleitet werden.

** . Falsch klassifizierter Fall

Tabellenanhang Tabelle 5: Ergebnisse der Diskriminanzanalyse /
b) Melanephelinite

Klassifizierungsergebnisse ^{b,c} (9)			Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Original	Anzahl	1	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		2	1	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		3	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0
		4	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0
		5	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0
		6	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0
		7	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0
		8	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0
		9	0	0	1	0	0	0	0	0	11	0	0
		10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
		11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			%	1	100,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0
2	9,1			90,9	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0
3	,0			,0	100,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0
4	,0			,0	,0	100,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0
5	,0			,0	,0	,0	100,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0
6	,0			,0	,0	,0	,0	100,0	,0	,0	,0	,0	,0
7	,0			,0	,0	,0	,0	,0	100,0	,0	,0	,0	,0
8	,0			,0	,0	,0	,0	,0	,0	100,0	,0	,0	,0
9	,0			,0	8,3	,0	,0	,0	,0	,0	91,7	,0	,0
10	,0			,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	100,0	,0
11	,0			,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0
Kreuzvalidiert ^a	Anzahl			1	12	0	0	0	0	0	0	0	0
		2	2	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		3	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0
		4	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0
		5	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0
		6	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0
		7	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0
		8	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0
		9	0	0	1	0	0	0	0	0	11	0	0
		10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
		11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			%	1	100,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0
2	18,2			81,8	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0
3	,0			,0	100,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0
4	,0			,0	,0	100,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0
5	,0			,0	,0	,0	100,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0
6	,0			,0	,0	,0	,0	100,0	,0	,0	,0	,0	,0
7	,0			,0	,0	,0	,0	,0	100,0	,0	,0	,0	,0
8	,0			,0	,0	,0	,0	,0	,0	100,0	,0	,0	,0
9	,0			,0	8,3	,0	,0	,0	,0	,0	91,7	,0	,0
10	,0			,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	100,0	,0
11	,0			,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0	,0

a. Die Kreuzvalidierung wird nur für Fälle in dieser Analyse vorgenommen. In der Kreuzvalidierung ist jeder Fall durch die Funktionen klassifiziert, die von allen anderen Fällen außer diesem Fall abgeleitet werden.

b. 98,3% der ursprünglich gruppierten Fälle wurden korrekt klassifiziert.

c. 97,5% der Kreuzvalidierten gruppierten Fälle wurden korrekt klassifiziert.

Tabellenanhang Tabelle 5: Ergebnisse der Diskriminanzanalyse / Erläuterungen zur SPSS-Ausgabe

Erläuterungen zur SPSS-Ausgabe:

- (1) „Eigenwerte“: Gibt den Erklärungswert der Diskriminanzfunktionen wider.
 „Eigenwert“: Ist der Eigenwert groß, ist die Streuung zwischen den Gruppen groß und innerhalb der Gruppen klein, was der angestrebte Fall ist.
 „% der Varianz“: relative Wichtigkeit der Diskriminanzfunktionen
 „kanonische Korrelation“: Maß (zw. 0 und 1) für den Zusammenhang zwischen den Funktionswerten der Diskriminanzfunktion und den verschiedenen Gruppen. Misst Anteil der Streuung zwischen den Gruppen an gesamter Streuung. Je größer der Wert, desto größer ist die Streuung zwischen den Gruppen und die Streuung innerhalb der Gruppen ist klein.
 - (2) „Wilks' Lambda“: . Wilks' Lambda kann in ein Chi-quadrat-verteiltes Maß transformiert werden. Je kleiner Wilks' Lambda, desto größer Chi-quadrat, desto besser können die Funktionen zwischen den Gruppen unterscheiden. Mit dieser Transformation wird ein Hypothesentest durchgeführt, getestet wird die Hypothese, dass die Gruppenmittelwerte der Funktionswerte aus der Diskriminanzfunktion in der Grundgesamtheit identisch sind. Dies wird auf dem 5%-Niveau getestet, d.h. der Signifikanzwert muss $< 0,05$ sein. Dann kann die Hypothese, dass in der Grundgesamtheit kein Unterschied zwischen den gruppenweisen Funktionsmittelwerten besteht, abgelehnt werden.
 - (3) „standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten“:
 Beschreibung der Wichtigkeit der Merkmalsvariablen innerhalb der Diskriminanzfunktion. Die Ausgangswerte der erklärenden Variablen werden vor der Berechnung der Diskriminanzfunktion mittels einer z-Transformation standardisiert. Dadurch werden die Einflüsse unterschiedlicher Dimensionen in Variablen eliminiert und die Koeffizienten werden unabhängig vom Maßstab direkt vergleichbar.
 - (4) „Struktur-Matrix“: Ausgabe der Größe der absoluten Korrelation zwischen der jeweiligen Variable und der Diskriminanzfunktion. Die Matrix beschreibt den Erklärungswert, den die einzelne Variable für die Diskriminanzfunktion besitzt. Anhand der Struktur-Matrix wird ersichtlich, welche Merkmalsvariable die größte diskriminatorische Bedeutung hat. Die Variable mit dem größten Betrag besitzt den größten Erklärungswert (mit * markiert).
 - (5) „Kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten“:
 Die unstandardisierten Parameter der Diskriminanzfunktion. Aus diesen wird die Diskriminanzfunktion aufgestellt.
 - (6) „Funktionen bei den Gruppenzentroiden“:
 Mittelwerte der Funktionen bei den einzelnen Gruppen. Wichtig ist, dass sich die Gruppenmittelwerte in der Grundgesamtheit signifikant voneinander unterscheiden. Nur bei ausreichenden Unterschieden ist die Zuordnung unbekannter Elemente treffsicher.
 - (7) „A-priori-Wahrscheinlichkeit der Gruppen“: Wird in diesem Fall als für alle Gruppen gleich angesehen.
 - (8) „Fallweise Statistiken“: Die Spalte „Höchste Gruppe“ zeigt die Fälle an, die mit der größten Wahrscheinlichkeit aus einer bestimmten Gruppe stammen, und für diese Gruppe ist die a-posteriori-Wahrscheinlichkeit $P(D=d | G=g)$ angegeben. Die bedingte Wahrscheinlichkeit ist unter $P(D>d | G=g)$ angegeben. Die „Zweithöchste Gruppe“ ist die Gruppe mit der zweithöchsten Wahrscheinlichkeit. Liegen die beiden Wahrscheinlichkeiten für die Zugehörigkeit zur ersten bzw. zweiten Gruppe nahe beieinander sind falsche Zuordnungen möglich. Hat der „Mahalanobis-Abstand“ einen großen Wert, handelt es sich dabei um einen Fall, der bei einer oder mehreren Variablen Extremwerte besitzt. Die untere Tabellenhälfte umfasst die Kreuzvalidierung, d.h. jeder Fall wird durch die Funktionen aus allen anderen Fällen unter Auslassung des zu klassifizierenden Falls, zugeordnet. So kann geprüft werden, wie stabil die Vorhersage ist.
 - (9) „Klassifizierungsergebnisse“: Zusammenfassende Tabelle, die die Häufigkeiten der verschiedenen Kombinationen aus tatsächlicher und geschätzter Gruppenzugehörigkeit angibt. Zusätzlich wird die Trefferquote angegeben.
-

Tabellenanhang Tabelle 6: Ergebnisse der Sr-Nd-Pb-Isotopenanalyse

Probe	Messwerte					Korrektur d. Massenfraktionierung		
						1,002	1,003	1,004
	87Sr/86Sr	143Nd/144Nd	206Pb/204Pb	207Pb/204Pb	208Pb/204Pb	206Pb/204Pb	207Pb/204Pb	208Pb/204Pb
HB1-0	0,704564	0,512723	18,9067	15,6059	39,1168	18,945	15,653	39,273
HB4	0,704518	0,512711	18,9164	15,6116	39,1484	18,954	15,658	39,305
HB10	0,704567	0,512711	18,9123	15,6013	39,1350	18,950	15,648	39,292
MLneu	0,704621	0,512696	18,8058	15,5882	39,0023	18,843	15,635	39,158
ML1-1	0,704616	0,512705	18,8182	15,6014	39,0396	18,856	15,648	39,196
ML6	0,704613	0,512704	18,8237	15,6072	39,0629	18,861	15,654	39,219
DiL-m	0,704434	0,512724	19,4434	15,6196	39,5020	19,482	15,666	39,660
DiL1-9	0,704430	0,512717	19,4436	15,6230	39,5103	19,482	15,670	39,668
GooBe1	0,704299	0,512729	19,4530	15,6271	39,4839	19,492	15,674	39,642
GooBe2	0,704270	0,512730	19,4577	15,6286	39,4890	19,497	15,675	39,647

Tabellenanhang Tabelle 7: Haupt- und Spurenelemente der Mhlsteine

	Most	Kolin	Bassou	Mirebeau	Bonn698	Bonn1276	Bonn698	Bonn698	NWSt2	NWSt2-188(2)	NWSt2	NWSt2	Nr.	SS1007
SiO2 (%)	49,91	49,47	50,74	48,66	50,36	48,57	48,16	50,20	49,41	51,68	48,44	50,28	49,69	
TiO2	1,90	1,94	2,16	2,16	1,83	2,17	2,10	2,12	1,96	2,00	2,09	2,08	2,12	
Al2O3	16,99	16,93	17,42	16,26	17,11	16,00	16,70	15,96	17,44	15,79	16,89	16,06	16,10	
Fe2O3	7,84	8,06	10,43	8,86	7,59	9,17	8,68	8,78	8,23	8,37	8,58	8,68	8,83	
MnO	0,18	0,18	0,21	0,18	0,17	0,19	0,19	0,17	0,17	0,18	0,18	0,17	0,18	
MgO	4,56	4,61	3,35	5,26	4,36	5,43	4,91	5,31	4,30	5,04	4,81	5,17	5,38	
CaO	8,29	8,57	7,74	9,53	8,07	9,75	9,31	9,23	8,97	8,72	9,21	9,08	9,17	
Na2O	5,11	5,13	4,46	4,50	5,45	4,46	5,05	4,09	5,07	4,21	5,11	4,25	4,14	
K2O	4,81	4,65	2,29	4,11	4,67	3,76	4,32	3,67	3,78	3,56	4,17	3,79	3,91	
P2O5	0,40	0,45	1,20	0,48	0,38	0,47	0,55	0,45	0,67	0,43	0,51	0,42	0,47	
Summe	100,00	99,98	100,00	99,99	99,99	99,98	99,99	99,98	99,99	99,98	99,99	99,98	99,99	
LOI	0,65	0,79	-0,27	0,58	0,77	0,90	0,71	0,60	0,66	1,01	1,96	0,60	0,49	
Sc (ppm)	16	18	12	20	17	22	19	21	13	23	16	23	23	
V	210	204	129	239	200	249	240	223	198	229	222	242	243	
Cr	45	41	1	61	44	69	39	72	26	67	38	64	71	
Co	28	33	16	27	33	59	62	101	31	29	30	26	39	
Ni	39	39	0,001	42	36	50	47	59	30	51	36	52	51	
Cu	34	46	18	42	37	49	41	58	37	48	42	46	46	
Zn	94	94	97	87	90	88	92	89	91	83	90	84	87	
Ga	21	21	20	19	21	19	22	19	21	19	21	20	20	
Rb	153	148	57	129	154	119	140	110	137	95	139	115	117	
Sr	867	918	986	1045	840	1015	1056	964	1249	939	1075	964	984	
Y	23	25	34	28	23	27	27	27	28	28	27	26	27	
Zr	401	400	271	355	408	335	395	321	407	321	396	319	328	
Nb	106	109	85	105	106	101	115	93	126	91	116	94	95	
Ba	1023	1058	675	1232	992	1187	1134	1192	1716	1244	1360	1237	1229	
Pb	15	12	3	13	11	10	13	14	13	9	11	12	7	
Th	14,4	16,9	6,7	10,9	16,4	10,7	13	10,8	13,9	11,9	14,7	10	10,5	
U	3,7	4,3	2,4	3,5	5	4,4	5	3,4	2,7	4,3	4,7	3,3	2,2	

Tabellenanhang Tabelle 7: Haupt- und Spurenelemente der Mhlsteine

	SS1078	SS1201	ZS1101	ZS1301	ZS1213	Burg-Cat	Burg-Meta	off	Long	Pratz	Bib5.0.8	Bib5.6.37	Bib28.57
SiO2 (%)	51,67	49,15	48,80	49,07	48,72	51,74	51,59	48,77	50,32	46,58	47,22	58,09	50,40
TiO2	1,91	2,16	2,15	2,12	2,04	1,93	1,95	2,18	2,11	2,34	2,42	1,10	2,10
Al2O3	14,59	16,03	16,25	16,38	16,81	17,23	17,22	16,39	17,33	12,91	13,86	18,09	17,30
Fe2O3	10,68	8,92	8,82	8,73	8,43	9,95	10,03	8,82	10,93	12,85	12,34	6,59	10,92
MnO	0,16	0,18	0,18	0,18	0,18	0,21	0,22	0,17	0,20	0,18	0,19	0,21	0,20
MgO	7,48	5,51	5,19	5,10	4,85	3,71	3,74	5,19	4,03	10,93	8,93	1,79	4,02
CaO	8,33	9,40	9,41	9,23	9,09	7,55	7,60	9,48	8,10	9,46	9,33	4,50	8,03
Na2O	3,17	4,14	4,59	4,52	4,89	4,38	4,37	4,45	4,10	2,99	3,60	5,52	4,10
K2O	1,49	4,03	4,10	4,15	4,47	2,47	2,45	4,01	2,22	1,13	1,43	3,53	2,22
P2O5	0,43	0,45	0,48	0,48	0,50	0,81	0,81	0,54	0,66	0,54	0,60	0,56	0,70
Summe	99,91	99,97	99,97	99,97	99,99	99,99	99,98	99,98	100,00	99,91	99,93	99,99	100,00
LOI	0,57	0,34	0,56	0,52	0,84	-0,20	-0,39	0,76	-0,32	-0,22	0,01	-0,05	-0,33
Sc (ppm)	18	22	20	20	18	12	12	23	16	21	20	2	13
V	157	238	236	243	222	147	137	245	172	184	176	36	173
Cr	346	69	51	56	47	21	18	58	23	355	274	2	18
Co	47	41	36	41	46	21	28	44	27	58	46	14	27
Ni	178	53	45	47	38	18	15	48	13	282	222	1	8
Cu	42	40	41	46	43	28	25	44	26	71	65	9	20
Zn	107	82	87	86	90	96	95	89	105	110	118	110	100
Ga	19	19	20	20	22	20	21	21	21	18	19	19	21
Rb	28	121	122	125	142	68	65	128	57	28	42	94	55
Sr	657	995	1027	1024	979	808	807	1019	785	601	926	740	788
Y	28	26	28	27	25	34	35	26	32	26	27	35	32
Zr	206	327	342	353	386	320	318	350	291	197	245	474	290
Nb	70	95	102	105	110	98	99	103	85	53	71	123	84
Ba	643	1250	1198	1229	1109	744	754	1221	645	351	563	1065	645
Pb	9	8	10	9	11	5	12	12	7	2	2	10	6
Th	3,5	10,9	11,1	13,2	14,9	8,8	9,5	10,5	7,3	2,5	3,2	13,5	9
U	2,9	3,1	1,5	3,2	4,2	3,5	0,7	3	1,6	1,7	0,1	4,5	3,3

Tabellenanhang Tabelle 7: Haupt- und Spurenelemente der Mhlsteine

	Bib538.8	Bib984.2	PrST 252	PrST 250	PrST 247 A	PrST 247 B	Hal Hand	Hal pomp	Frag1 NÖ	Frag2 NÖ	Frag3 NÖ	Car-pomp	BaHa F47
SiO2 (%)	50,31	50,42	48,81	49,74	49,35	49,81	48,70	50,40	50,78	49,88	50,16	56,49	48,57
TiO2	2,12	2,10	2,05	2,05	1,86	2,11	2,07	1,19	2,14	2,20	2,21	0,47	2,06
Al2O3	17,37	17,39	16,66	16,38	17,15	16,04	16,77	17,12	15,14	15,36	16,07	20,70	16,71
Fe2O3	10,97	10,88	8,40	8,49	7,84	8,76	8,43	7,67	10,64	10,87	10,78	4,09	8,47
MnO	4,01	0,20	0,18	0,18	0,19	0,18	0,18	0,18	0,16	0,16	0,16	0,15	0,18
MgO	8,04	3,97	4,87	5,01	4,04	5,36	4,91	4,43	6,76	7,06	6,44	0,75	4,85
CaO	8,04	8,00	9,03	9,11	8,69	9,22	9,04	8,04	8,34	8,49	8,26	3,89	9,10
Na2O	4,07	4,10	5,02	4,27	5,18	4,03	5,09	5,36	3,49	3,43	3,32	3,21	5,10
K2O	2,21	2,24	4,50	4,26	5,19	3,99	4,33	4,54	1,89	1,87	1,92	10,14	4,47
P2O5	0,69	0,70	0,46	0,47	0,49	0,47	0,46	0,40	0,61	0,62	0,63	0,09	0,47
Summe	99,98	100,00	99,98	99,96	99,99	99,97	99,98	99,34	99,95	99,94	99,94	100,00	99,98
LOI	-0,17	-0,21	0,38	0,43	0,56	0,81	0,47	0,85	0,33	0,32	0,61	1,34	0,52
Sc (ppm)	12	15	20	18	10	22	19	15	18	18	21	3	19
V	169	172	224	233	186	243	227	189	178	176	182	106	243
Cr	16	16	44	64	27	75	47	43	246	240	218	5	48
Co	27	27	26	24	21	26	29	29	43	47	46	7	34
Ni	11	12	38	45	26	53	39	34	169	168	150	3	34
Cu	24	26	35	41	29	34	38	36	49	50	41	12	29
Zn	98	104	92	87	87	88	91	94	107	110	109	92	87
Ga	21	21	20	21	21	20	20	21	23	24	24	23	20
Rb	54	56	142	129	158	120	139	152	52	50	51	322	139
Sr	793	788	945	1028	1249	991	939	848	746	775	775	2014	978
Y	32	31	24	26	26	28	27	25	26	27	29	41	26
Zr	292	292	383	347	407	319	388	410	251	255	251	642	381
Nb	84	86	110	104	126	96	109	107	53	56	57	45	107
Ba	642	656	1088	1220	1335	1203	1079	1017	578	606	647	2130	1078
Pb	8	2	7	7	10	7	13	14	7	8	5	230	13
Th	7,6	9,5	16,5	13,3	18,6	11,4	15,7	16	6,7	5,6	7,3	162,9	12,4
U	1,8	3,3	1,4	1,6	1,2	0,4	0,6	2	0	0	0	35,2	3

Tabellenanhang Tabelle 7: Haupt- und Spurenelemente der Mühlsteine

	BaHa F48	OA 78.122	OA GR 151	An 90.386m	An 94.232	An 92.061	Salz1	Salz24	Salz 3	Salz4	Bie 980,59	Bie 130	W-H
SiO2 (%)	49,26	49,91	50,00	49,22	49,76	51,11	48,55	50,17	43,34	48,54	48,78	48,98	48,59
TiO2	2,03	1,90	2,12	1,97	1,95	2,25	2,16	1,86	2,96	2,20	2,15	2,04	2,18
Al2O3	16,31	17,10	16,27	16,92	17,00	14,99	16,33	17,13	11,58	16,25	16,35	17,01	16,18
Fe2O3	8,94	7,89	8,87	8,15	7,96	12,33	8,87	7,70	12,18	8,91	8,82	8,41	8,98
MnO	0,19	0,18	0,17	0,18	0,18	0,17	0,18	0,18	0,19	0,18	0,18	0,18	0,19
MgO	5,78	4,51	5,31	4,58	4,59	6,02	5,29	4,46	14,89	5,33	5,18	4,79	5,43
CaO	9,19	8,38	9,13	8,74	8,45	8,39	9,45	8,18	10,72	9,46	9,33	8,95	9,61
Na2O	4,32	5,28	4,07	5,24	5,08	3,49	4,56	5,18	2,35	4,48	4,58	4,78	4,39
K2O	3,53	4,43	3,61	4,53	4,59	0,81	4,04	4,75	0,56	4,07	4,09	4,31	3,93
P2O5	0,44	0,41	0,44	0,45	0,43	0,39	0,56	0,39	1,06	0,57	0,51	0,51	0,49
Summe	99,98	99,98	100,00	99,99	99,99	99,96	100,00	100,00	99,84	99,99	99,97	99,99	99,98
LOI	0,91	0,82	0,96	0,54	0,73	0,79	0,53	0,58	2,38	0,72	0,55	1,38	0,60
Sc (ppm)	19	17	23	17	19	20	19	16	24	22	21	18	24
V	233	206	235	222	213	180	257	208	225	246	247	235	267
Cr	96	51	76	42	45	210	64	47	613	53	68	48	66
Co	30	25	37	34	32	48	27	25	60	29	35	24	25
Ni	66	39	54	33	39	127	47	39	479	49	44	35	48
Cu	33	31	45	30	33	36	21	29	31	33	35	32	36
Zn	94	92	89	92	93	209	92	90	117	94	91	96	94
Ga	20	22	20	22	22	21	19	22	16	21	21	21	20
Rb	123	151	122	149	149	19	133	166	138	135	135	170	123
Sr	1026	921	1002	982	916	579	1020	848	920	1011	1028	981	1051
Y	27	26	28	26	26	27	28	24	23	28	27	27	27
Zr	342	407	329	401	404	136	350	409	245	341	350	396	370
Nb	95	107	93	110	107	40	101	104	80	99	102	107	100
Ba	1136	1022	1194	1076	1025	400	1145	1002	866	1155	1159	1084	1208
Pb	10	14	14	12	14	3	11	14	4	13	10	12	11
Th	11,6	15,2	12	14,6	14,4	5,3	12	15,6	6,4	12,9	11,3	15	11,6
U	2,2	4,3	2	4,2	1	0	3,6	1,6	0,4	2,7	2,3	3,1	0,9

Tabellenanhang Tabelle 7: Haupt- und Spurenelemente der Mhlsteine

	Kirch 162	Hü 177-a	Hü 177-b	Hü 232	Gra-Hö	Eng 198	Cam 18558	X 17701	X 37542	X 17892	X 39444	X 1781111-a	X 1781111-b
SiO2 (%)	48,80	49,05	50,11	48,70	48,67	50,77	49,18	47,34	49,75	48,26	48,38	45,69	49,33
TiO2	2,03	2,15	1,87	2,19	2,20	1,80	1,99	2,05	2,04	2,09	2,14	2,35	1,85
Al2O3	16,62	16,27	17,36	16,38	16,55	17,42	16,70	16,65	16,21	16,36	16,25	16,01	17,09
Fe2O3	8,45	8,86	7,78	8,91	9,02	7,53	8,28	8,35	8,37	8,44	8,60	9,30	7,52
MnO	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,18	0,18	0,19	0,18
MgO	4,96	5,39	4,40	5,30	5,25	4,28	5,00	4,92	5,14	5,11	5,34	5,54	4,46
CaO	9,08	9,38	8,18	9,51	9,50	7,89	8,96	8,71	8,49	8,83	8,96	9,72	7,68
Na2O	4,91	4,21	5,03	4,32	4,28	5,20	4,88	4,95	4,15	4,30	4,26	4,46	5,21
K2O	4,48	3,96	4,53	3,95	3,80	4,49	4,36	4,42	3,90	3,86	3,91	4,01	4,63
P2O5	0,48	0,52	0,55	0,55	0,54	0,41	0,46	0,55	0,43	0,48	0,49	0,60	0,40
Summe	99,99	99,97	99,99	99,99	99,98	99,97	99,98	98,12	98,65	97,91	98,51	97,87	98,35
LOI	0,75	0,80	1,11	0,80	1,08	1,15	0,79	0,68	0,44	0,79	0,75	0,67	1,20
Sc (ppm)	18	22	14	22	20	15	19	18	21	20	24	22	17
V	215	260	205	250	252	196	238	239	246	251	236	266	218
Cr	58	60	42	60	58	48	79	43	77	61	62	48	47
Co	24	32	24	31	29	24	49	27	44	33	26	30	33
Ni	46	51	36	46	47	38	52	35	52	45	48	43	36
Cu	33	33	28	36	34	26	40	28	47	40	37	37	32
Zn	98	92	92	91	90	93	90	95	93	90	94	92	93
Ga	22	20	23	20	21	23	21	22	21	19	20	19	22
Rb	157	134	165	133	132	170	145	142	118	128	125	119	154
Sr	950	1005	877	1055	1040	862	961	1054	977	1047	1021	1286	856
Y	26	28	25	27	29	25	26	28	29	29	28	32	23
Zr	390	353	415	349	355	423	393	391	321	353	346	340	403
Nb	107	100	106	102	102	107	108	112	94	104	100	113	104
Ba	1021	1154	1024	1201	1181	1006	1079	1101	1167	1194	1167	1395	1011
Pb	14	9	13	11	12	14	11	11	10	15	16	6	17
Th	13,5	12,4	14,9	11,3	11,5	16,1	15,5	14,4	11,8	12,8	12,5	11,6	15,4
U	3,3	2	4,1	2,6	0,5	2,6	1,2	2	3,1	2,9	2,8	1,9	4,4

Tabellenanhang Tabelle 7: Haupt- und Spurenelemente der Mühlsteine

	X 39957-a	X 39957-b	X 39957-c
SiO2 (%)	48,26	48,39	49,05
TiO2	2,03	1,95	1,89
Al2O3	16,82	16,77	17,03
Fe2O3	8,20	7,94	7,73
MnO	0,18	0,18	0,17
MgO	4,86	4,71	4,51
CaO	8,56	8,30	8,06
Na2O	4,62	4,93	4,99
K2O	4,28	4,42	4,27
P2O5	0,48	0,48	0,50
Summe	98,29	98,07	98,20
LOI	1,11	0,81	0,99
Sc (ppm)	21	18	19
V	237	239	221
Cr	50	52	44
Co	90	51	22
Ni	43	40	36
Cu	57	38	30
Zn	96	96	98
Ga	22	20	21
Rb	144	148	155
Sr	987	972	948
Y	26	27	26
Zr	392	397	410
Nb	109	108	108
Ba	1068	1091	1058
Pb	13	12	13
Th	14,3	15,3	13,7
U	1,3	2,9	3,1

Tabellenanhang Tabelle 8: Diskriminanzanalyse / Klassifizierung der Mühlsteinfundstücke

	Werte der Diskriminanzfunktion		Euklidische Distanzen			Wahrscheinlichkeit für Zugehörigkeit zu		
	Y1	Y2	Gruppenzentroid 1	Gruppenzentroid 2	Gruppenzentroid 3	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Most	-5,7256	-3,9588	107,5771	49,3204	24,0016	0,0000	0,0000	1,0000
Kolln	-1,5404	-1,6677	31,8668	7,5281	11,4887	0,0000	0,8787	0,1213
Mirebeau	3,4757	2,3653	0,6290	27,9388	59,2716	1,0000	0,0000	0,0000
Bonn698-119	-8,1985	-5,0089	169,4179	93,7146	49,2735	0,0000	0,0000	1,0000
Bonn1276-13	0,1223	1,3399	7,6401	14,6963	17,7069	0,9654	0,0283	0,0063
Bonn698-120	8,4603	4,4975	38,4340	101,0439	170,8286	1,0000	0,0000	0,0000
Bonn698-278	-5,4469	0,4576	70,5655	50,9982	2,0495	0,0000	0,0000	1,0000
NWS12-188(2)	-10,3135	-2,2051	189,6006	130,6049	47,6004	0,0000	0,0000	1,0000
NWS12-138	8,5048	2,3183	32,4032	76,5460	159,8610	1,0000	0,0000	0,0000
NW ohne Nr.	-5,7284	-0,0960	77,2171	51,9554	3,4329	0,0000	0,0000	1,0000
SS1007	-2,9404	2,4520	33,5594	39,6230	4,4765	0,0000	0,0000	1,0000
SS1201	-2,4437	3,5860	30,5944	48,0492	11,2061	0,0001	0,0000	0,9999
ZS1101	1,4943	2,6547	2,3329	25,3256	34,5527	1,0000	0,0000	0,0000
ZS1301	2,0127	2,2734	0,7961	22,3071	39,1521	1,0000	0,0000	0,0000
ZS1213	2,5867	2,5296	0,4431	26,1099	47,3183	1,0000	0,0000	0,0000
Offemont	3,2301	6,1417	18,0798	76,8144	82,9667	1,0000	0,0000	0,0000
PrenvST 252	-0,2573	-1,2140	19,2655	3,2006	17,6299	0,0003	0,9989	0,0007
PrenvST 250	2,4087	2,4222	0,4387	24,5783	44,6003	1,0000	0,0000	0,0000
PrenvST 247 A	19,2045	3,1455	269,7485	357,6266	545,9756	1,0000	0,0000	0,0000
PrenvST 247 B	-1,7528	3,0551	22,2898	37,5758	11,0202	0,0036	0,0000	0,9964
Haltern Hand	-1,1137	-1,1823	25,0856	6,3560	11,7915	0,0001	0,0000	0,0619
Haltern pomp	-6,9378	-4,7341	139,4820	70,4466	37,3170	0,0000	0,0000	1,0000
Kempen	0,6652	0,6374	6,2907	9,2051	22,0115	0,8109	0,1888	0,0003
BaHa F47	0,9523	1,7451	3,5419	16,9054	26,0174	0,9987	0,0013	0,0000
BaHa F48	-0,1665	0,3956	11,2520	9,2504	14,9569	0,2579	0,7016	0,0405
OA 78.122	-2,4324	-3,0111	51,8681	12,9942	15,8444	0,0000	0,0000	0,1939
OA GR 151	-2,1663	1,8409	24,9394	28,4341	4,9112	0,0000	0,0000	0,9999
An 90.386m	2,3878	-0,3548	5,3168	5,6578	42,1256	0,5425	0,4575	0,0000
An 94.232	-2,3275	-1,9974	41,8278	11,9752	9,8228	0,0000	0,2542	0,7458
Salz1	4,2810	8,4138	44,4293	126,1793	129,5048	1,0000	0,0000	0,0000
Salz24	-6,7421	-2,5165	111,1535	61,7365	17,3147	0,0000	0,0000	1,0000
Salz4	4,0364	9,3929	57,4739	146,7507	141,6875	1,0000	0,0000	0,0000
Ble 980,59	3,9274	5,5802	14,6894	71,0159	87,7053	1,0000	0,0000	0,0000
Bie 130	5,7051	6,8330	32,5301	105,6529	133,1024	1,0000	0,0000	0,0000
H 232	6,0698	8,2532	50,7654	137,2723	159,9504	1,0000	0,0000	0,0000
H 177-a	2,5761	6,2742	19,1200	76,7459	75,3797	1,0000	0,0000	0,0000
H 177-b	-0,4551	8,4831	53,9948	120,1063	74,3272	1,0000	0,0000	0,0000
Gra-H	4,8520	7,4277	34,5587	109,8398	124,9505	1,0000	0,0000	0,0000
W-H	3,1151	2,4513	0,3772	27,1862	54,2960	1,0000	0,0000	0,0000
Kirch 162	2,1305	2,3774	0,7049	23,5086	40,9401	1,0000	0,0000	0,0000
Eng 198	-4,2443	-1,5824	62,1942	29,3182	4,9700	0,0000	0,0000	1,0000
X17701	8,4182	5,1560	41,8036	109,8954	175,2962	1,0000	0,0000	0,0000
X37542	-3,9300	-1,1066	54,7523	27,0183	3,0471	0,0000	0,0000	1,0000
X17892	3,6265	2,2007	0,7243	27,1450	61,0160	1,0000	0,0000	0,0000
X39444	1,8004	2,5600	1,4784	24,7110	37,6526	1,0000	0,0000	0,0000
X178111-b	-6,7685	-3,4286	120,5644	63,2634	24,0424	0,0000	0,0000	1,0000
X39957-a	3,0720	0,7990	1,292	13,835	50,414	0,9997	0,0000	0,0003

Abb. 1 a: Etagen der Säulen eines Lavastroms (verändert nach Grossenbacher & Mc Duffie 1995), b: Säulenbildung des Ettringer Lavastroms im Steinbruch *Ettringer Lay*.

Abb. 2: Basaltsäulen mit Striae.

Abb. 3: Übersichtskarte der römischen Abbaustellen der Eifel gemäß Hörter (1994). Große Punkte: größte Abbaustellen. Kleine geschlossene Punkte: sicher römische Abbaustellen. Offene Punkte: fragliche römische Abbaustellen (nach Mangartz 2008).

Abb. 4: Schemazeichnung der a) Keiltaschen, b) Keiltaschen in Keilrinne, c) Keiltaschen in Schalrinne (nach Mangartz 1998).

Abb. 5: Detailkarte 1 der südlichen Osteifel mit der Lage der untersuchten Abbaustellen (Kartenvorlage von Bogaard & Schmincke 1990).

Abb. 6: Detailkarte 2 der nördlichen Osteifel mit den untersuchten Abbaustellen. Zur Legende siehe Abb. 4 (Kartenvorlage von Bogaard & Schmincke 1990).

Abb. 7: Detailkarte 3 der Zentralfelds der Westeifel mit den untersuchten Abbaustellen (Kartenvorlage von Büchel 1994).

Abb. 8: Detailkarte 4 der Mosenberg-Vulkangruppe im Südwesten des Westeifeler Vulkanfeldes mit Lage der Abbaustelle. Legende siehe Abb. 6 (Kartenvorlage von Büchel 1994).

Abb. 9: Detailkarte 5 des Römerbergs im Südosten des Westeifeler Vulkanfeldes mit Lage der Abbaustelle. Legende siehe Abb. 6 (Kartenvorlage von Büchel 1994).

Abb. 10: Vermuteter Exportraum der Eifeler Mühlen (gelb) in Abgrenzung zum Exportraum des Massif Central (grün). Karte verändert nach Mangartz (2008).

Abb. 11: Schematische Darstellung einer Handmühle, a: Unterlieger, b: Oberlieger mit verzierter Oberseite und Unterseite mit schwalbenschwanzförmiger Aussparung für den Minehmer, c: Seitenansicht der kompletten Handmühle (verändert nach Hörter 1994 und Mangartz 2008).

Abb. 12: Schema einer langsam laufenden Kraftmühle pompejanischen Typs, a: sanduhrförmiger Läufer auf dem Unterlieger, der in eine Basis eingemauert ist und Querschnitt durch den Läufer, b: Mühle mit Hängewerk (verändert nach Baatz 1995, Buffone et al. 2003; Mangartz 2008), c: Nachbau im Archäologischen Park, Xanten.

Abb. 13: Schema der Kraftmühle des Typs „Haltern/ Rheingönheim“; a: Oberlieger mit seitlichen Eintiefungen für die Halterungen des Querbalkens; b: komplette Mühle (verändert nach Baatz 1995).

Abb. 14: Schema einer Schnelllaufende Kraftmühle, a: Läufer mit schwalbenschwanzförmiger Aussparung für Mitnehmer, b: Unterlieger, c: Mühle mit Mühlenachse und Getriebe (verändert nach Hörter 1994; Baatz 1995).

Abb. 15: Karte des West- und Zentraleuropäischen Vulkanismus in Verbindung mit den Hauptstörungssystemen und den variszischen Massiven (verändert, nach Wilson & Downes 1991).

Abb. 16: Probennahme an den Mühlsteinen. Vorige Seite a: Bohrung mit Wasserspülung, b: Herausbrechen des Bohrkerns. Diese Seite c: Bohrkern und Bohrloch.

Abb. 17: Restaurierung des Fragments der pompejanischen Mühle in Haltern; a: Silikonabdruck vor der Bohrung, b: das Fundstück nach der Restaurierung.

Abb. 18: Die römischen Steinbrüche der Ost- und Westeifel im TAS-Diagramm nach Le Bas et al. (1986).

Abb. 19a: MgO-Variationsdiagramm der Hauptelemente (Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2) der Phonotephrite und des Hochsimmers.

Abb. 19b: MgO-Variationsdiagramm der Hauptelemente (K_2O , Na_2O , CaO , P_2O_5) der Phonotephrite und des Hochsimmers.

Abb. 20a: MgO-Variationsdiagramm der Spurenelemente (Nb, Zr, Sr, Rb, Ba) der Phonotephrite und des Hochsimmers.

Abb. 20b: MgO-Variationsdiagramm der Spurenelemente (Zn, Ni, Co, Cr, V) der Phonotephrite und des Hochsimmers.

Abb. 21: P_2O_5 -Nb-Variationsdiagramm für die Phonotephrite und den Hochsimmernephelinit.

Abb. 22a: MgO-Variationsdiagramm der Hauptelemente (Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2) der Melanephelinite.

Abb. 22b: MgO-Variationsdiagramm der Hauptelemente (K_2O , Na_2O , CaO , P_2O_5) der Melanephelinite.

Abb. 23a: MgO-Variationsdiagramm der Spurenelemente (Nb, Zr, Sr, Rb, Ba) der Melanephelinite.

Abb. 23b: MgO-Variationsdiagramm der Spurenelemente (Ni, Co, Cr) der Melanephelinite (Legende wie in 23a).

Abb. 24: TiO_2 - CaO -Variationsdiagramm der Ost- und Westeifeler Melanephelinite.

Abb. 25: Pyrolit-normiertes Spurenelement-Variationsdiagramm; a: Osteifel-Phonotephrite und Foidit, b: Melanephelinite. Pyrolite-Zusammensetzung nach McDonough

& Sun (1995). Die Reihenfolge der Elemente, der empfohlene Pb-Wert zur Normalisierung aus Sun & McDonough (1989).

Abb. 26: Pyrolite-normierte REE-Werte, a: Osteifel-Laven, b: Melanephelinite. Pyrolite-Zusammensetzung aus McDonough & Sun (1995).

Abb. 27a: Resultat der Clusteranalyse der Phonotephrite/ Nephelinit.

Abb. 27b: Resultat der Clusteranalyse der Bellerberg-Phonotephrite.

Abb. 28: Resultat der Clusteranalyse der Melanephelinite. Die rot markierten Proben werden als Ausreißer identifiziert und von der folgenden statistischen Auswertung ausgeschlossen.

Abb. 29: Ergebnis der Diskriminanzanalyse der Bellerberg-Phonotephrite.

Abb. 30: Ergebnis der Diskriminanzanalyse der Melanephelinite.

Abb. 31 a: $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ -Zusammensetzung, b: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ -Zusammensetzung, c: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ -Zusammensetzung.

Abb. 32: Einordnung der Mülstein-Fundstücke (farbige Punkte) ins TAS-Diagramm. Zum Vergleich sind die Eifeler Abbaustellen (ungefüllte Kreise) angegeben. Anhand der rot markierten Mülsteinprobe soll die Problematik der Zuordnung demonstriert werden. Blaue Markierung: Clusteranalyse mit den Phonotephrit-Steinbrüchen. Hellblaue Markierung: Clusteranalyse mit den Melanephelinit-Steinbrüchen. Violette Markierung: Eifeler Herkunft ausgeschlossen, es wird keine Clusteranalyse vorgenommen.

Abb. 33 a-d: Hauptelement-Zusammensetzung der Mülstein-Fundstücke (blaue Markierung: Clusteranalyse mit Phonotephriten, hellblaue Markierung: Clusteranalyse mit Melanepheliniten, violette Markierung: Eifeler Herkunft nach TAS ausgeschlossen) im Vergleich zu den Eifeler Abbaustellen (schwarze Kreise).

Abb. 34 a-d (a und b vorige Seite): Spurenelementzusammensetzung der Mülsteine (blaue Markierung: Clusteranalyse mit Phonotephriten, hellblaue Markierung: Clusteranalyse mit Melanepheliniten, violette Markierung: Eifeler Herkunft nach TAS ausgeschlossen) im Vergleich zu den Eifeler Abbaustellen (schwarze Kreise).

Abb. 35: Clusteranalyse der „phonotephritischen“ Mülstein-Fundstücke; a: Clusteranalyse der Fundstücke mit den Abbaustellen der Bellerbergs, der Niedermendig-Lava und der Hochsimmer-Foidits, b (folgende Seite): Clusteranalyse der Fundstücke mit den Bellerberg-Phonotephriten.

Abb. 36: Resultate der Klassifizierung der Mülsteine über die Diskriminanzfunktionen. Die Zugehörigkeit der einzelnen Fundstücke wird durch die farbige

Markierung gekennzeichnet: rot: Mayener Grubenfeld, gelb: Ettringer Lay, orange: Kottenheimer Winfeld.

Abb 37 a-d: Vergleich der pompejanischen Mühle aus Carnuntum mit quartären Vulkaniten aus Zentral-Italien. Werte aus Vulsini, Vico und Sabatini aus Antonelli et al. (2003), Werte „Orvieto allg.“ aus Buffone et al. (1999).

Abb. 38a-d: Die drei Mühlsteinfragmente aus Niederösterreich im Vergleich mit Laven aus dem Pannonischen Becken. Vergleichswerte aus der Datenbasis zusammengestellt von Lustrino & Wilson (2007), Literaturverweise dort.

Abb. 39a: TAS-Diagramm der Mühlsteine aus Frankreich und Laven des Massif Central. Cantal:(Vatin-Perignon et al. 1980), Wilson et al. (1995), (Caroff et al. 1997), (Legendre et al. 2001). Devès: (Liotard et al. 1988; Liotard et al. 1983). Chaîne des Puys: (Maury et al. 1980; Maury & Brousse 1978; Gourgaud & Camus 1984; Liotard et al. 1988; Hamelin et al. 2009) Williams-Thorpe (1988), Williams-Thorpe and Thorpe (1988), (Miallier et al. 2004). Puy de Dome: (Magonthier 1975). Mont Dore: Maury and Brousse (1978), (Gourgaud & Villemant 1992). Velay: (Villemant & Treuil 1983), Liotard et al. (1988). Die blaue Markierung kennzeichnet die Laven des Puy de la Nugère bei Volvic.

Abb. 39b: Verteilung von CaO und Al₂O₃ im Vergleich zu den Laven des Massif Central (wie unter Abb. 42a zitiert).

Abb. 39c: Verteilung von SiO₂ und MgO im Vergleich zu den Laven des Massif Central (wie unter Abb. 39a zitiert).

Abb. 39 d-e: Mühlsteine im Vergleich zu den Laven der Chaîne des Puys (Werte von Hamelin et al. 2009) und des Cantal (wie unter 38a zitiert), d: Verteilung von Rb und SiO₂, e: Verteilung von Zr und Nb.

Abb. 40a: Lage der Mühlstein-Proben aus Salzkotten, Anreppen und von der Saalburg im TAS-Diagramm im Vergleich zu Laven des Vogelsbergs (Werte aus Haase et al. 2004; Jung & Masberg 1998; Bogaard & Wörner 2003).

Abb. 40b: Zr-P₂O₅-Diskriminationsdiagramm für Basalte nach Winchester & Floyd (1976), das die tholeiitischen von den alkalischen Basalten unterscheidet. Vogelsberg-Werte wie unter Abb. 40a.

Abb. 40 c-d: Zr- und Nb- bzw. Rb- und MgO-Werte der Mühlen im Vergleich zu den Vogelsberg-Laven. (Werte wie unter 40a).

Abb. 41a: Die Xantener Mühle X17811i1-a im Vergleich mit den Laven des Bellerbergs und dem Niedermendiger Lavastrom sowie mit Laven des Monte Vulture.

Werte Mt. Vulture von (De Astis et al. 2006; Beccaluva et al. 2002; De Fino et al. 1982; Melluso et al. 1996).

Abb. 41 b-e: Haupt-(b und c, vorige Seite) und Spurenelemente der Xantener Mühle X17811i1-a im Vergleich mit denen der Laven des Bellerbergs und dem Niedermendiger Lavastrom sowie der Laven des Monte Vulture. Werte Mt. Vulture wie unter Abb. 43a zitiert.

Abb. 42: Herkunft der untersuchten Mühlsteine. Kartengrundlage nach Mangartz (2008). Orange-farbene Punkte: römische Lokationen mit Eifeler Mühlen. Grüne Punkte: römische Lokationen mit Mühlen aus der Chaîne des Puys bzw. dem Massif Central. Violetter Punkt: Mühlstein aus Orvieto. Fragezeichen: Mühlsteine fraglicher Herkunft. Orange-farbene Kreise: mittelalterliche Mühlen. Gelbe Punkte: Wichtige Lokationen, deren Mühlsteine nicht beprobt wurden. Schwarz gefüllte Quadrate: lokale Abbaustellen.

Abb. 43: Übersichtskarte der untersuchten Laven. Römischen Abbaustellen der Eifel gemäß Hörter (1994) und Mangartz (2008), Signaturen siehe Abb. 3. Rote offene Punkte: weitere primitive Laven aus Ost- und Westeifel, herangezogen zur petrologischen Untersuchung.

Abb. 44: Differentiationstrend der Osteifel-Laven.

Abb. 45: Variation der Osteifel-Melanephelinite, Foidite und Phonotephrite in Nb und Zr.

Abb. 46: Variation der primitiven Laven der Westeifel in Nb und Zr.

Abb. 47: Pyrolite-normiertes Spurenelement-Variationsdiagramm; a: Osteifel-Phonotephrite, Foidit und Melanephelinite, b: Melanephelinite. Pyrolite-Zusammensetzung nach (McDonough & Sun 1995). Die Reihenfolge der Elemente, der empfohlene Pb-Wert zur Normalisierung sowie die Zusammensetzung von E-MORB und OIB aus (Sun & McDonough 1989).

Abb. 48: Pyrolite-normierte REE-Werte, a: Osteifel-Laven, b: Westeifel-Laven. Pyrolite-Zusammensetzung aus McDonough & Sun (1995). E-MORB und OIB aus Sun & McDonough (1989).

Abb. 49: Rb/Nb gegen K/Nb für die Abbaustellen sowie weitere Proben aus Ost- und Westeifel, nach Wilson & Downes (1991).

Abb. 50: Schmelzmodelle nach Baker et al. (1997); a: Variation von Zr/Nb gegen Ce/Y für die Laven der Eifeler Abbaustellen. Die Schmelzkurven stellen nicht-modale, fraktionierte Schmelze für Spinell- und Granat-Lherzololith primitiver Zusammen-

setzung dar. b: Variation von La/Yb gegen Yb bzw. in c: gegen Dy/Yb. Die Schmelzkurven in b und c stellen nicht-modale, fraktionierte Schmelze einer angereicherten Mantelquelle im Spinell- und Granat-Lherzolith-Feld dar. Symbole wie unter Abb. 49.

Abb. 51: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ gegen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ für die Osteifel-Laven von *Hohe Buche* und *Mauerley* und die Westeifel-Laven von *Dietzenley* und *Goosberg*. Im Vergleich dazu Werte aus Hegau und Urach (Wilson et al. 1995b), Ost- und Westeifel (Wörner et al. 1986), Vogelsberg (Bogaard & Wörner 2003), Hocheifel (Jung et al. 2006; Fekiacova et al. 2007a), Westerwald (Haase et al. 2004). Lage der Mantel-Endglieder nach (Zindler & Hart 1986), EAR nach (Wilson & Bianchini 1999), LVC nach (Hoernle et al. 1995), FOZO nach (Stracke et al. 2005).

Abb. 52 a: $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ bzw. b: $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ gegen $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. NHRL nach Hart (1984), die übrigen Angaben wie Abb. 51.

Abb. 53: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ gegen $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Vergleichslaven und Mantelkomponenten wie in Abb. 53.

Abb. 54: Diagramme von a) Ba/Nb gegen Ba/La und b) Rb/Nb gegen Ba/Th für OIB-Endglieder nach Weaver (1991) im Vergleich zu den primitiven Ost- und Westeifelmagmen; Mauerley, Hohe Buche, Dietzenley und Goosberg sind herausgehoben.