

MÜHLEN FÜR DAS RÖMISCHE MILITÄR

GEOCHEMISCHE HERKUNFTSANALYSEN VON MÜHLSTEINEN AUS DEN AUGUSTEISCHEN LAGERN HALTERN, OBERADEN, ANREPPEN UND BARKHAUSEN

Das quartäre Vulkangebiet der Eifel gilt als wichtige Quelle für »basaltische« Rohstoffe, die dort seit dem Neolithikum bis heute abgebaut werden. Geländeerkundungen von F. Hörter (1994) zeigten, dass im gesamten Vulkangebiet der West- und Osteifel römische Steinbrüche unterschiedlicher Größenordnung liegen. Insbesondere die Lavaströme des Bellerbergvulkans bei Mayen (Abb. 1) sind der archäologischen Forschung als vorrömische und römische Abbaustellen für Mühlsteine wohl bekannt (zuletzt Mangartz 2008). Trotz der ausführlichen archäologischen Forschung wurden bislang keine archäometrischen Studien zu den römischen Steinbrüchen der Eifel vorgelegt, und es existieren weder umfassende geochemische Untersuchungen der vulkanischen Rohstoffe noch von römischen Mühlsteinfunden in Mitteleuropa¹. Archäometrische Analysen römischer Mühlsteine sind hauptsächlich auf den Mittelmeerraum beschränkt (Peacock 1980; 1986; Williams-Thorpe 1988; Williams-Thorpe / Thorpe 1989; 1990; 1991-b; 1993; Volterra / Hancock 1994; Renzulli u.a. 2002; Antonelli / Nappi / Lazzarini 2003; Buffone u.a. 2003); nur eine Studie widmet sich der Provenienzanalyse dreier Eselmühlen, die im römischen Britannien entdeckt wurden (Williams-Thorpe / Thorpe 1988). Um diese Forschungslücke zu füllen, beschäftigte sich die Autorin im Rahmen ihrer Dissertation (Gluhak 2010) mit der Provenienzanalyse römischer Mühlsteine im Europa nördlich der Alpen². Die Grundvoraussetzung, um einen Mühlstein vermuteten Eifeler Ursprungs seiner Abbaustelle genau und verlässlich zuordnen zu können, ist eine eindeutige Charakterisierung aller in Frage kommenden Ausgangsgesteine der Eifel, wobei geologische und geochemische Unterschiede innerhalb der quartären Eifel in Betracht gezogen werden müssen. Des Weiteren ist die eindeutige Zuordnung eines Fundstücks zu seiner exakten Abbaustelle nur möglich, wenn die Eifeler Steinbrüche untereinander deutliche geochemi-

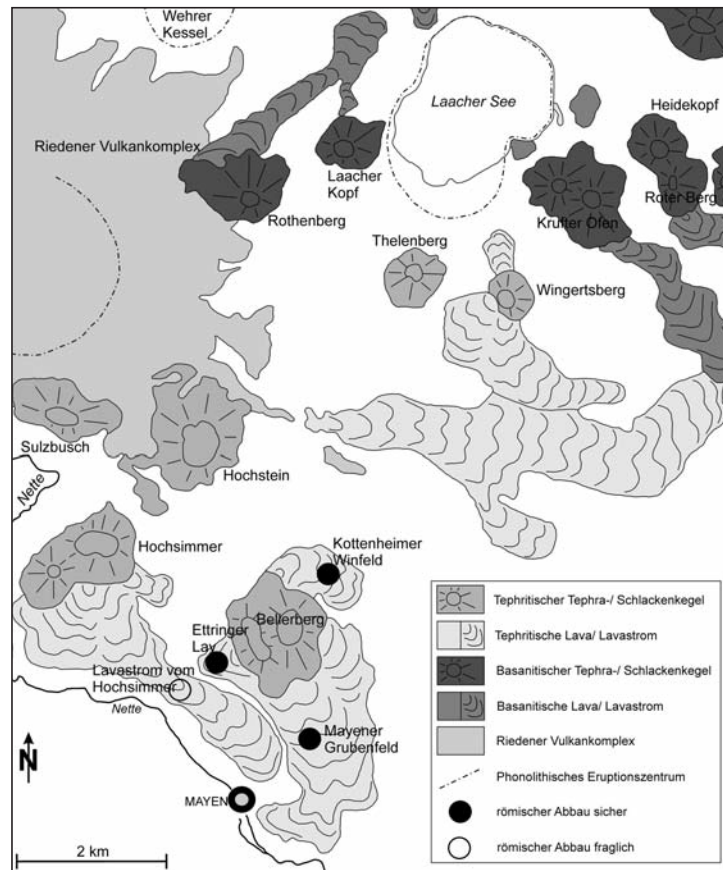


Abb. 1 Schematische Karte der Vulkanbauten der südlichen Osteifel. – (Nach van den Bogaard / Schmincke 1990; verändert).

sche Unterschiede zeigen, sich aber von Abbaustellen anderer Regionen, wie z.B. den Vulkaniten des Massif Central in Frankreich, eindeutig abgrenzen lassen.

Die Arbeiten zur Analyse und Differenzierung der römischen Steinbrüche der Eifel sind abgeschlossen, die Ergebnisse publiziert (Gluhak / Hofmeister 2009). Somit steht eine geochemische Datenbank über die Abbaustellen zur Verfügung, um die Mühlsteinfundstücke anhand ihrer geochemischen Zusammensetzung ihren Abbaustellen exakt zuzuordnen. Auf Grundlage der an den Steinbrüchen gewonnenen Ergebnisse werden in der vorliegenden Studie die Resultate der Analysen von jeweils zwei Mühlsteinen bzw. Mühlsteinfragmenten aus den römischen Lagern von Haltern (Haltern 1 und 2), Oberaden (Oberaden 1 und 2) und Anreppen (Anreppen 1 und 2) sowie von einem vermuteten Marschläger in Barkhausen (Barkhausen 1 und 2) vorgestellt³. Die Auswahl dieser Fundstücke wurde getroffen, da durch die Zuordnung der gut datierten Funde zu den entsprechenden Steinbrüchen im Falle einer Eifeler Provenienz der Beginn römischer Abbautätigkeit in der Region genauer erfasst werden kann⁴.

METHODEN UND AUSWERTUNG

Grundlage der Provenienzanalyse der Mühlsteinfundstücke ist die geochemische Analyse aller bekannten römischen Steinbrüche der Ost- und Westeifel. Um Inhomogenitäten und mögliche chemische Unterschiede im Material zu erfassen, wurden mindestens zehn Proben pro Abbaustelle genommen; insgesamt wurden 168 Proben herangezogen (Gluhak / Hofmeister 2009). Es erwies sich, dass die Messungen der Haupt- und Spurenelemente mittels Röntgenfluoreszenzanalyse Daten liefern, die zur Unterscheidung der einzelnen Steinbrüche sehr gut geeignet sind⁵; damit konzentriert sich auch die vorliegende Untersuchung der Fundstücke auf die geochemische Zusammensetzung der Proben. Den Mühlsteinfundstücken aus Haltern, Oberaden, Anreppen und Barkhausen wurde mittels Diamanthohlbohrer ein Bohrkern entnommen, der entsprechend den Geländeproben aufbereitet und analysiert wurde. Die Bestimmung der Haupt- und Spurenelemente erfolgte ebenfalls mittels Röntgenfluoreszenzanalyse⁶. Die Konzentrationen und der analytische Fehler sind in **Tabelle 1** angegeben. Die Auswertung der Analysedaten fand in drei Schritten statt (Gluhak / Hofmeister 2009).

Geochemische Auswertung

Die standardisierten Werte der Steinbrüche werden in ein geeignetes Diagramm zur geochemischen Charakterisierung eingetragen, um den Gesteinstyp zu bestimmen. Für vulkanische Gesteine bietet sich hierzu das TAS (Total Alkali Silica)-Diagramm nach Le Bas und Kollegen (1986) an (**Abb. 2**). Im Diagramm wird deutlich, dass die Eifeler Steinbruchproben zwei auffällig unterschiedliche Gruppen bilden: Die siliziumreichere Gruppe liegt im Phonotephritfeld des Diagramms, die siliziumärmere Gruppe zeichnet sich am Übergang vom Foiditen zum Basanit ab. Die Phonotephritgruppe besteht ausschließlich aus den Lavaströmen des Bellerberges mit den Steinbrucharealen Mayener Grubenfeld, Ettringer Lay und Kottenheimer Winfeld, die Foidit/Basanit-Gruppe umfasst alle Steinbrüche aus der Westeifel sowie Hohe Buche und Mauerley aus der Osteifel. Jeweils beide Proben aus Haltern, Anreppen und Barkhausen sowie die Probe aus Oberaden 2 liegen im Bereich der Phonotephrite. Die Probe Oberaden 1 liegt jedoch im Übergangsbereich zu basaltischem Trachyandesit, einem Vulkanit, der typisch für Laven des Massif Central ist. Damit ist jedoch keine eindeutige Zuordnung der Mühlsteinfundstücke erreicht, denn es muss beachtet werden, dass andere vulkanische Gesteine in Europa, die ebenfalls nachweisbar zur Mühlenproduktion

	Haltern 1	Haltern 2	Oberaden 1	Oberaden 2	Anreppen 1	Anreppen 2	Barkhausen 1	Barkhausen 2	Messfehler*
Gewichtsprozent									%
SiO ₂	48,70	50,40	50,00	49,91	49,76	49,22	48,57	49,26	0,4
TiO ₂	2,07	1,19	2,12	1,90	1,95	1,97	2,06	2,03	1,4
Al ₂ O ₃	16,77	17,12	16,27	17,10	17,00	16,92	16,71	16,31	1,1
Fe ₂ O ₃	8,43	7,67	8,87	7,89	7,96	8,15	8,47	8,94	1
MnO	0,18	0,18	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	3,5
MgO	4,91	4,43	5,31	4,51	4,59	4,58	4,85	5,78	0,5
CaO	9,04	8,04	9,13	8,38	8,45	8,74	9,10	9,19	1
Na ₂ O	5,09	5,36	4,07	5,28	5,08	5,24	5,10	4,32	1,3
K ₂ O	4,33	4,54	3,61	4,43	4,59	4,53	4,47	3,53	0,9
P ₂ O ₅	0,46	0,40	0,44	0,41	0,43	0,45	0,47	0,44	1,3
Summe	99,98	99,34	100,00	99,98	99,99	99,99	99,98	99,98	
Glühverlust	0,47	0,85	0,96	0,82	0,73	0,54	0,52	0,91	
ppm									
Sc	19	15	23	17	19	17	19	19	5
V	227	189	235	206	213	222	243	233	2,6
Cr	47	43	76	51	45	42	48	96	2,4
Co	29	29	37	25	32	34	34	30	4,7
Ni	39	34	54	39	39	33	34	66	2,9
Cu	38	36	45	31	33	30	29	33	2,9
Zn	91	94	89	92	93	92	87	94	1,6
Ga	20	21	20	22	22	22	20	20	2,6
Rb	139	152	122	151	149	149	139	123	2,4
Sr	939	848	1002	921	916	982	978	1026	1,3
Y	27	25	28	26	26	26	26	27	0,9
Zr	388	410	329	407	404	401	381	342	1,4
Nb	109	107	93	107	107	110	107	95	1,2
Ba	1079	1017	1194	1022	1025	1076	1078	1136	2,8

Tab. 1 Haupt- und Spurenelementzusammensetzung der Mühlsteinfundstücke. – * Messfehler als »relative root mean square« (RMS rel.).

genutzt wurden, aufgrund ähnlicher geochemischer Eigenschaften in denselben Feldern wie die Eifelvulkanite liegen können. So zeichnen sich beispielsweise Magmen aus dem Massif Central in Frankreich im selben Feld wie die Eifeler Foidite/Basanite oder Magmen vom Vulture-Vulkan in Italien im selben Bereich wie die Osteifeler Phonotephrite ab. Demnach muss ein Mülsteinfundstück, das im TAS-Diagramm (oder in einem anderen geochemischen bivariaten Diagramm) im selben Bereich wie die Eifeler Laven liegt, nicht notwendigerweise aus der Eifel kommen. Auf Basis der geochemischen Werte lässt sich also lediglich feststellen, dass, wenn die untersuchten Mülsteine tatsächlich ihren Ursprung in der Eifel haben, sie zur Gruppe der Eifelphonotephrite gehören müssen.

Um eine weitere Differenzierung der Abbaustellen vorzunehmen, werden die folgenden multivariaten Analysemethoden auf die beiden Untergruppen der Phonotephrite und Foidite/Basanite getrennt angewendet⁷. Entsprechend dieser Differenzierung der Abbaustellen erfolgt die Zuordnung der Fundstücke. Die Mülsteinmesswerte werden entsprechend den Steinbruchdaten transformiert⁸. Alle multivariaten Analysen wurden mit dem Statistikprogramm SPSS 16.0 durchgeführt.

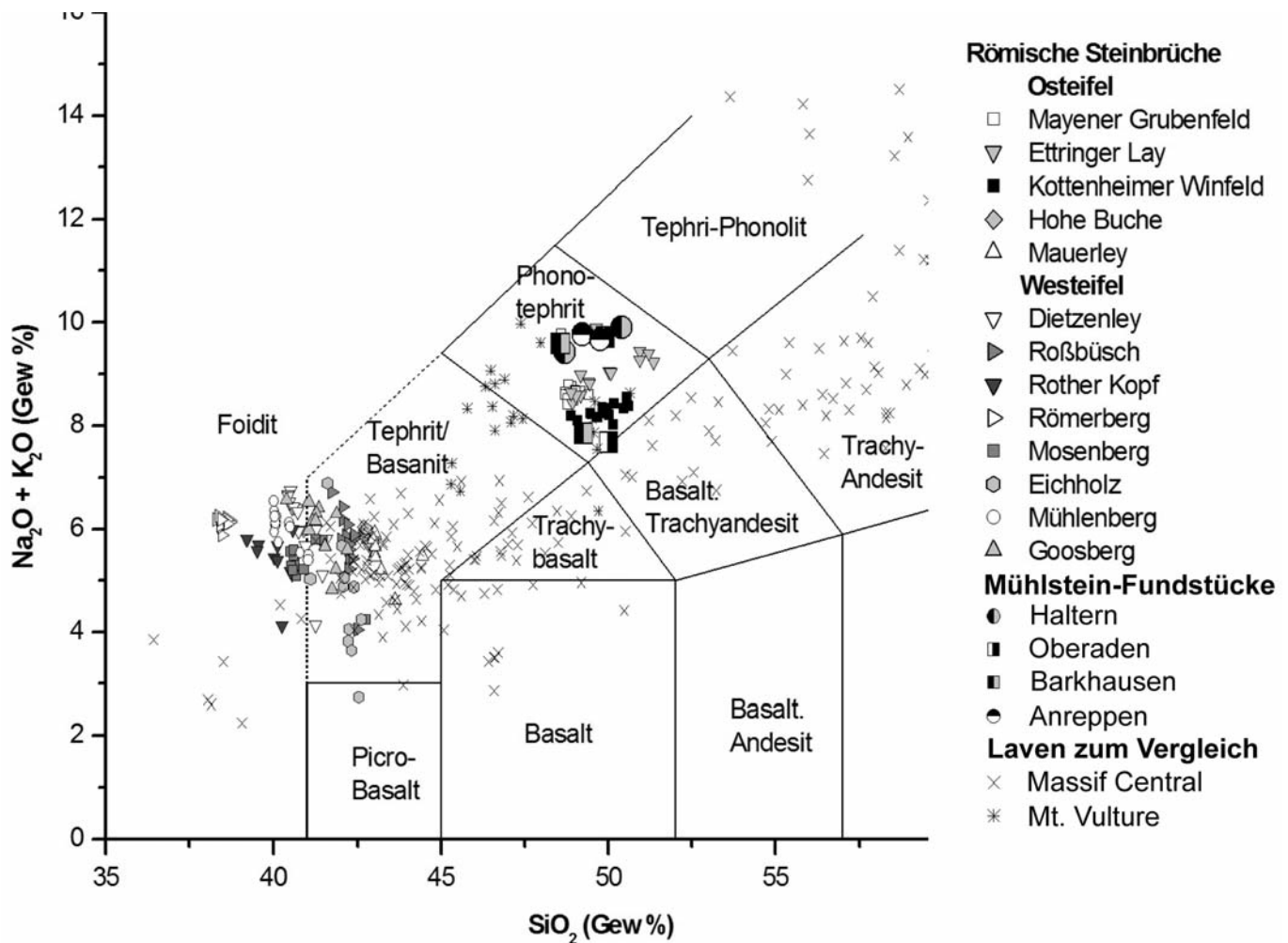


Abb. 2 TAS-Diagramm mit den römischen Lavasteinbrüchen der Eifel (Gluhak / Hofmeister 2009) und den Mühlensteinfundstücken. Zum Vergleich sind Laven aus dem Massif Central/F (Hernandez 1973; Magonthier 1975; Maury / Brousse 1978; Maury u.a. 1980; Vatin-Perignon / Maury / Milesi 1980; Liotard u.a. 1983; Villemant / Treuil 1983; Gourgaud / Camus 1984; Liotard / Briot / Boivin 1988; Williams-Thorpe 1988; Williams-Thorpe / Thorpe 1988; Briot u.a. 1991; Gourgaud / Villemant 1992; Wilson / Downes / Cebriá 1995; Lenoir u.a. 2000; Legendre u.a. 2001; Miallier u.a. 2004) und vom Mt. Vulture/I (De Fino / La Volpe / Piccarreta 1982; Melluso / Morra / Di Girolamo 1996; Beccaluva u.a. 2002) angegeben.

Clusteranalyse

In der Clusteranalyse werden die Steinbruchproben »neutral« behandelt – als seien sie von unbekannter Herkunft. Die Clusteranalyse untersucht die heterogene Gesamtheit der Geländeproben mit dem Ziel, homogene Gruppen zu identifizieren. Diese homogenen Gruppen müssen die einzelnen Abbaustellen repräsentieren, d.h. die resultierende Anzahl der Cluster muss der Anzahl der Abbaustellen entsprechen. Die »neutrale« Herangehensweise mittels Clusteranalyse ist wichtig für die Mühlensteinzuordnung, denn die Fundstückprobe muss immer so behandelt werden, als sei ihre Herkunft unbekannt. Anhand der Clusteranalyse kann überprüft werden, ob die Mühlensteinprobe einem existierenden Steinbruchprobencluster zugeordnet werden kann oder ob sie ein eigenes Cluster bildet. Ist Letzteres der Fall, muss davon ausgegangen werden, dass die Mühlensteinprobe keinem der untersuchten Steinbrüche zugeordnet werden kann und nicht aus dem Gebiet der Eifel stammt.

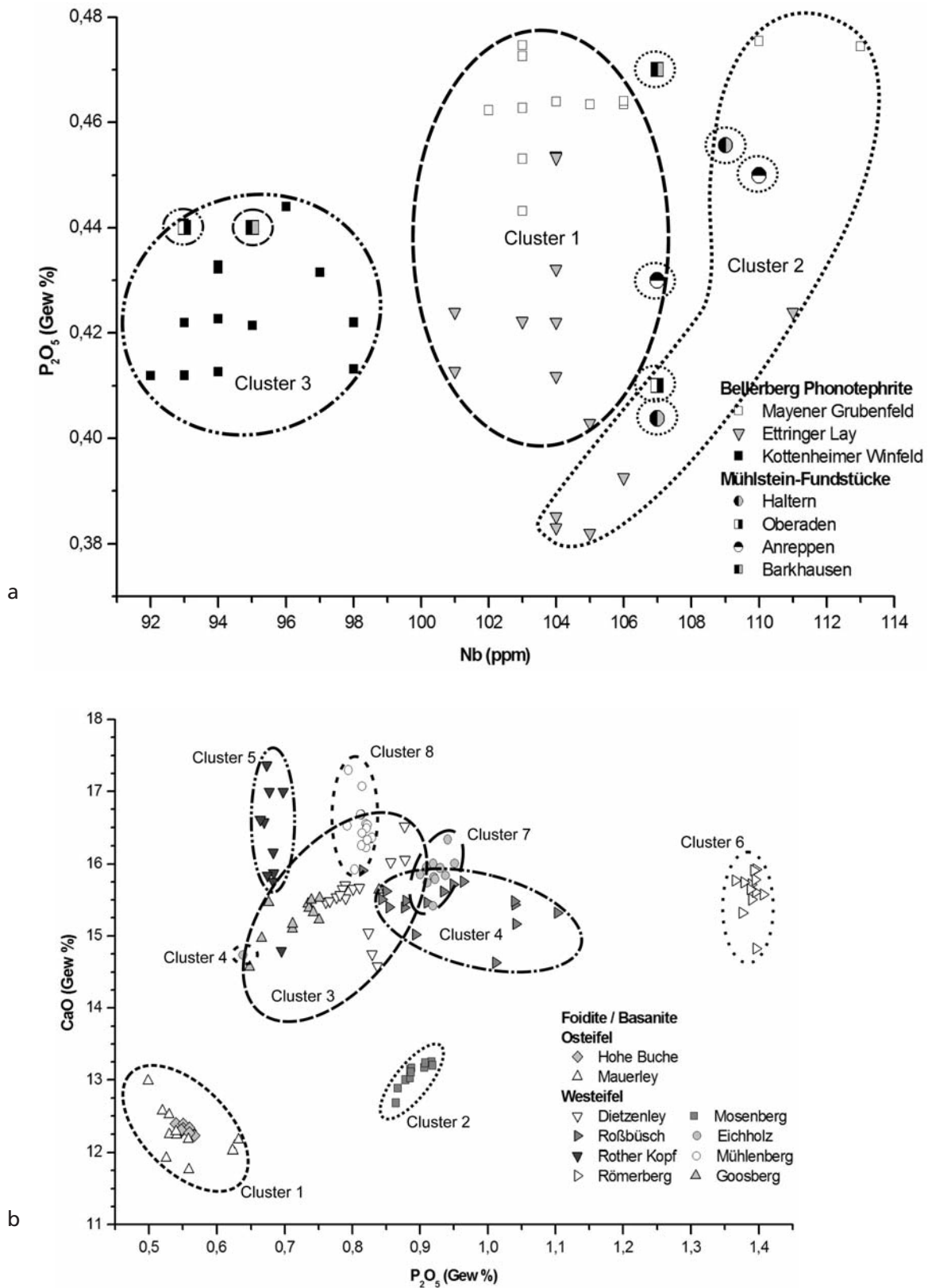


Abb. 3 a Ergebnisse der Clusteranalyse der Bellerberg-Phonotephrite und der Mülsteinfundstücke, dargestellt im Rahmen der P_2O_5 - und Nb-Zusammensetzung. – b Die Ergebnisse der Clusteranalyse der Foidite/Basanite, dargestellt im Rahmen der CaO- und P_2O_5 -Zusammensetzung. – (Nach Gluhak / Hofmeister 2009).

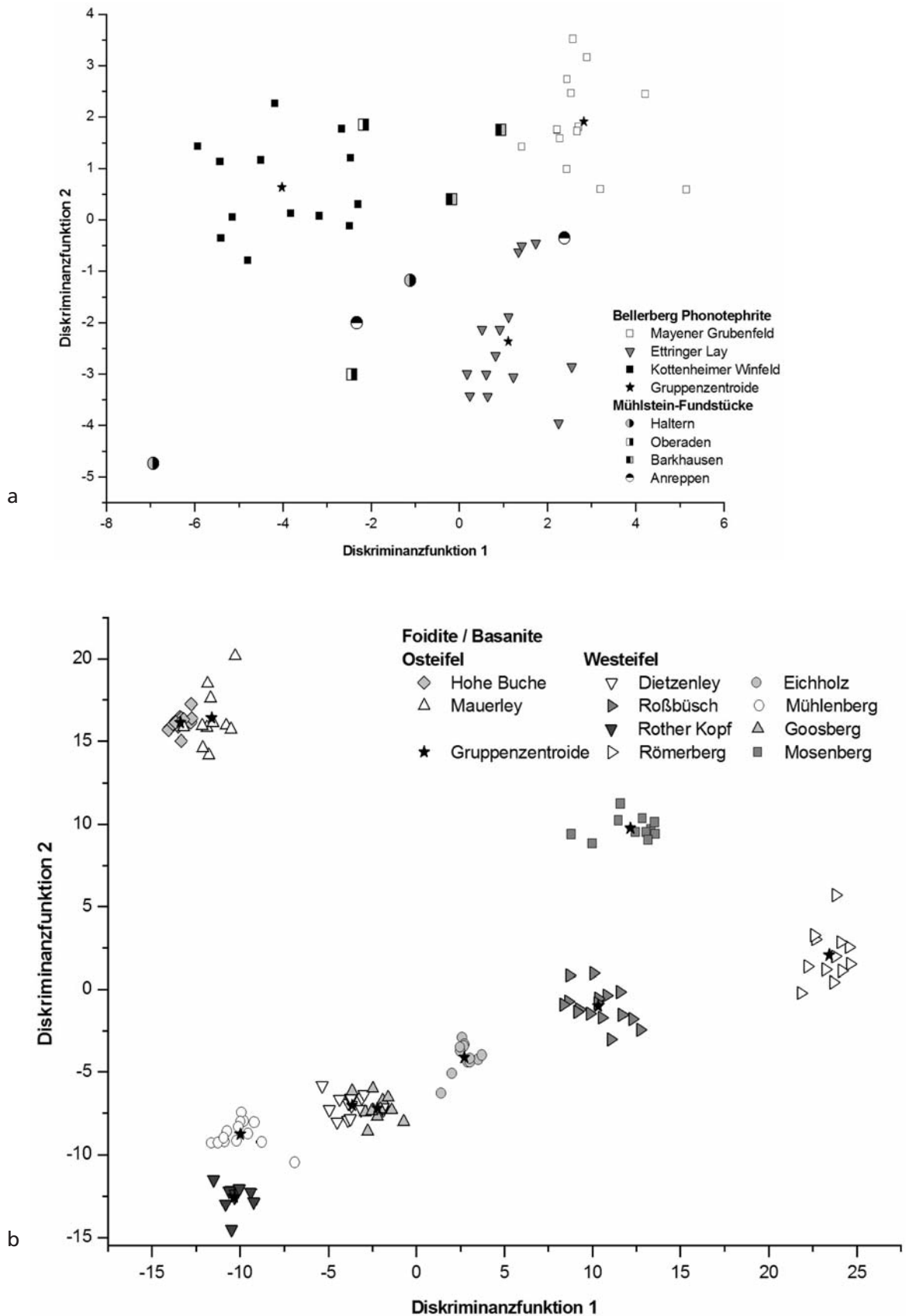


Abb. 4 a Ergebnisse der Diskriminanzanalyse der Bellerberg-Phonotephrite. Über die Errechnung der quadrierten Distanzen zu den einzelnen Gruppenzentroiden ergibt sich die Zuordnung zur Abbaustelle. – b Ergebnisse der Diskriminanzanalyse der Foidite/Basanite. – (Nach Gluhak / Hofmeister 2009).

Als Abstandsmaß dient die quadrierte Euklidische Distanz, der Ward-Algorithmus als Clustermethode. Die Resultate der Clusteranalyse sind in den **Abbildungen 3a** (Phonotephritgruppe) und **3b** (Foidit/Basanit-Gruppe) dargestellt. Im Fall der 40 Proben der Phonotephritgruppe sollten drei Cluster entsprechend den drei Bellerberg-Lavaströmen resultieren; es gelingt der Clusteranalyse jedoch nicht, zwischen Mayener Grubenfeld und Ettringer Lay zu unterscheiden. Das Kottenheimer Winfeld wird aber als eigenes Cluster erkannt. In der Foidit/Basanit-Gruppe wird überprüft, ob die Zuordnung der 128 Proben in zehn Cluster entsprechend den zehn foiditisch-basanitischen Abbaustellen möglich ist. Die Clusteranalyse erkennt erst auf dem Niveau von acht gebildeten Clustern sechs der Steinbrüche korrekt, die beiden Osteifelsteinbrüche Hohe Buche und Mauerley einerseits und die Westeifelsteinbrüche Dietzenley und Goosberg andererseits werden jeweils zu einem Cluster zusammengefasst.

Jede Mühlsteinprobe muss einzeln mit der in Frage kommenden Steinbruchgruppe gruppiert werden. In unserem Fall werden die einzelnen Fundstücke gemäß der Zuordnung im TAS-Diagramm zusammen mit den Proben der Phonotephritgruppe geclustert (**Abb. 3a**). Die beiden Halterner Proben, beide Proben aus Anreppen sowie Oberaden 2 und Barkhausen 1 werden Cluster 2, d.h. dem Mayener oder dem Ettringer Lay, zugeordnet; die Probe Oberaden 1 gehört zu Cluster 3, d.h. dem Kottenheimer Winfeld, die Probe Barkhausen 2 zu Cluster 1, d.h. ebenfalls entweder zum Mayener oder Ettringer Lay. Anhand der Clusteranalyse lässt sich damit bereits zeigen, dass alle Proben aus den Eifeler Phonotephriten des Bellerbergs hergestellt worden sind, da sie jeweils eigene Cluster bilden würden, wenn sie aus einem völlig anderen Vulkanit bestünden.

Diskriminanzanalyse

Die Diskriminanzanalyse stellt ein ergänzendes hilfreiches Werkzeug dar, um die Herkunft eines Fundstücks weiter einzuschränken, da es anhand der Clusteranalyse nicht möglich ist, bestimmte Steinbrüche voneinander zu unterscheiden. Mittels Diskriminanzanalyse wird die Zuordnung einer Probe zu einem »bekannten« Steinbruch überprüft. Die vorbestimmten Gruppen entsprechen den einzelnen Steinbrüchen, d.h. jeder einzelnen Steinbruchprobe wird vor Errechnung des Diskriminanzmodells die Gruppenzugehörigkeit zugewiesen. Die Diskriminanzanalyse untersucht nun, ob sich diese Gruppen signifikant voneinander unterscheiden und welche Variablen für diese Differenzierung geeignet sind. Aus der Diskriminanzanalyse der Steinbruchproben resultiert für jede Gruppe ein Gruppenzentrum und eine Diskriminanzfunktion, die im Folgenden zur genauen Zuordnung eines Mühlsteinfundstücks zu seiner Abbaustelle herangezogen werden. Damit können die mittels der Clusteranalyse erzielten Resultate überprüft und bei uneindeutiger Clusterzuordnung eine genaue Herkunftsbestimmung mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit vorgenommen werden. Dies trifft auf alle hier untersuchten Mühlen zu, die entweder dem Mayener oder Ettringer Lay zugeordnet werden – außer auf die Mühle aus Oberaden 1, die bereits in der Clusteranalyse dem Kottenheimer Winfeld zugewiesen wird.

Das Verfahren der schrittweisen Diskriminanzanalyse wird verwendet, da es nur die Variablen einbezieht, die signifikant zur Verbesserung des Diskriminanzmodells beitragen⁹. Die Diskriminanzanalyse der Bellerberg-Phonotephrite (**Abb. 4a**) erbrachte eine korrekte Zuordnung von 100% der ursprünglich gruppierten Fälle, die Kreuzvalidierung erzielte 97,5% korrekte Klassifizierungen. Nb, P₂O₅, Sr, Rb und Zn wurden in die Diskriminanzfunktion aufgenommen. Die Diskriminanzanalyse der Foidite/Basanite (**Abb. 4b**) resultierte in einer korrekten Klassifizierung von 99,2% der gruppierten Fälle, die Kreuzvalidierung ordnete 97,6% der Fälle richtig zu. Variablen in der Diskriminanzfunktion sind SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, CaO, P₂O₅, Cr, Ni, Cu, Sr, Y, Zr, Nb und Ba.

Kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten		
	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
(Konstante)	-533,590	96,882
Funktionen bei den Gruppenzentroiden		
Gruppe	Funktion	
	1	2
1 (Mayener Grubenfeld)	2,827	1,909
2 (Ettringer Lay)	1,114	-2,363
3 (Kottenheimer Winfeld)	-4,026	0,636

Tab. 2a Resultierende Diskriminanzfunktionskoeffizienten (nicht standardisiert) und Gruppenzentroide zur Zuordnung eines Mühlesteinfundstücks zu den Bellerberg-Phonotephriten. – (Nach Gluhak / Hofmeister 2009).

Die transformierten Mühlesteinmesswerte werden dann in die Diskriminanzfunktionen eingesetzt, und die quadrierte Distanz der Mühlesteinprobe zu den Gruppenzentroiden der einzelnen Steinbruchproben wird errechnet (vgl. **Tab. 2a** für Phonotephrite; **Tab. 2b** für Foidite/Basanite; aus Gluhak / Hofmeister 2009). Die unbekannte Probe wird nun der Steinbruchgruppe zugeordnet, zu der die quadrierte Distanz am geringsten ist. Da in dem hier vorliegenden Fall die untersuchten Mühlesteinproben im TAS-Diagramm der Phonotephritgruppe zugewiesen wurden und die Clusteranalyse eine entsprechende Herkunft bestätigt, wird für diese Fälle die Diskriminanzfunktion der Phonotephrite herangezogen. Es ergeben sich folgende Provenienzen mit entsprechenden Wahrscheinlichkeiten:

Kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten			
	Funktion		
	1	2	3
SiO ₂	-40,02	-20,81	-179,37
TiO ₂	56,50	-6,63	163,12
Al ₂ O ₃	37,13	134,95	-27,56
Fe ₂ O ₃	-235,71	-98,95	-15,16
MgO	31,38	92,37	-32,18
CaO	-4,33	-51,17	-21,71
P ₂ O ₅	50,63	8,36	17,48
Cr	1,81	-14,90	-11,59
Ni	9,52	6,82	30,04
Cu	-0,51	-4,56	-0,59
Sr	-2,14	10,02	8,47
Y	17,29	17,88	5,54
Zr	-33,71	29,69	-12,96
Nb	31,44	-44,06	-10,78
Ba	-6,07	-4,66	-7,67
(Konstante)	224,16	-28,53	331,01
Funktionen bei den Gruppenzentroiden			
Gruppe	Funktion		
	1	2	3
1 (Hohe Buche)	-13,39	16,13	-0,26
2 (Mauerley)	-11,61	16,39	-0,76
3 (Dietzenley)	-3,66	-7,03	1,97
4 (Roßbüsch)	10,33	-1,01	-10,70
5 (Rother Kopf)	-10,32	-12,55	1,70
6 (Römerberg)	23,43	2,07	7,24
7 (Mosenberg)	12,16	9,76	5,32
8 (Eichholz)	2,72	-4,12	-8,37
9 (Mühlenberg)	-9,98	-8,78	3,28
10 (Goosberg)	-2,23	-7,21	3,76

Tab. 2b Resultierende Diskriminanzfunktionskoeffizienten (nicht standardisiert) und Gruppenzentroide zur Zuordnung eines Mühlesteinfundstücks zu den Foiditen/Basaniten. – (Nach Gluhak / Hofmeister 2009).

Die Handmühle Haltern 1 wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 93,8% der Ettringer Lay zugeordnet. Die pompejanische Mühle Haltern 2 sowie die Oberadener Mühle 1 stammen zu 100% aus dem Kottenheimer Winfeld. Die Mühle Oberaden 2 stammt zu 80,6% aus der Ettringer Lay und zu 19,4% aus dem Kottenheimer Winfeld. Der Mühlstein Barkhausen 1 wurde zu 99,9% aus der Lava des Mayener Grubenfelds hergestellt, Barkhausen 2 zu 25,8% aus der des Mayener Grubenfelds und zu 70,2% aus der Lava der Ettringer Lay. Die Anreppen-Mühle 2 stammt zu 54,3% aus dem Mayener Grubenfeld und zu 45,8% aus der Ettringer Lay, die Anreppen-Mühle 1 zu 74,6% aus dem Kottenheimer Winfeld und zu 25,4% aus der Ettringer Lay.

SCHLUSSFOLGERUNG

Anhand der vorgestellten Methode konnte die genaue Herkunft der gut datierten Fundstücke aus den Römerlagern Haltern, Oberaden, Anreppen und Barkhausen ermittelt werden; damit ist der Beginn römischer Abbautätigkeit in den Lavaströmen des Mayener Bellerberges für den Zeitraum 11 v. Chr. bis 9/16 n. Chr. insbesondere durch die Fundstücke aus Haltern und Oberaden gesichert. Der geochemische Datensatz von Gluhak und Hofmeister (2009) zu sämtlichen römischen Steinbrüchen der Ost- und Westeifel ist als Grundlage zur Provenienzanalyse von Mühlsteinen gut geeignet. Die Zuordnung der Mühlsteine erfolgt anhand der Haupt- und Spurenelementzusammensetzung analog zur Steinbruchcharakterisierung: Wenn gemäß dem TAS-Diagramm eine Eifeler Herkunft der untersuchten Mühlsteine in Frage kommt, muss zunächst die Clusteranalyse angewendet werden, da die Herkunft des Mühlsteins unbekannt ist und »neutral« getestet werden muss, ob das Fundstück überhaupt aus der Eifel stammt. Da die Clusteranalyse jedoch einzelne Steinbrüche nicht voneinander trennen kann, wird schrittweise die Diskriminanzanalyse angewendet, um die Herkunft des Mühlsteins mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit weiter einzugrenzen. Die geochemische Auswertung in Kombination mit Cluster- und Diskriminanzanalysen erweisen sich als hilfreiche Methoden zur Provenienzanalyse von Mühlsteinen.

Anmerkungen

- 1) Vorangegangene Versuche, römische Mühlsteine der Eifel zuzuordnen, basierten ausschließlich auf makroskopischen petrographischen Beobachtungen. Die wenigen petrologischen Analysen von Mühlsteinen vermuteter Eifeler Herkunft wurden an frühmittelalterlichen bis mittelalterlichen Fundstücken von Kars 1980 und Hörmann / Richter 1983 durchgeführt.
- 2) Die Arbeit wurde am Institut für Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität Mainz von Prof. Dr. W. Hofmeister betreut. Gleichzeitig war sie in den Forschungsschwerpunkt »Entstehung einer Industrielandschaft – das antike Steinbruch- und Bergwerksrevier zwischen Eifel und Rhein« am Forschungsbereich Vulkanologie, Archäologie und Technikgeschichte des Römisch-Germanischen Zentralmuseums (Mayen) eingebunden.
- 3) Mit einer Ausnahme (Haltern 2; pompejanische Kraftmühle) handelt es sich immer um Handmühlsteine. Zur genaueren Ansprache vgl. den archäologischen Kommentar im Beitrag von H. Schaaff in diesem Band.
- 4) Vielen Dank an Dr. Rudolf Aßkamp und Dr. Bettina Tremmel, die die Mühlen aus Haltern bzw. Oberaden, Anreppen und Barkhausen für die Probennahme zur Verfügung gestellt haben und damit das Gelingen des Projekts erst ermöglicht haben. Besonderer Dank geht außerdem an Prof. Dr. D. Baatz für seine fachliche Unterstützung.
- 5) Die Durchschnittswerte mit Standardabweichungen der Steinbruchproben sind in Gluhak und Hofmeister 2009 aufgeführt. Der gesamte Datensatz ist als »supplementary data« zur Onlineversion des Artikels verfügbar (doi: 10.1016/j.jas.2009.04.007).
- 6) Probenaufbereitung und Messmethoden werden ausführlich in Gluhak / Hofmeister 2009 erläutert.
- 7) Die unbedingt vorzunehmende Datenvorbereitung vor der Anwendung von Cluster- und Diskriminanzanalyse wird in Gluhak / Hofmeister 2009 ausführlich beschrieben.
- 8) Siehe Anm. 7.
- 9) Das Auswahlkriterium ist Wilks' Lambda; die in SPSS 16.0 voreingestellten F-Werte für die Aufnahme (3,84) und für den Ausschluss (2,71) werden beibehalten (Gluhak / Hofmeister 2009).

Literatur

- Antonelli / Nappi / Lazzarini 2003: F. Antonelli / G. Nappi / L. Lazzarini, Roman millstones from Orvieto (Italy): petrographic and geochemical data for a new archaeometric contribution. *Archaeometry* 43/2, 2003, 167-189.
- Beccaluva u.a. 2002: L. Beccaluva / M. Coltorti / P. Di Girolamo / L. Melluso / L. Milani / V. Morra / F. Siena, Petrogenesis and evolution of Mt. Vulture alkaline volcanism. *Mineral. Petrol.* 74, 2002, 277-297.
- van den Bogaard / Schmincke 1990: P. van den Bogaard / H.-U. Schmincke, Vulkanologische Karte der Osteifel, 1:50 000. Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz (Koblenz 1990).
- Briot u.a. 1991: D. Briot / J. M. Cantagrel / C. Dupuy / R. S. Harmon, Geochemical evolution in crustal magma reservoirs: trace-element and Sr-Nd-O isotopic variations in two continental intraplate series at Monts Dore, Massif Central, France. *Chemical Geol.* 89, 1991, 281-303.
- Buffone u.a. 2003: L. Buffone / S. Lorenzoni / M. Pallara / E. Zanettin, The millstones of ancient Pompei: a petro-archaeometric study. *European Journal Mineral.* 15, 2003, 207-215.
- De Fino / La Volpe / Piccarreta 1982: M. De Fino / L. La Volpe / G. Piccarreta, Magma evolution at Mount Vulture (Southern Italy). *Bull. Volcanol.* 45, 1982, 116-126.
- Gluhak 2010: T. Gluhak, Petrologisch-geochemische Charakterisierung quartärer Laven der Eifel als Grundlage zur archäometrischen Herkunftsbestimmung römischer Mühlsteine [Diss., Johannes Gutenberg-Universität Mainz 2010] (<http://ubm.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2010/2227/pdf/doc.pdf> vom 26. 7. 2010).
- Gluhak / Hofmeister 2009: T. Gluhak / W. Hofmeister, Roman lava quarries in the Eifel region (Germany): geochemical data for millstone provenance studies. *Journal Arch. Scien.* 36, 2009, 1774-1782.
- Gourgaud / Camus 1984: A. Gourgaud / G. Camus, Magma mixing at La Nugère Volcano (Chaîne des Puys, Massif Central, France): role in the trachyandesite genesis. *Bull. Volcanol.* 47, 1984, 781-805.
- Gourgaud / Villemant 1992: A. Gourgaud / B. Villemant, Evolution of magma mixing in an alkaline suite: the Grande Cascade sequence (Monts-Dore, French Massif Central). *Geochemical modelling. Journal Volcanol. and Geothermal Research* 52, 1992, 255-275.
- Hernandez 1973: J. Hernandez, Le volcanisme tertiaire des monts du Forez (Massif central français): basanites à analcime, à leucite et néphélinites à méliélite. *Bull. Soc. Française Minéral. et Cristallogr.* 96, 1973, 303-312.
- Hörmann / Richter 1983: P. K. Hörmann / A. Richter, Vergleichende mineralogisch-petrographische Untersuchungen an Mühlsteinresten aus Haithabu und Bruchsteinproben aus der Eifel. *Ber. Ausgr. Haithabu* 18, 1983, 93-108.
- Hörter 1994: F. Hörter jun., Getreidereiben und Mühlsteine aus der Eifel. Ein Beitrag zur Steinbruch- und Mühlsteingeschichte (Mayen 1994).
- Kars 1980: H. Kars, Early-Medieval Dorestad, an archaeo-petrological study. Part I: general introduction. The tephrite querns. *Ber. ROB* 30, 1980, 393-422.
- Le Bas u.a. 1986: M. J. Le Bas / R. W. Le Maitre / A. Streckeisen / B. Zanettin, A chemical classification of volcanic rocks based on the Total Alkali-Silica diagram. *Journal Petrol.* 27, 1986, 745-750.
- Legendre u.a. 2001: C. Legendre / M. Caroff / H. Leyrit / P. Nehlig / D. Thièblemont, Les premières phases d'édification du strato-volcan du Cantal (Massif central, France) entre 9,5 et 8,0 Ma: géologie et géochimie du secteur de l'Élancèze. *Comptes Rendus Acad. Scien. Ser. IIA Earth and Planetary Scien.* 332, 2001, 617-624.
- Lenoir u.a. 2000: X. Lenoir / J.-M. Dautria / L. Briquieu / J.-M. Cantagrel / A. Michard, Nouvelles données géochronologiques, géochimiques et isotopiques sur le volcanisme du Forez: relation avec l'évolution cénozoïque du manteau du Massif central. *Comptes Rendus Acad. Scien. Ser. IIA Earth and Planetary Scien.* 330, 2000, 201-207.
- Liotard / Briot / Boivin 1988: J. M. Liotard / D. Briot / P. Boivin, Petrological and geochemical relationships between pyroxene megacrysts and associated alkali-basalts from Massif Central (France). *Contributions Mineral. and Petrol.* 89, 1988, 81-90.
- Liotard u.a. 1983: J. M. Liotard / P. Boivin / J. M. Cantagrel / C. Dupuy, Mégacrystaux d'amphibole et basaltes alcalins associés. Problèmes des leurs relations pétrogénétiques et géochimiques. *Bull. Minéral.* 106, 1983, 451-464.
- Magonthier 1975: M.-C. Magonthier, Les basanites à leucite tertiaires de la partie nord du Sillon Houiller (d'Herment à Pontauxur, Puy-de-Dôme). Comparaison avec deux autres provinces à caractère potassique du Massif central français (Sioule et Sillon Houiller sud). *Bull. Soc. Française Minéral. et Cristallogr.* 98, 1975, 245-253.
- Mangartz 2008: F. Mangartz, Römischer Basaltlava-Abbau zwischen Eifel und Rhein. *Monogr. RGZM 75 = Vulkanpark-Forsch.* 7 (Mainz 2008).
- Maury / Brousse 1978: R. C. Maury / R. Brousse, Présence de pigeonite et d'orthopyroxène dans certaines laves du Massif central français: leur répartition et leur origine. *Bull. Minéral.* 101, 1978, 10-21.
- Maury u.a. 1980: R. C. Maury / R. Brousse / B. Villemant / J.-L. Joron / H. Jaffrezic / M. Treuil, Cristallisation fractionnée d'un magma basaltique alcalin: la série de la Chaîne des Puys (Massif central, France). *Bull. Minéral.* 103, 1980, 250-66.
- Melluso / Morra / Di Girolamo 1996: L. Melluso / V. Morra / P. Di Girolamo, The Mt. Vulture volcanic complex (Italy): evidence for distinct parental magmas and for residual melts with melilite. *Mineral. Petrol.* 56, 1996, 225-250.
- Miallier u.a. 2004: D. Miallier / L. Michon / J. Évin / T. Pilleyre / S. Sanzelle / G. Vernet, Volcans de la chaîne des Puys (Massif central, France): point sur la chronologie Vasset-Kilian-Pariou-Chopin. *Comptes Rendus Geoscien.* 336, 2004, 1345-1353.
- Peacock 1980: D. P. S. Peacock, The Roman millstone trade: a petrological sketch. *World Arch.* 12, 1980, 43-53.
- 1986: D. P. S. Peacock, The production of Roman millstones near Orvieto, Umbria, Italy. *Ant. Journal* 66, 1986, 45-51.
- Renzulli u.a. 2002: A. Renzulli / P. Santi / G. Nappi / M. Luni / D. Vitali, Provenance and trade of volcanic rock millstones from Etruscan-Celtic and Roman archaeological sites in Central Italy. *European Journal Mineral.* 14, 2002, 175-783.
- Vatin-Perignon / Maury / Milesi 1980: N. Vatin-Perignon / R. C. Maury / J. P. Milesi, Le magmatisme sursaturé infrabréchique du centre du Cantal (Massif Central français). *Bull. Volcanol.* 43, 1980, 511-525.

- Villemant / Treuil 1983: B. Villemant / M. Treuil, Comportement des éléments traces et majeurs dans la série alcaline du Velay; comparaison avec la Chaîne des Puys (Massif Central, France). Bull. Minéral. 106, 1983, 465-486.
- Volterra / Hancock 1994: V. Volterra / R. G. V. Hancock, Provenancing of ancient Roman millstones. Journal Radioanalytical and Nuclear Chemistry 180, 1994, 37-44.
- Williams-Thorpe 1988: O. Williams-Thorpe, Provenancing and archaeology of Roman millstones from the Mediterranean area. Journal Arch. Scien. 15, 1988, 253-305.
- Williams-Thorpe / Thorpe 1988: O. Williams-Thorpe / R. S. Thorpe, The provenance of donkey mills from Roman Britain. Archaeometry 30, 1988, 275-289.
- 1989: O. Williams-Thorpe / R. S. Thorpe, Provenancing and archaeology of Roman millstones from Sardinia (Italy). Oxford Journal Arch. 8, 1989, 89-117.
- O. Williams-Thorpe / R. S. Thorpe, Millstone provenancing used in tracing the route of a fourth-century BC Greek merchant ship. Archaeometry 32, 1990, 115-137.
- 1991a: O. Williams-Thorpe / R. S. Thorpe, Millstones that mapped the Mediterranean. New Scientist 23, 1991, 42-45.
- 1991b: O. Williams-Thorpe / R. S. Thorpe, The import of millstones to Roman Mallorca. Journal Roman Arch. 4, 1991, 153-159.
- 1993: O. Williams-Thorpe / R. S. Thorpe, Geochemistry and trade of eastern Mediterranean millstones from the Neolithic to Roman periods. Journal Arch. Scien. 20, 1993, 263-320.
- Wilson / Downes / Cebriá 1995: M. Wilson / H. Downes / J.-M. Cebriá, Contrasting fractionation trends in coexisting continental alkaline magma series; Cantal, Massif Central, France. Journal Petrol. 36, 1995, 1729-1753.

Zusammenfassung / Abstract / Résumé

Mühlen für das römische Militär – geochemische Herkunftsanalysen von Mühlsteinen aus den augusteischen Lagern Haltern, Oberaden, Anreppen und Barkhausen

Erstmals liegt eine Arbeit vor, die alle römischen Lavasteinbrüche in der vulkanischen Eifel petrologisch untersucht und auf Basis der geochemischen Zusammensetzung der Rohstoffe eine Vorgehensweise zur Provenienzanalyse von Mühlsteinen empfiehlt. Diesen Empfehlungen folgend werden jeweils zwei Mühlsteine aus den Römerlagern Haltern, Oberaden, Anreppen und Barkhausen geochemisch analysiert. Die Zuordnung erfolgt in drei Schritten: 1. Mittels geochemischer Charakterisierung wird geprüft, ob eine Eifeler Herkunft infrage kommt, 2. die Clusteranalyse testet, zu welchem Steinbruch oder zu welcher Gruppe von Steinbrüchen der Mühlstein gehört, und 3. anhand der Diskriminanzanalyse wird das Fundstück seinem Steinbruch mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zugeordnet. Für die untersuchten Fundstücke konnte durch eine Kombination dieser Methoden eine genaue Eifeler Herkunft nachgewiesen werden.

Mills for the Roman army – geochemical provenance analyses of millstones from the Augustan fortresses Haltern, Oberaden, Anreppen und Barkhausen

For the first time a study is published which presents a petrological analysis of all Roman lava quarries in the volcanic Eifel region and which develops recommendations for a provenance analysis of millstones on the basis of the geochemical composition of the raw material. According to these recommendations, in each case two millstone samples from the Roman fortresses Haltern, Oberaden, Anreppen and Barkhausen were analysed geochemically. Affiliation is carried out in three steps: 1. geochemical characterisation checks whether an Eifel provenance can be considered, 2. cluster analysis tests to which quarry or group of quarries the sample can be attributed, and 3. discriminant analysis allocates the sample to its quarry of origin – with a certain probability. Combining these methods, an exact provenance from the Eifel area for the analysed finds can be established.

Des meules pour les militaires romains – analyses de provenance géochimiques des meules des camps augustéens de Haltern, Oberaden, Anreppen et Barkhausen

Pour la première fois une étude pétrologique présentant l'ensemble des fragments de lave volcaniques de la région de l'Eifel est présentée ici. Un protocole d'étude de provenance de ces meules, reposant sur l'assemblage géochimique des matières premières, est proposé. Deux meules de chacun des camps romain de Haltern, Oberaden, Anreppen et Barkhausen sont analysées géochimiquement. Le classement est ensuite effectué en trois phases: 1. la caractérisation géochimique vérifie la provenance de la région de l'Eifel, 2. l'analyse des clusters teste la carrière ou le groupe de carrières dont provient la pièce, et 3. une analyse discriminante permet d'attribuer la pièce à l'une ou l'autre des carrières, avec un coefficient de probabilité. La combinaison de ces méthodes a permis de déterminer ainsi la provenance exacte de ces meules de l'Eifel. L. B.

Schlüsselwörter / Keywords / Mots clés

Rheinland-Pfalz / Eifel / Römische Kaiserzeit / Lava / Mühlstein / Provenienz / Geochemie / Geologie
Rhineland-Palatinate / Eifel / Roman Principate / lava / millstone / provenance / geochemistry / geology
Rhénanie-Palatinat / Eifel / Empire romain / lave / meule / provenance / géochimie / géologie

Tatjana Gluhak

Johannes Gutenberg-Universität Mainz
Institut für Geowissenschaften
Becherweg 21
55099 Mainz
gluhak@uni-mainz.de

BESTELLUNG DES ARCHÄOLOGISCHEN KORRESPONDENZBLATTS

Das Archäologische Korrespondenzblatt versteht sich als eine aktuelle wissenschaftliche Zeitschrift zu Themen der vor- und frühgeschichtlichen sowie provinzialrömischen Archäologie und ihrer Nachbarwissenschaften in Europa. Neben der aktuellen Forschungsdiskussion finden Neufunde und kurze Analysen von überregionalem Interesse hier ihren Platz. Der Umfang der Artikel beträgt bis zu 20 Druckseiten; fremdsprachige Beiträge werden ebenfalls angenommen. Unabhängige Redaktoren begutachten die eingereichten Artikel.

Kontakt für Autoren: **korrespondenzblatt@rgzm.de**

Abonnement beginnend mit dem laufenden Jahrgang; der Lieferumfang umfasst 4 Hefte pro Jahr; ältere Jahrgänge auf Anfrage; Kündigungen zum Ende eines Jahrganges.

Kontakt in Abonnement- und Bestellangelegenheiten: **verlag@rgzm.de**

Preis je Jahrgang (4 Hefte) für Direktbezieher 20,- € (**16,- € bis 2007** soweit vorhanden) + Versandkosten (z. Z. Inland 5,50 €, Ausland 12,70 €)

HIERMIT ABONNIERE ICH DAS ARCHÄOLOGISCHE KORRESPONDENZBLATT

Name, Vorname _____

Straße, Nr. _____

PLZ, Ort _____

Sollte sich meine Adresse ändern, erlaube ich der Deutschen Bundespost, meine neue Adresse mitzuteilen.

Datum _____ Unterschrift _____

Ich wünsche folgende Zahlungsweise (bitte ankreuzen):

- Bequem und bargeldlos durch Bankabbuchung (innerhalb von Deutschland)

Konto-Nr. _____ BLZ _____

Geldinstitut _____

Datum _____ Unterschrift _____

- Durch sofortige Überweisung nach Erhalt der Rechnung (Deutschland und andere Länder)

Ausland:			
Nettopreis	net price	prix net	20,- €
Versandkosten	postage	frais d'expédition	12,70 €
Bankgebühren	bank charges	frais bancaires	7,70 €

Bei Verwendung von Euro-Standardüberweisungen mit IBAN- und BIC-Nummer entfallen unsere Bankgebühren (IBAN: DE 08 5519 0000 0020 9860 14; BIC: MVBM DE 55), ebenso wenn Sie von Ihrem Postgirokonto überweisen oder durch internationale Postanweisung zahlen.

Das Römisch-Germanische Zentralmuseum ist nicht umsatzsteuerpflichtig und berechnet daher keine Mehrwertsteuer.

If you use the European standard money transfer with IBAN- and BIC-numbers there are no bank charges from our part (IBAN: DE 08 5519 0000 0020 9860 14; BIC: MVBM DE 55). This is also the case if you transfer the money from a Post office current account or with an international Post office money order.

The Römisch-Germanische Zentralmuseum does not pay Sales Tax and therefore does not charge VAT (Value Added Tax).

L'utilisation de virement SWIFT avec le numéro IBAN et SWIFT supprime nos frais bancaires (IBAN:

DE 08 5519 0000 0020 9860 14; SWIFT: MVBM DE 55); ils peuvent aussi être déduits en cas de règlement postal sur notre CCP (compte courant postal) ou par mandat postal international.

Le Römisch-Germanische Zentralmuseum n'est pas imposable à la taxe sur le chiffre d'affaires et ne facture aucune TVA (taxe à la valeur ajoutée).

Senden Sie diese Abo-Bestellung bitte per Fax an: 0049 (0) 61 31 / 91 24-199

oder per Post an:

Römisch-Germanisches Zentralmuseum, Forschungsinstitut für Vor- und Frühgeschichte,
Archäologisches Korrespondenzblatt, Ernst-Ludwig-Platz 2, 55116 Mainz, Deutschland