

Petrografische und geochemische Beschreibung römischer Schmelztiegel in Bezug auf deren Vergleichbarkeit : Beispiele aus Augusta Raurica (Augst/BL und Kaiseraugst/AG) und Aventicum (Avenches/VD)

Autor(en): **König, Daniela / Furger, Alex R.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Jahresberichte aus Augst und Kaiseraugst**

Band (Jahr): **36 (2015)**

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-760324>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Petrografische und geochemische Beschreibung römischer Schmelztiegel in Bezug auf deren Vergleichbarkeit

Beispiele aus *Augusta Raurica* (Augst/BL und Kaiseraugst/AG) und *Aventicum* (Avenches/VD)

Daniela König¹ (mit einem Beitrag von Alex R. Furger²)

Zusammenfassung

Ein Teil der ausgegrabenen Schmelztiegel aus *Augusta Raurica* (Augst/BL und Kaiseraugst/AG) wurde im Vergleich zu augenscheinlich ähnlichen Schmelztiegeln aus *Aventicum* (Avenches/VD) untersucht. Dabei galt ein besonderes Interesse der Anzahl der keramischen Lagen und deren chemischer Zusammensetzung. Auch sollte mithilfe der durchgeführten Untersuchungen geklärt werden, welche Brenntemperaturen, entweder als Vorbrand oder als Verwendungstemperaturen, für die Schmelztiegel angenommen werden können.

Abstract

This article deals with a part of the excavated metal-melting crucibles from *Augusta Raurica* (Augst/BL und Kaiseraugst/AG) in comparison to optically similar metal-melting crucibles from *Aventicum* (Avenches/VD). The main focus lies on the identification of ceramic layers and their chemical composition. A further aim is the estimation of firing temperature, either in terms of pre-firing temperature or final using temperature.

Schlüsselwörter

Brenntemperaturen, Metallurgie, römische Schmelztiegel, Vergleich von *Augusta Raurica* und *Aventicum*.

Einleitung

Die in diesem Artikel untersuchten Tiegelfragmente stammen aus zwei unterschiedlichen römischen Fundstätten in der Schweiz (Abb. 1): *Augusta Raurica* (Augst/BL und Kaiseraugst/AG) und *Aventicum* (Avenches/VD).

Für *Augusta Raurica* kann belegt werden, dass die kleineren Schmelztiegel vorrangig im frühen 1. Jahrhundert n. Chr. sowie im 2. und 3. Jahrhundert auftreten. Grössere Schmelztiegel finden sich erst im späten 2. Jahrhundert in grösserer Stückzahl. Ebenfalls kann ein Import von Tiegeln für *Augusta Raurica* vom 1. bis ins 3. Jahrhundert belegt werden, wobei ein gewisser «Höhepunkt» in der ersten Hälfte des 3. Jahrhunderts erreicht wurde³.



Abb. 1: Geografische Lage von *Augusta Raurica* und *Aventicum* (ohne M.).

Das untersuchte Tiegelmateriale

Alex R. Furger

Auswahlkriterien

Die 893 Tiegelfragmente von *Augusta Raurica* sind formal sehr einheitlich (Abb. 2). In der Grundform sind sie eiförmig mit spitzem bis verrundetem Boden und haben einen leicht eingezogenen, oftmals innen verdickten Rand. Diese als «Augster Normaltypus» bezeichneten Stücke sind ausnahmslos auf der Scheibe getöpft und machen 95,2% des Gesamtbestandes aus (T1–T850⁴). Einige ebenfalls scheibengedrehte Tiegel (T851–T864) haben abweichende Ränder respektive Böden.

Eine Sondergruppe bilden kleine, handgemachte «Schälchentiegel» (T865–T871). Sie machen nur 0,8% des Gesamtbestandes aus. Hinzu kommen noch einige wenige Tiegel-

1 Institut für Geowissenschaften, Chemin du Musée 6, CH-1700 Fribourg; daniela.koenig@unifr.ch.

2 Lenzgasse 11, CH-4056 Basel, alex@woauchimmer.ch.

3 König u. a. 2014; Furger in Vorb.

4 Katalogbezeichnungen nach Furger in Vorb.

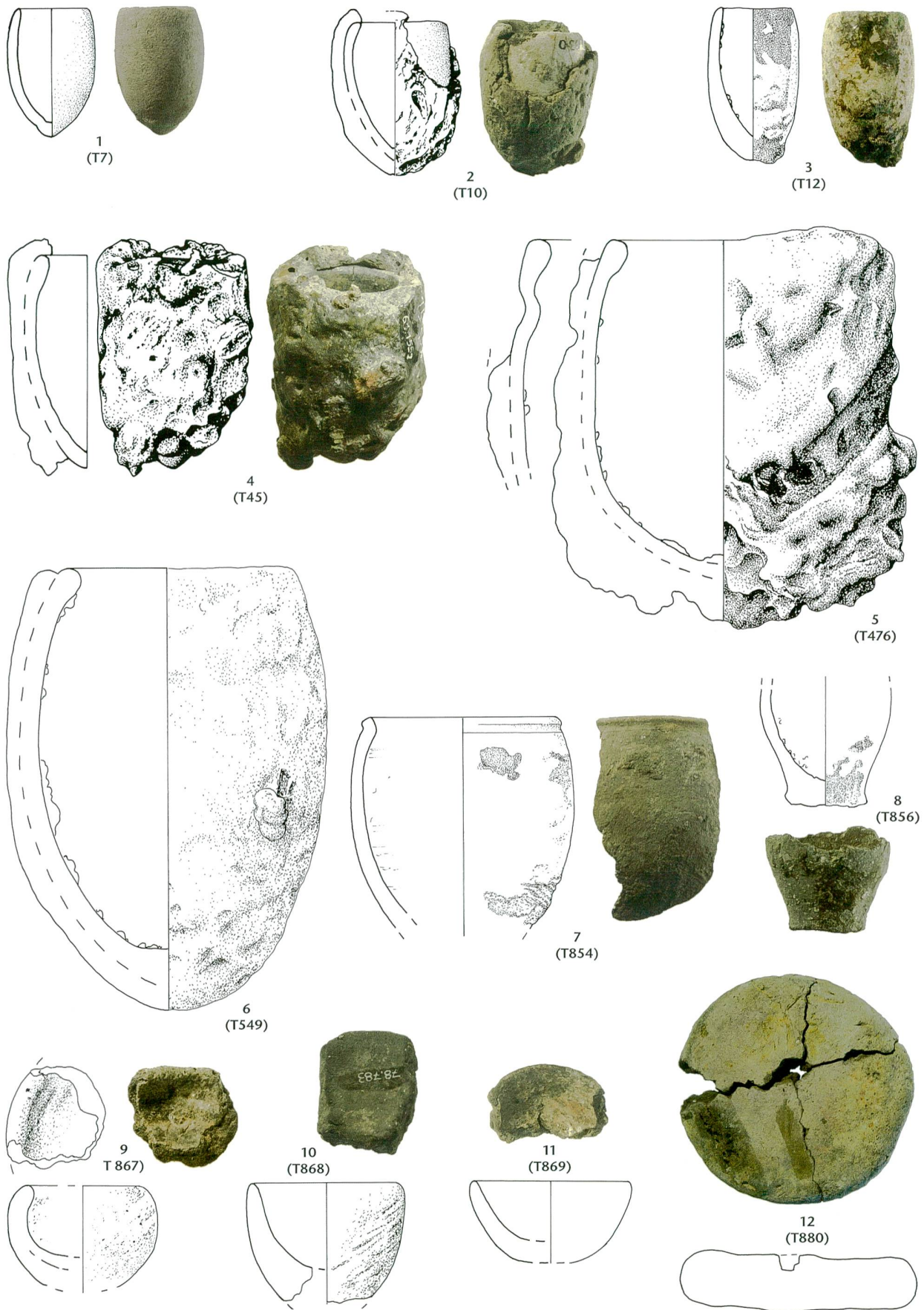


Abb. 2: Kleine Auswahl römischer Schmelztiegel aus Augusta Raurica. 1–6: «Augster Normaltyp» (nach Furger in Vorb., Kat. T1–T850, 95,2% des Gesamtbestandes). 7–8: Schmelztiegel mit abweichenden Rändern resp. Böden (T851–T864). 9–11: Schälchentiegel (T865–T871, 0,8% des Gesamtbestandes). 12: Deckel (T875–T883 [T872–T874: Varia; 884–T893: Unbestimmbares]). M. 1:2.

deckel (T875–T883), die speziellen Prozessen, etwa der Messing-Zementation, vorbehalten waren. Die Katalognummern T872–T874 und T884–T893 sind Varia und Unbestimmbares.

Für die hier vorgelegten naturwissenschaftlichen Untersuchungen wurden der Autorin im Juni 2012 15 Individuen aus *Augusta Raurica* zur Verfügung gestellt (Abb. 3). Bewusst konzentrierten wir uns dabei auf Tiegel des Normaltypus, versuchten aber, verschiedene Tongruppen und Tiegelgrößen zu berücksichtigen. Wegen musealer Kriterien kamen nur fragmentierte Stücke infrage, von denen nach fotografischer Dokumentation problemlos ein Teilstück für zerstörende Analysen abgesägt werden durfte. Alle diese Tiegel wurden parallel auch von Markus Helfert mit einem pRFA⁵ bezüglich Tonen, Lutum⁶ und Metallresten untersucht⁷.

Die Stücke aus *Augusta Raurica* kamen als letzte Serie in das Tiegelprojekt der Autorin⁸. Aus der römischen Stadt *Aventicum* (Avenches/VD) standen schon vorher zehn Tiegelfragmente zur Verfügung (Abb. 4). Sie wurden nach ähnlichen Kriterien wie die Probengruppe aus *Augusta Raurica* vom Team des Musée Romain in Avenches herausgesucht und durch Vermittlung von Vincent Serneels für das Archäometrieprojekt von D. König ausgeliehen.

Katalog der analysierten Schmelztiegelfragmente aus *Augusta Raurica*

Von den 893 Tiegeln aus *Augusta Raurica* (Auswahl Abb. 2) standen der Autorin für ihre archäometrischen Untersuchungen 15 Exemplare zur Verfügung (Abb. 3). Die beiden Tiegel T128 und T168 sind ungebraucht und stammen aus einem grösseren *Händlerdepot* in Insula 19 mit einem engen Formen- und Grössenspektrum⁹. Alle hier in Analysen vorgestellten Tiegel aus *Augusta Raurica* sind scheibengedreht und gehören zum «Augster Normaltypus»:

1960_02066L_a¹⁰: (Abb. 3,1) RS eines grossen Schmelztiegels, Ton hellgrau, sandig; Rand innen verdickt; Oberfläche innen am Rand mit Lehmflecken, innen anthrazitfarben, innen an der Wandung Spritzer (grün), aussen Lutum, oben am Rand horizontal abgestrichen. Die Lutumoberfläche ist sauber abgearbeitet und zeigt keine Bruchstruktur eines «angeklebten» Deckels oder dergleichen.

T503, Inv. 1960.2066L¹¹, FK V03648. – Grabung 1960.051, Insula 30. – FK-Datierung: um 240–260 n. Chr. – pRFA-Analysen M. Helfert¹²: Tiegelkeramik: wahrscheinlich Tongruppe 1; Lutum: Tongruppe 2 (3 Messungen). – Metallspuren: Zn.

1963_01576_c: (Abb. 3,2) WS eines mittelgrossen Schmelztiegels, Ton hellgrau, fein; Oberfläche innen mit Spritzern und Metalltröpfchen, oben gelbliche Verglasung, aussen Lutum.

T231, Inv. 1963.1576, FK X02519. – Grabung 1963.053, Insula 18. – FK-Datierung: um 30–50 n. Chr. – pRFA-Analysen M. Helfert: Tiegelkeramik: wahrscheinlich Tongruppe 1. – Metallspuren: Cu+++ (3 Messungen), Sn+, Pb (2 Messungen), Zn+++ (3 Messungen), Au, Hg (2 Messungen).

1963_04791E_b: (Abb. 3,3) WS eines grossen Schmelztiegels, Ton hellgrau, sandig; Oberfläche innen mit hart verschlackter Kruste (schwarz), darunter grösserer Bronze(?)-Tropfen, aussen Lutum. T548, Inv. 1963.4791E, FK Y00835. – Grabung 1963.054, Insula 31. – FK-Datierung: nicht datiert. – pRFA-Analysen M. Helfert: Tiegelkeramik: Tongruppe 1; Lutum: wahrscheinlich Tongruppe 3 (2 Messungen). – Metallspuren: Cu++, Zn+++, Hg+, MnO+. – Metalltropfen: Zinn-Bleimessing.

1963_04726_a: (Abb. 3,4) 2 WS eines grossen Schmelztiegels, Ton hellgrau, sandig; Oberfläche innen naturbelassen (bläulichgrau), aussen Lutum.

T673, Inv. 1963.4726, FK Y00720. – Grabung 1963.054, Insula 31. – FK-Datierung: um 150–230 n. Chr. – pRFA-Analysen M. Helfert: Tiegelkeramik: Tongruppe 1; Lutum: wahrscheinlich Tongruppe 3 (2 Messungen).

1963_04791D_a: (Abb. 3,5) 2 WS eines grossen Schmelztiegels, Ton hellgrau, sandig, stark aber fein gemagert; Oberfläche innen bläulichgrau, Spritzer (Bronze), aussen Lutum.

T552, Inv. 1963.4791D, FK Y00835. – Grabung 1963.054, Insula 31. – FK-Datierung: nicht datiert. – pRFA-Analysen M. Helfert: Tiegelkeramik: Tongruppe 1; Lutum: wahrscheinlich Tongruppe 2 (2 Messungen).

1968_06215_c: (Abb. 3,6) RS und 8 WS (nicht anpassend) eines mittelgrossen Schmelztiegels, Höhe ca. 130 mm, Randedurchmesser 85 mm; Ton dunkelgrau, viele grössere Quarzkörner; Oberfläche innen dunkelgrau, stellenweise mit brauner Lehmauflage, aussen Lutum. Der Gefässkörper ist stark verzogen, der Rand innen verdickt, der Boden aussen abgeflacht (Durchmesser 27 mm; innen rund; sehr kleine Standfläche).

T862, Inv. 1968.6215, FK A00094. – Grabung 1968.053, Insula 43. – FK-Datierung: um 80–120 n. Chr. (wenig Material). – pRFA-Analysen M. Helfert: Tiegelkeramik: Tongruppe 5; Lehmkruste innen: wahrscheinlich Tongruppe 3 (3 Messungen).

1970_05202_c: (Abb. 3,7) RS und WS eines kleinen Schmelztiegels, Boden eiförmig-spitz, Ton beige-grau, fein; Oberfläche innen und aussen naturbelassen, deutliche Drehrillen.

T128, Inv. 1970.5202, FK A01959. – Grabung 1970.053, Insula 19. – FK-Datierung: um 20–100 n. Chr. (wenig Material). – pRFA-Analysen M. Helfert: Tiegelkeramik: Tongruppe 1.

1970_05206_c: (Abb. 3,8) WS eines kleinen Schmelztiegels, Boden eiförmig-spitz; Ton beige-grau, fein; Oberfläche innen und aussen naturbelassen.

T168, Inv. 1970.5206, FK A01959. – Grabung 1970.053, Insula 19. – FK-Datierung: um 20–100 n. Chr. (wenig Material). – pRFA-Analysen M. Helfert: Tiegelkeramik: Tongruppe 1.

1977_09450_b: (Abb. 3,9) WS eines grossen Schmelztiegels, Ton dunkelgrau, mit vielen groben Quarzkörnern; Oberfläche innen fleckig (grau bis rötlichbraun), aussen Lutum.

T688, Inv. 1977.9450, FK B00246. – Grabung 1977.052, Insula 31. – FK-Datierung: um 30–130 n. Chr. – pRFA-Analysen M. Helfert: Tiegelkeramik und Lutum: wahrscheinlich Tongruppe 3; innere Engobe: wahrscheinlich Tongruppe 4 (3 Messungen). – Metallspuren: Cu++.

5 Portables Röntgenfluoreszenz Spektrometer XL3t 900SHe GOLDD von Thermo Fisher Scientific - Niton.

6 Lutum: äussere Verschleisschicht bei Tiegeln, welche direkt auf der gebrannten, stabilen Keramik aufgebracht wurde, um eine bessere Wärmeisolation und eine stützende Aussenschicht der Tiegel zu erreichen.

7 M. Helfert in: Furger in Vorb.

8 König 2014.

9 Furger in Vorb.

10 Analyseprobennummer D. König.

11 Inv.: Inventarnummer des Stücks im Museum Augusta Raurica. – T-Nummern: Katalognummern in Furger in Vorb. – FK: Fundkomplex. – FK-Datierung: Keramikdatierung des betreffenden Fundkomplexes.

12 Die pRFA-Messungen an den Tiegeltönen und Metallrückständen stammen von Markus Helfert, Goethe Universität Frankfurt/M., und werden publiziert in Furger in Vorb. Die Tongruppe 1 entspricht nach Helfert am ehesten einem Lehmvorkommen in Châtelat/BE im Jura, die Tongruppe 2 am ehesten einem Vorkommen in Kaiser-augst/AG-Zelglihof. Die Tongruppen 3–5 konnten bislang nicht lokalisiert werden.

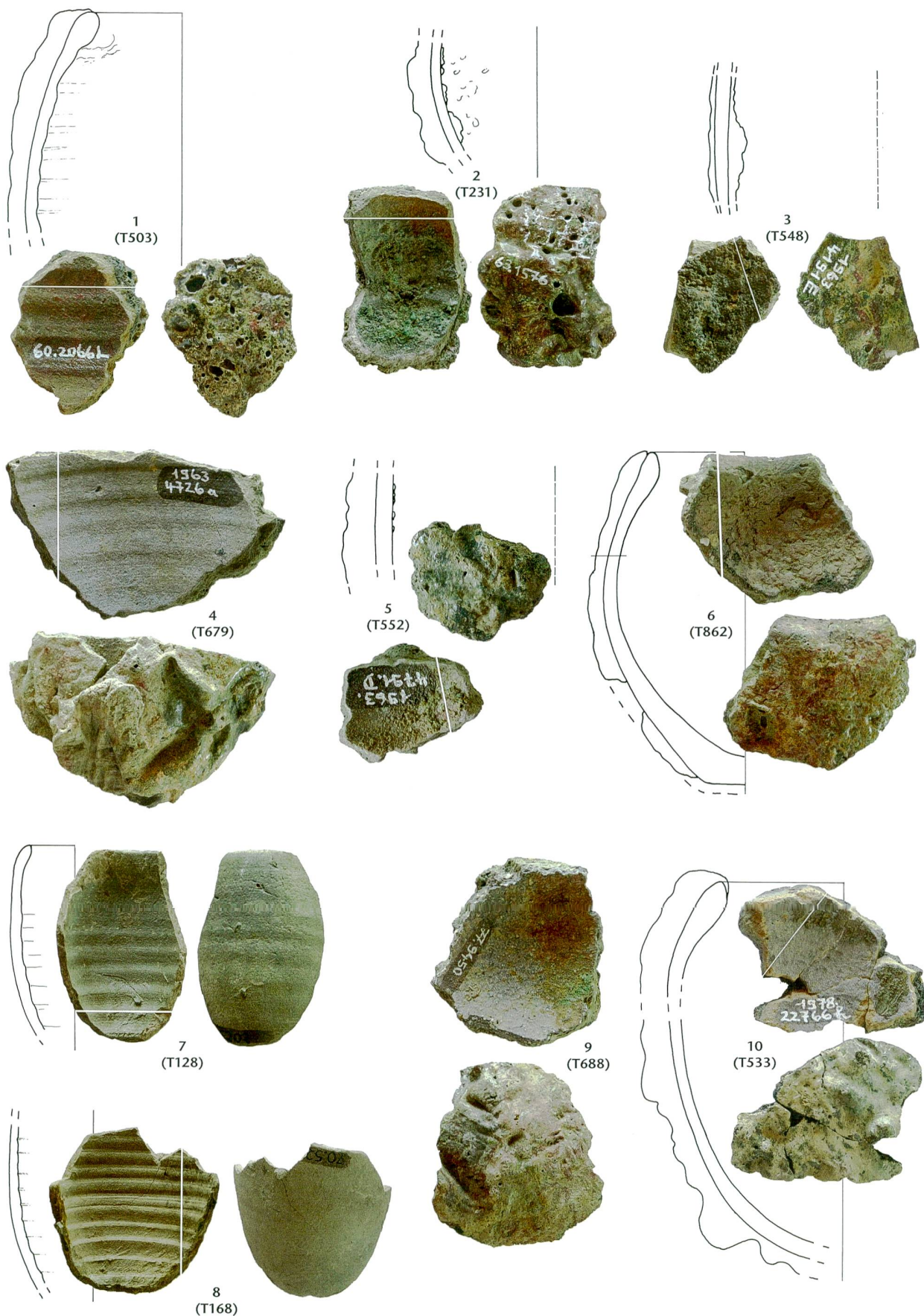


Abb. 3: Analytierte Tiegelfragmente aus Augusta Raurica (Augst/BL und Kaiseraugst/AG). Die weissen Linien zeigen die Sägeschnitte zur Probenentnahme; das jeweils kleinere Teilstück stand für die Analysen zur Verfügung. 1: 1960_02066L_a. 2: 1963_01576_c. 3: 1963_04791E_b. 4: 1963_04726_a. 5: 1963_04791S_a. 6: 1968_06215_c. 7: 1970_05202_c. 8: 1970_05206_c. 9: 1977_09450_b. 10: 1978_22766_b. M. 1:2.

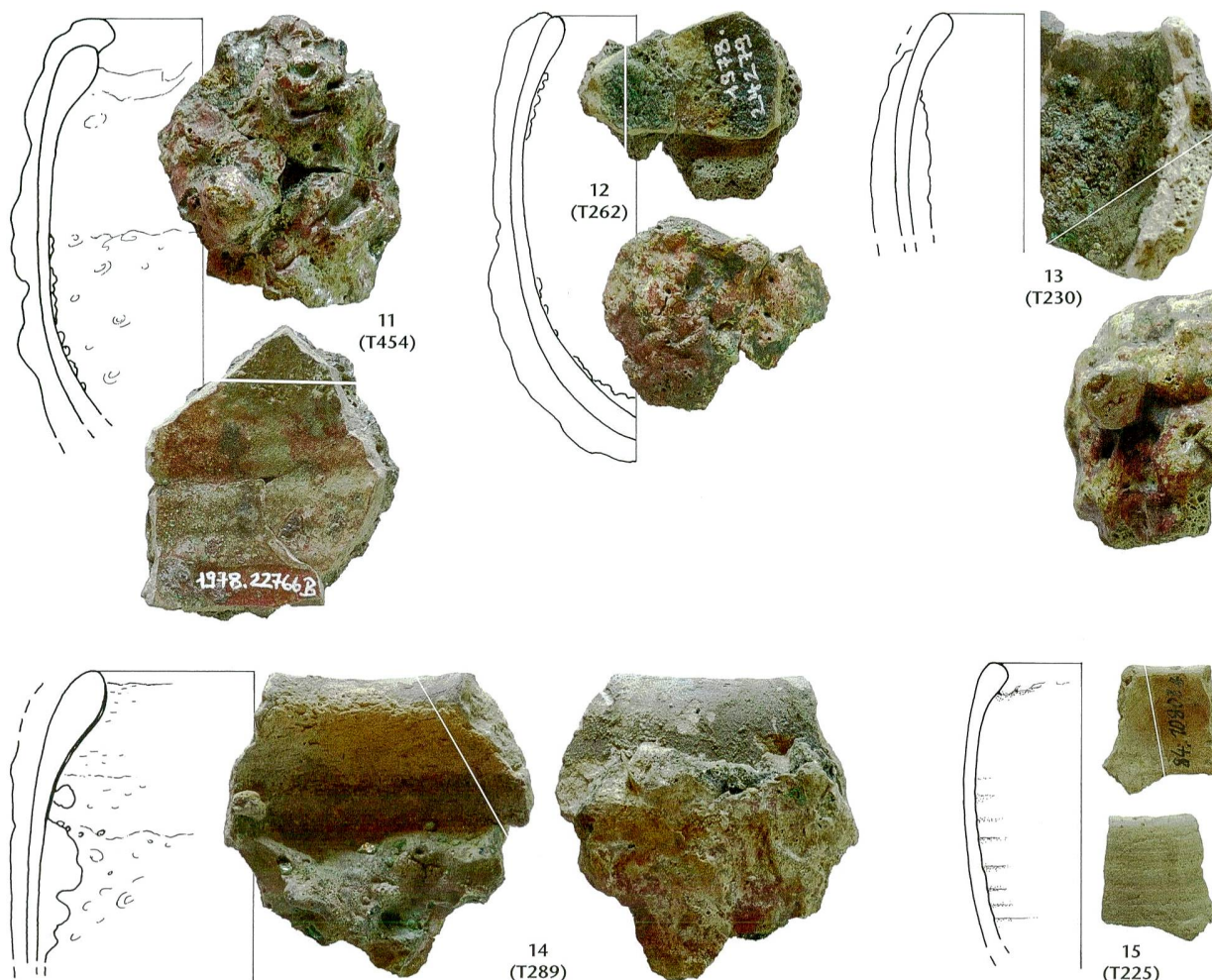


Abb. 3 (Fortsetzung): Analytierte Tiegelfragmente aus Augusta Raurica (Augst/BL und Kaiseraugst/AG). Die weissen Linien zeigen die Sägeschnitte zur Probenentnahme; das jeweils kleinere Teilstück stand für die Analysen zur Verfügung. 11: 1978_22766B_d. 12: 1978_24279_a. 13: 1978_24280_a. 14: 1979_18596_c. 15: 1984_10803_c. M. 1:2.

1978_22766_b: (Abb. 3,10) 2 RS und 15 WS eines grossen Schmelztiegels, Rand innen verdickt; Ton hellgrau (im Bruch hellbraun), fein; Oberfläche innen an der Wand bläulichgrau, im Bodenbereich dunkelgrauer dünner Überzug; unten glatt und seitlich mit vertikalen Striemen eines Werkzeugs, aussen Lutum, über den Rand nach innen verstrichen. Die Striemen sind offenbar Spuren vom Wegkratzen der Messingschlacken nach einem Zementationsprozess. Die Striemen reichen unten nur bis auf eine gewissen Höhe und lassen den Boden frei; ein Regulus-Abdruck im Tiegelfboden ist allerdings nicht erkennbar.

T533, Inv. 1978.22766, FK B01781. – Grabung 1963.054, Insula 31. – FK-Datierung: um 125–175 n. Chr. – pRFA-Analysen M. Helfert: Metallspuren (am markanten dunkelgrauen Überzug innen): Cu++, Zn+++ (3 Messungen), Hg.

1978_22766B_d: (Abb. 3,11) 2 RS und 8 WS eines grossen Schmelztiegels, Rand innen verdickt, Durchmesser 76 mm; Ton hellgrau, fein; Oberfläche innen: Glasur (rotbraun), innen an der Wand Spritzer, aussen Lutum (bis 6 mm hoch über den Rand verlaufend).

T454, Inv. 1978.22766B, FK B01781. – Grabung 1978.052, Insula 31. – FK-Datierung: um 125–175 n. Chr. – pRFA-Analysen M. Helfert: Tiegeleramik: Tongruppe 1. – Metallspuren: Cu++ (4 Messungen), Zn++, Au, Hg.

1978_24279_a: (Abb. 3,12) 5 RS, 5 WS und 1 BS eines grossen Schmelztiegels, Höhe ca. 118 mm, Randedurchmesser 53 mm, Rand innen verdickt, Boden eiförmig-spitz; Ton hellgrau, weich verbrannt; Oberfläche: innen grünlicher Belag, Bronzespritzer, aussen Lutum. In

der äusseren Lutumschicht 40 mm lange und 4 mm breite, geradlinige Kerbe (Eindruck).

T262, Inv. 1978.24279, FK B01611. – Grabung 1978.052, Insula 31. – FK-Datierung: um 190–250 n. Chr. – pRFA-Analysen M. Helfert: Tiegeleramik: Tongruppe 1. – Metallspuren: Cu++ (2 Messungen), Sn+ (2 Messungen), Zn+ (2 Messungen).

1978_24280_a: (Abb. 3,13) 2 RS eines mittelgrossen Schmelztiegels, Ton hellgrau, fein, Rand einfach verrundet; Oberfläche innen am Rand anthrazit, innen in der Wandung mit dickem Belag (sandiges Gemisch, mit viel Bronzetropfen), aussen Lutum.

T230, Inv. 1978.24280, FK B01611. – Grabung 1978.052, Insula 31. – FK-Datierung: um 190–250 n. Chr. – pRFA-Analysen M. Helfert: Tiegeleramik: Tongruppe 1. – Metallspuren: Cu+, Sn+, Zn+++.

1979_18596_c: (Abb. 3,14) RS und WS eines mittelgrossen Schmelztiegels, Randedurchmesser ca. 100 mm, Rand innen verdickt; Ton hellgrau, sandig; Oberfläche innen am Rand lehmiger Belag (braun), innen in der Wandung dicker Bronzebelag (Füllung ca. $\frac{2}{3}$ des Tiegels), aussen Lutum.

T289, Inv. 1979.18596, FK B03172. – Grabung 1979.054, Insula 29. – FK-Datierung: um 150–210 n. Chr. – pRFA-Analysen M. Helfert: Tiegeleramik: Tongruppe 1. – Metallspuren: Zn+++ (2 Messungen). – Zwei Bronzetropfen (Bohrproben): Zinnmessinge.

1984_10803_c: (Abb. 3,15) 3 RS eines mittelgrossen Schmelztiegels, Randedurchmesser 52 mm, Rand innen verdickt, sehr schlank (Wandedurchmesser 58 mm), Ton hellgrau, sandig; Oberfläche innen am Rand naturbelassen, innen in der Wandung dünne Glasurflecken

(gelbgrünlich), aussen naturbelassen. Innen deutliche feine Dreh-
rillen.

T225, Inv. 1984.10803, FK C00825. – Grabung 1984.051, Insula 36.
– FK-Datierung: nicht datierbar. – pRFA-Analysen M. Helfert: Tie-
gelkeramik: Tongruppe 1. – Metallsuren: Pb, Ag, As.

Katalog der analysierten Schmelztiegelfragmente aus Aventicum

Mit Ausnahme der Giesserei für Grossbronzen¹³ sind aus
Avenches/VD bisher erst relativ wenige Spuren und Funde
aus Bronze verarbeitenden Werkstätten bekannt gewor-
den¹⁴. Der Fundbestand von Avenches bezüglich Schmelz-
tiegeln scheint weit geringer als jener von Augst/Kaiseraugst
zu sein. Daraus wurden der Bearbeiterin folgende zehn Stü-
cke zur Analyse zur Verfügung gestellt (Abb. 4). Alle Stücke
sind scheibengedreht¹⁵:

67/9918¹⁶: (Abb. 4,1) Boden eines mittelgrossen Schmelztiegels; Ton
hellgrau (im Bruch gelblich), fein; Oberfläche innen mit einer 1–4 mm
dicken anthrazitfarbenen Schicht überzogen, darin Bronzesprit-
zer und -tröpfchen, aussen dünnes glattes Lutum.
Inv. MRA 67/9918¹⁷, FK K3294. – Grabung 1967.01, Insula 20. – FK-
Datierung: um 70–250 n. Chr. (1 Fragment 40–80 n. Chr.).

68/1215: (Abb. 4,2) WS eines grossen Schmelztiegels; Ton grau mit vie-
len weissen Magerungskörnern, sandig; Oberfläche innen anthra-
zit, aussen dick aufgequollenes Lutum.
Inv. MRA 68/1215, FK K3489. – Grabung 1968.03, Insula 8. – FK-
Datierung: um 50–250 n. Chr.

X/3319: (Abb. 4,3) Boden eines kleinen Schmelztiegels, unten spitz
zulaufend; Ton hellgrau, fein; Oberfläche innen grünlichschwarz
verkrustet, schwarze dünne Schicht auf dem Tiegeltun, aussen d-
ickes Lutum.
«X/3319». – Grabung, Lokalisierung und Datierung unbekannt.

03/11712-21: (Abb. 4,4) WS/BS eines kleinen Schmelztiegels, unten spitz
zulaufend; Ton hellgrau, fein; Oberfläche innen grauweisslich ver-
brannt (und ein vertikaler Hitzeriss im Innern), aussen Lutum.
Inv. MRA 03/11712-21, FK K11712; Grabung 2003.02, Aux Conches
Dessus. – FK-Datierung: 1.–3. Jh. (mehrheitlich 2./3. Jh.).

67/5437(1): (Abb. 4,5) WS/BS eines mittelgrossen Schmelztiegels; Ton
im Bruch innen hellgrau und aussen grau, fein; Oberfläche innen
wenig verkrustet, aussen sehr dickes Lutum, aufgetragen in zwei
deutlichen separaten Schichten von 6 mm resp. ca. 11 mm.
Inv. MRA 67/5437, FK K3434; Grabung 1967.06, Insula 8. – FK-Da-
tierung: 1.–3. Jh.

67/8442: (Abb. 4,6) Vertikales Teilstück eines kleinen Schmelztiegels,
Rand spitz-verrundet, unten spitz zulaufend, Höhe ca. 65 mm (ohne
Lutum), Raddurchmesser ca. 45 mm; Ton grau und stark blasig
verbrannt (mit feiner Rissbildung im Innern), sandig; Oberfläche
innen völlig verbrannt, aussen Lutum.
Inv. MRA 67/8442, FK K3270; Grabung 1967.01, Insula 20. – FK-
Datierung: um 50–80/100 n. Chr.

67/8519: (Abb. 4,7) Vertikales Teilstück eines kleinen Schmelztiegels,
Rand verrundet, unten spitz zulaufend, Höhe ca. 70 mm (ohne Lu-
tum), Raddurchmesser ca. 40 mm; Ton dunkelgrau, porös und
weich verbrannt, sandig; Oberfläche innen ausgeglüht, aussen Lu-
tum, das fast 20 mm über den Rand hinaus reicht (Abdrücke eines
Deckels nicht sichtbar; Funktion des Lutumüberstands unklar).
Inv. MRA 67/8519, FK K3273; Grabung 1967.01, Insula 20. – FK-Da-
tierung: um 50–250 n. Chr.

83/835: (Abb. 4,8) WS eines mittelgrossen Schmelztiegels; Ton grau,
porös, mit feinen hellen Magerungskörnern, sandig; Oberfläche
innen naturbelassen mit braunen Flecken, aussen dickes Lutum.
Inv. MRA 83/835, FK K5552. – Grabung 1983.05, Insula 23. – Ohne
FK-Datierung.

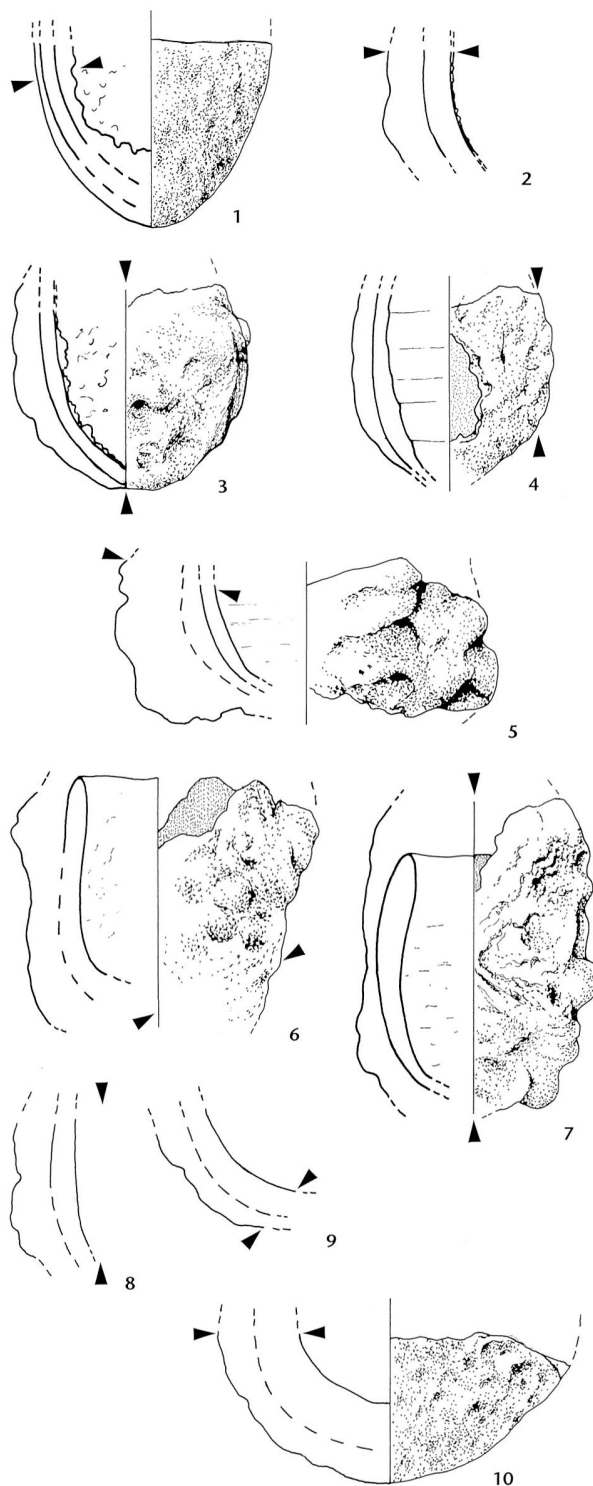


Abb. 4: Analysierte Tiegelfragmente aus Aventicum (Avenches/VD). Die Pfeile
zeigen die Sägechnitte zur Probenentnahme; das in der Abbildung fehlende,
kleinere Teilstück stand für die Analysen zur Verfügung. 1: 67/9918. 2: 68/1215.
3: X/3319. 4: 03/11712-21. 5: 67/5437(1). 6: 67/8442. 7: 67/8519. 8: 83/835.
9: 79/13516. 10: 73/3409. M. 1:2.

13 Morel/Chevalley 2001.

14 Bögli 1996, Abb. 71; Hochuli-Gysel/Picon 1999; Duvauchelle/Ogay
1999, 127 f.; Serneels/Wolf 1999, 155 ff.; Meylan Krause 1999, Abb. 31.

15 Die Kontrolle der Inventar- und Fundkomplexnummern verdanke
ich Sophie Delbarre-Bärtschi und Marie-France Meylan Krause.

16 Analyseprobennummer D. König.

17 Inventarnummern des Musée Romain, Avenches/VD.

79/13516: (Abb. 4,9) WS eines grossen Schmelztiegels; Ton dunkelgrau, porös verbrannt, sandig, mit wenigen erkennbaren hellen Magerungskörnern; Oberfläche innen ausgebrannt, aussen dünnes Lutum.

Inv. MRA 79/13516, FK K5060. – Grabung 1979.04, Insula 14. – Bemerkung zur Datierung: Mitfunde eines Kruges des 1. Jhs. n. Chr.

73/3409: (Abb. 4,10) Boden eines grossen Schmelztiegels; Ton dunkelgrau, mit wenigen erkennbaren hellen Magerungskörnern, sandig; Oberfläche innen naturbelassen (grau), mit feinen Haarrissen, aussen Lutum.

Inv. MRA 73/3409, FK K4172; Grabung 1973.01, Insula 23 ouest. – FK-Datierung: um 50–200 n. Chr.

Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestehen darin, die unterschiedlichen Gruppen von Schmelztiegeln beider Ausgrabungen (*Augusta Raurica* und *Aventicum*) näher zu charakterisieren. Hierbei sollen folgende Fragen/Punkte geklärt werden:

- Anzahl der keramischen Lagen (Tiegelkeramik und Lutum),
- geochemische und mineralogische Zusammensetzung der einzelnen Lagen,
- Brenntemperaturen (Vorbrand oder Verwendungstemperaturen) der unterschiedlichen Tiegel,
- mögliche Ausgangsmaterialien für die unterschiedlichen Lagen identifizieren,
- Nachweis von Handelsbeziehungen zwischen den beiden römischen Städten bzw. Handel der Schmelztiegel von einem dritten Ort in die beiden Städte erbringen und/oder kritisch betrachten.

Zur eingängigen Betrachtung und Auseinandersetzung mit diesen Fragen wurde eine Reihe naturwissenschaftlicher Standardmethoden ausgewählt, deren Funktionsweisen im folgenden Abschnitt kurz vorgestellt werden sollen.

Naturwissenschaftliche Analysemethoden

Ausgewählte Tiegelfragmente wurden mithilfe einer Steinsäge zu quaderförmigen, repräsentativen Klötzchen gesägt, von denen anschliessend polierte, lichttransparente 20–35 µm dicke Dünnschliffe angefertigt wurden. Diese wurden im Anschluss mittels eines petrografischen Polarisationsmikroskops untersucht, wodurch erste Befunde bezüglich Magerungsverteilung und Art der Magerung¹⁸ aufgenommen werden konnten. Diese Schliffe fanden ebenfalls Verwendung für die Analysen am Rasterelektronenmikroskop «FEI SIRION XL 30S FEG» (REM).

Pulverproben wurden mithilfe einer aus Wolframcarbidge bestehenden Scheibenschwingmühle angefertigt. Eine qualitative Phasenanalyse wurde mittels Röntgenpulverdiffraktion (RPD) unter Verwendung eines «PHILIPS PW1800» durchgeführt. Die chemische Zusammensetzung der Ge-

samtprobe wurde mit einem wellenlängendispersiven Röntgenfluoreszenzspektrometer «PHILIPS PW2400» (RFA) ermittelt. Alle Daten wurden an gepressten Pulvertabletten oder Glastabletten mit einem Gewicht von 1,5–3 Gramm und dem Analyseprogramm «Uniquant» für Presstabletten respektive «Basalt» für Glastabletten generiert¹⁹.

Petrografische und geochemische Beschreibung der untersuchten Schmelztiegel

Makroskopische, mikroskopische und rasterelektronenmikroskopische Charakterisierung der Tiegelfragmente

Die untersuchten Tiegel wurden nach makroskopischer Ansprache grob in drei Gruppen unterteilt. Eine Gruppe bilden die Schmelztiegel aus *Augusta Raurica*, welche unbe- nutzt waren und keine äussere Lage (Lutum) aufwiesen (T128, T168, T225). Dieser Gruppe von Tiegeln konnte ein Exemplar aus *Aventicum* (MRA 03/11712-21) zugeordnet werden, welches jedoch mindestens einmal verwendet wurde und partiell eine äussere Lage aufweist. Ansonsten zeigt die innere Lage des Tiegels makroskopisch und mikroskopisch gleiche Eigenschaften und lässt somit auf einen gemeinsamen Ursprung/Produzenten schliessen. Gemeinsamkeiten dieser Schmelztiegel sind ihre relativ geringe Grösse und die markanten Rillen, die durch die Herstellung auf der Töpferscheibe entstanden sind.

Eine weitere Gruppe bilden die grob gemagerten Schmelztiegel, welche sowohl in *Augusta Raurica* (T862, T688), als auch in *Aventicum* (MRA 67/8519, MRA 68/1215, MRA 73/3409, MRA 83/835) gefunden wurden. Diese Tiegel zeichnen sich durch eine mit blossen Auge deutlich erkennbare Magerung aus, die überwiegend aus weissen bis farblosen Mineralen (Feldspat und Quarz) besteht. Alle Tiegel dieser Gruppe zeigen eine zweite äussere Lage, welche in allen Fällen verglast ist. In dieser Lage findet man nur in seltenen Fällen mineralische Magerungskomponenten.

Die dritte und grösste Gruppe der von mir untersuchten Tiegel bilden jene, die keine makroskopisch erkennbare Magerung aufweisen. Zu diesen Tiegeln zählen T503, T231, T548, T673, T552, T533, T454, T262, T230 und T289 aus *Augusta Raurica* und MRA X/3319, MRA 67/5437(1), MRA 67/8442, MRA 67/9918 und MRA 79/13516 aus *Aventicum*. Diese Tiegel werden charakterisiert durch eine meist hellgraue feinkörnige Matrix mit geringer halboffener Porosi-

18 Magerung ist in der Keramikherstellung eine Technik, mit der zu fette Tone mit Beimengung zum Beispiel von Sand oder gemahlene Scherben verfestigt wurden. Die Zuschlagsstoffe sind oftmals mineralischer Natur.

19 König u. a. 2014.



Abb. 5: Querschnitt durch einen fein gemagerten Schmelztiegel (links) mit doppelter äusserer Lage (MRA 67/5437(1)) und einen grob gemagerten Schmelztiegel (rechts) mit einfacher äusserer Lage (MRA 68/1215). M. 1:2.

tät in der inneren keramischen Lage. Mikroskopisch sind aber auch in diesen Tiegeln mineralische Magerungskomponenten erkennbar. Sie setzen sich vorwiegend aus Quarz und Feldspat zusammen, wie sie auch bei den grob gemagerten Tiegeln vorkommen. Die äussere Lage hingegen ist bei diesen Schmelztiegeln überwiegend verglast, wie schon bei den grob gemagerten Tiegeln beschrieben.

Sowohl die grob als auch die fein gemagerten Tiegel zeichnen sich zusätzlich durch eine dünne (200–400 µm) verglaste Lage an der Innenseite aus. Diese Lage besitzt eine Schutzfunktion, das heisst, sie schützte vor Metallverlust durch Risse der inneren keramischen Lage. Ausserdem konnte an dieser sehr glatten Oberfläche das Metall deutlich leichter ausgegossen und nahezu 100% des geschmolzenen Metalls zurückgewonnen werden.

Im Querschnitt betrachtet sind die beiden verwendeten Typen von Schmelztiegeln gleich aufgebaut, wobei die innere Lage der grob gemagerten Tiegel oftmals etwas dicker als bei den fein gemagerten Tiegeln ist (Abb. 5).

Die Schmelztiegel bestehen alle aus einer keramischen, nicht verglasten, inneren Lage, welche je nach Typ grob oder fein gemagert sein kann. Des Weiteren besitzen sie eine mehr oder minder stark verglaste äussere Lage, welche als Lutum bezeichnet wird. Mit den unterschiedlichen Möglichkeiten der Herstellung und Zusammensetzung dieses Lutums beschäftigt sich Alex R. Furger in seiner Monografie über die Schmelztiegel von *Augusta Raurica*²⁰. Die äussere Lage kann doppelt vorkommen (Abb. 5 links) und ist deshalb ein Indiz für die Mehrfachnutzung der Schmelztiegel. Sowohl an Fundstücken als auch experimentell konnte beobachtet werden, dass die innere Lage vollkommen intakt blieb, wohingegen die äussere Lage bei zu grosser Hitze zu fließen begann und sich am Boden des Gefässes verdickte. Um den Tiegel dann erneut verwenden zu können, wurde gelegentlich eine neue Lage aufgebracht. Dies diente dazu, den vollständigen Isolationseffekt dieser Lage wieder herzustellen. Ausserdem stellt die äussere Lage eine Art Schutzschicht dar, welche durch die hohe plastische Verformbarkeit beim Zerschlagen der inneren keramischen Lage, beispielsweise durch zu hohen mechanischen Druck der Tiegelflange, den Tiegel dennoch zusammenhielt.

Eine weitere charakteristische Eigenschaft, die in einigen der analysierten Tiegelfragmente beobachtet werden konnte, ist eine violette Färbung der inneren Tiegelkeramik, welche in direktem Zusammenhang mit der Diffusion von Zink aus der metallischen Schmelze in die Keramik steht und vorwiegend bei Zementationstiegeln beobachtet werden kann. Der Farbgradient geht dabei von dunkelvioletten am inneren Rand zu hellviolett am Übergang zwischen innerer Keramik und äusserer verglaster Lage. Bei der chemischen Untersuchung dieser Keramik mittels des REMs ist eine Abnahme des Zinkgehaltes von innen nach aussen zu beobachten.

Bei den Untersuchungen, welche mithilfe des REMs durchgeführt wurden, können die drei makroskopisch beziehungsweise mikroskopisch unterscheidbaren Lagen der Schmelztiegel deutlich voneinander abgegrenzt werden. Durch die Aufnahme unterschiedlicher Elemente (Elementverteilungskarten) getrennt nach Einzelelementen, kann besonders mittels der Elemente Kalzium, Aluminium und Silizium eine Trennung der einzelnen Lagen durchgeführt werden (Abb. 6). Dabei ist Kalzium in der dünnen verglasten Innenlage im Gegensatz zur inneren keramischen Lage angereichert und Aluminium und Silizium sind abgereichert. Ein ähnliches Bild zeichnet sich beim Übergang von der inneren keramischen Lage hin zur äusseren verglasten Lage ab, in der ebenfalls Kalzium angereichert und Aluminium und Silizium im Verhältnis abgereichert sind.

Des Weiteren können mithilfe der REM-Analysen die makroskopischen und mikroskopischen Beobachtungen zu den Magerungskomponenten bestätigt werden, nämlich dass sie aus Quarz und Feldspat zusammengesetzt sind (Abb. 7).

Die äussere vollständig verglaste Lage zeigt zumeist nur noch Quarz als Magerungskomponente sowie runde Porenräume, die als geschlossene Porosität bezeichnet werden können (Abb. 8). Die Feldspäte, welche möglicherweise auch einen Teil der Magerung dieser Lage bildeten, können nicht mehr nachgewiesen werden, da sie vollständig verglast und

20 Furger in Vorb.

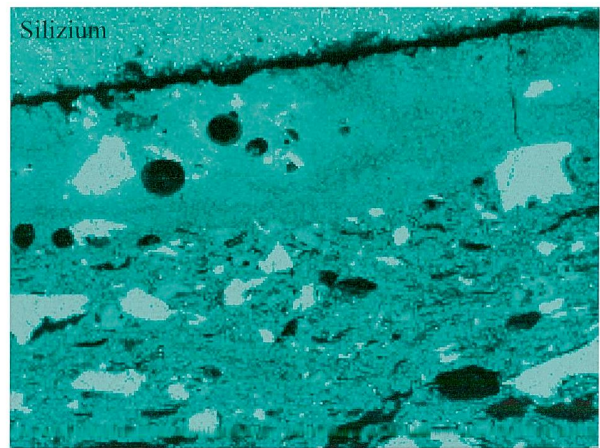
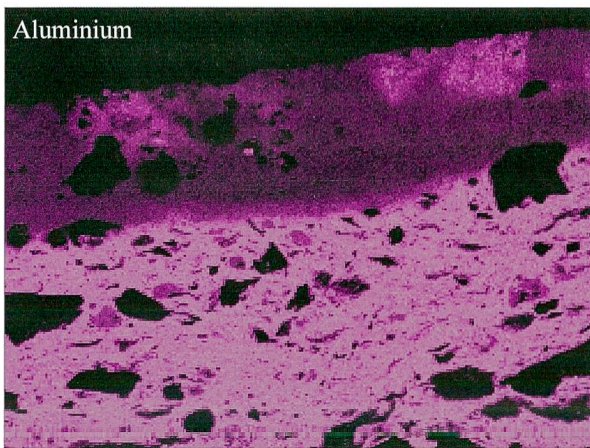
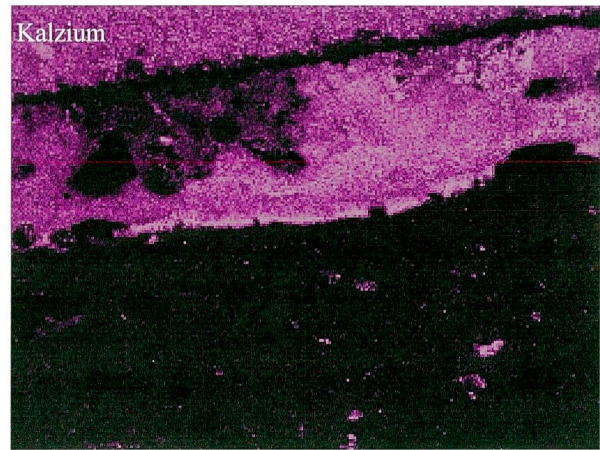
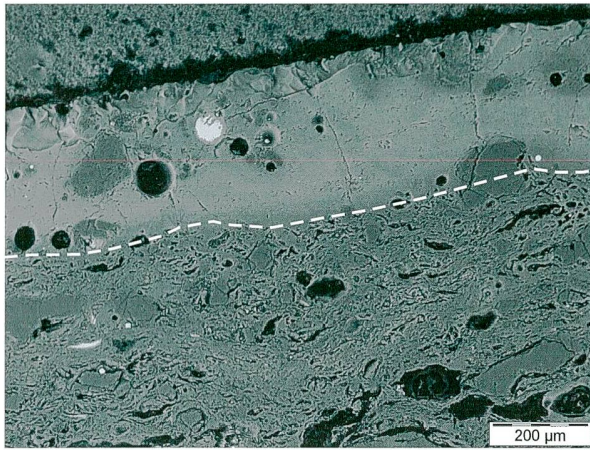


Abb. 6: Elementverteilungskarten der Elemente Kalzium, Aluminium und Silizium aus der inneren keramischen Lage mit der verglasten innersten Schicht; Grenze zwischen Engobe und innerer keramischer Lage als gestrichelte Linie eingetragen (MRA 68/1215).

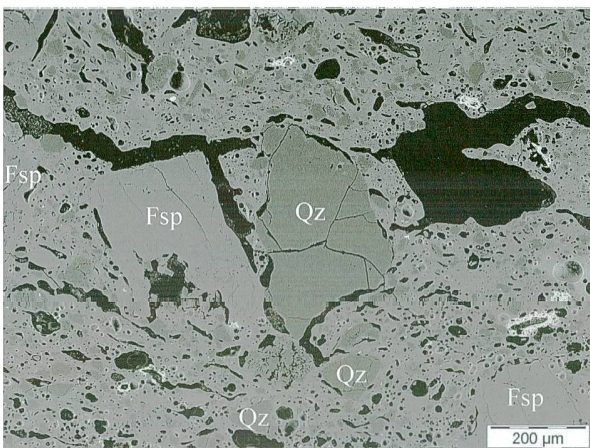


Abb. 7: REM-Aufnahme der inneren keramischen Lage des Schmelztiegels T862 mit Quarz (Qz) und Feldspat (Fsp) als Magerungskomponenten, wobei der Feldspat bereits vollständig aufgeschmolzen ist. Das Bild stammt aus dem äusseren Bereich der inneren keramischen Lage.

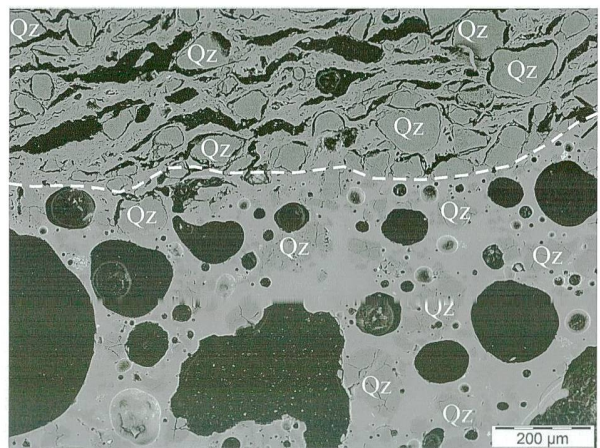


Abb. 8: REM-Aufnahme von der Grenze (gestrichelte Linie) zwischen innerer keramischer Lage und der äusseren verglasten Lage (Lutum) mit Quarz (Qz) als Hauptmagerungskomponente und einer halb offenen Porosität (längliche Porenräume) in der inneren Lage sowie einer vollständig geschlossenen Porosität (runde Porenräume) in der äusseren Lage. Das Bild zeigt Schmelztiegel MRA 67/5437(1).

damit ein Teil der verglasten Grundmatrix geworden sind. Allein aufgrund dieser Beobachtung kann allerdings nicht entschieden werden, ob es in der initialen Zusammensetzung

vor dem Brand der äusseren Lage Feldspäte gegeben hat oder nicht.

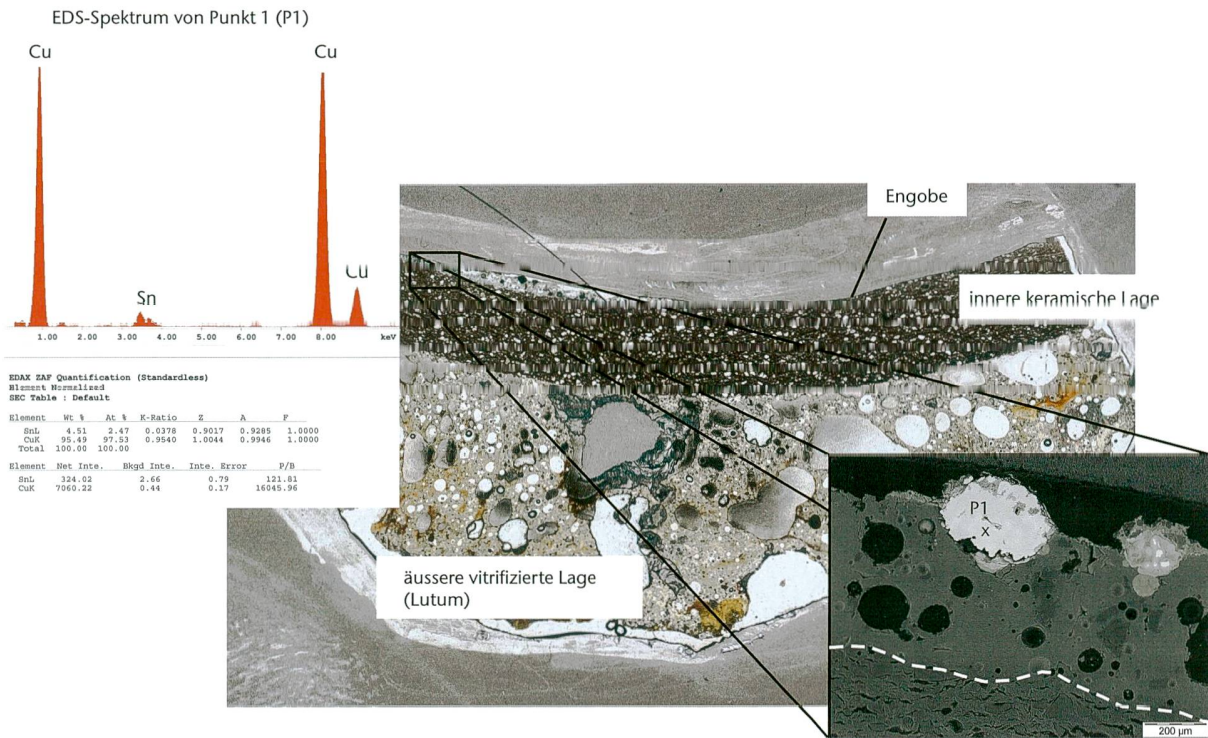


Abb. 9: Dünnschliff von Probe T454 mit einer REM-Aufnahme aus der inneren keramischen Lage mit Engobe und darin eingebettetem Metalltröpfchen. Das Metalltröpfchen besteht aus einer Kupfer-Zinn-Legierung und wurde mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDS) semi-quantitativ gemessen.

Ausserdem konnten mittels des REMs feinste Metalltröpfchen, die sich auf der Engobe fanden, analysiert werden. Bei diesen Tröpfchen handelt es sich vorwiegend um Kupfer-Zinn-Legierungen (Abb. 9), aber auch Kupfer-Zink-Legierungen konnten nachgewiesen werden. Da die Anzahl der Tröpfchen jedoch aufgrund der Engobe und deren Oberflächeneigenschaften sehr gering ist, kann mithilfe dieser Methode keine allgemeingültige Aussage über die Zusammensetzung der eingeschmolzenen Metalle getroffen werden. Auch kommt es durch eine Mehrfachnutzung der Tiegel zu einer Veränderung der Metalltröpfchen, welche aus einer älteren Verwendung stammen, da diese Tröpfchen an Zink abgereichert werden.

Chemische Zusammensetzung

Die chemische Gesamtzusammensetzung der Schmelztiegel wurde mittels Röntgenfluoreszenzspektrometrie an den aufgemahlenen Gesamtproben bestimmt (Tabelle 1; 2). Das heisst, für die Analysen wurden keramische Grundmatrix und Magerung nicht getrennt. Daraus folgt, dass die Resultate nicht der Ausgangstonzusammensetzung entsprechen, sondern durch die Magerung verändert wurden. Was hingegen versucht wurde, war, die Trennung der inneren keramischen Lage und der äusseren verglasten Lage zu erzielen. Dabei war es wichtig, dass eine ausreichende Probenmenge

für die Analysen zur Verfügung stand. Aus diesem Grund wurden nach Lagen getrennte Analysen nur für die Proben T552, T862, T688, T262, T230, MRA X/3319, MRA 67/5437(1) und MRA 68/1215 durchgeführt. Bei allen weiteren untersuchten Schmelztiegeln wurde die chemische Zusammensetzung für beide Lagen gemeinsam bestimmt. Die Abbildung 10 zeigt die geochemischen Ergebnisse der in Tabelle 1 und 2 aufgelisteten Analysen. Dabei lassen sich deutlich zwei Gruppen von Keramiken unterscheiden, die nicht im Fundort, sondern in der Magerungsart übereinstimmen. Diese beiden Gruppen entsprechen zwar nicht genau den makroskopischen Untersuchungen, geben aber einen Hinweis auf die unterschiedlichen Magerungsarten. Ausserdem kann es auch als Hinweis für unterschiedliche Ausgangstone, welche für die verschiedentlich gemagerten Keramiken verwendet wurden, gewertet werden. Die chemischen Zusammensetzungen sind ein Indiz für die Temperaturstabilitäten der verwendeten Schmelztiegel und deren Erweichungspunkt: Die Abbildung 11 zeigt deutlich, dass die Keramiken bis zu Temperaturen von 1600 °C stabil sind. Derartig hohe Temperaturen wurden aber mit Sicherheit nicht erreicht und können somit keinesfalls als Verwendungstemperaturen, sondern ausschliesslich als Stabilitätstemperaturen der analysierten Schmelztiegel angesehen werden. Verwendungstemperaturen lassen sich mittels der geochemischen Analysen nicht ermitteln, dafür sind optische und röntgenografische Analysen notwendig.

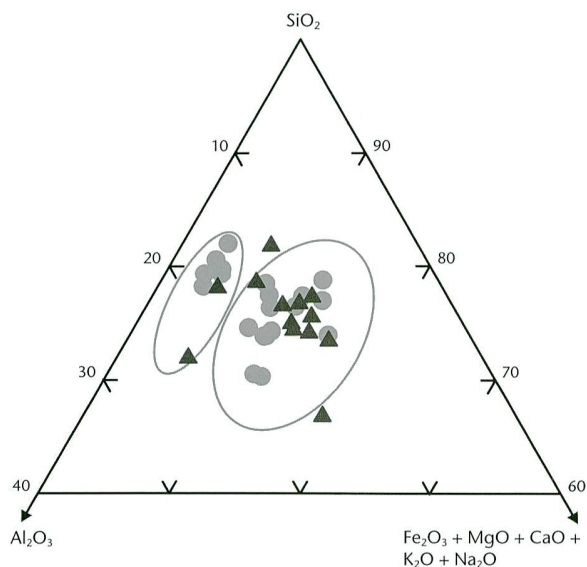


Abb. 10: Ternäres Diagramm, welches die chemische Verteilung der Proben aus Augusta Raurica (graue Kreise) und Aventicum (dunkelgraue Dreiecke) zeigt. Dabei sind deutlich zwei Gruppen voneinander zu unterscheiden.

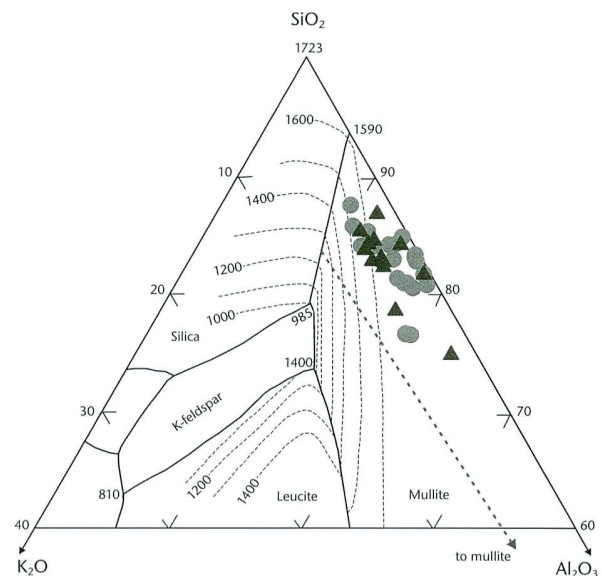


Abb. 11: Ternäres Diagramm, welches die Temperaturstabilität der untersuchten Keramiken verdeutlicht. Graue Kreise entsprechen den Proben aus Augusta Raurica und dunkelgraue Dreiecke denen aus Aventicum (verändert nach Osborn 1977 und Maggetti u. a. 2010).

Röntgendiffraktometrie

Röntgendiffraktometrie wurde dazu verwendet, die Schmelztiegel mineralogisch zu charakterisieren und die genaue Mineralzusammensetzung zu identifizieren (Tabelle 3). Dabei ist zu betonen, dass man damit nur die aktuelle Zusammensetzung, nicht aber eindeutige Rückschlüsse auf die genauen Ausgangstone und Magerungszusammensetzungen erhält. Das heisst, wenn Tonminerale, Glimmer oder Feldspäte während des Brennprozesses entwässern, können sie röntgenografisch nicht mehr dargestellt werden, da sie verglasen. Dies passiert bei Tonmineralen häufig schon bei relativ niedrigen Temperaturen (Kaolinit zu Meta-Kaolinite bei 500–600 °C; illitische Tone bei ca. 900 °C)²¹. Auch kommt es bei der Bodenlagerung oftmals zu Mineralumwandlungen, die durch Austauschprozesse mit dem Bodenwasser bedingt sind. Alle diese Veränderungen müssen berücksichtigt werden, wenn man die mineralogische Zusammensetzung der Schmelztiegel interpretieren möchte. Die bestimmten Mineralphasen zeigen deutlich, dass die Zusammensetzungen der inneren und der äusseren Lage voneinander abweichen. Das hat zum einen seine Ursachen in der Migration von Zink, welches zur Bildung von Gahnit (ZnAl_2O_4) und Willemmit ($\text{Zn}_2(\text{SiO}_4)$) innerhalb der inneren Lage führt und aus diesem Grund in der äusseren Lage nicht beobachtet werden kann, zum anderen, dass die Hitzeeinwirkung nicht überall gleich war und die Mineralumwandlung in einigen Proben noch nicht so weit vorangeschritten ist wie in anderen untersuchten Schmelztiegeln. Alle Proben zeigen ausnahmslos Quarz, welcher auch makroskopisch und mikroskopisch überall als Magerung identifiziert werden konnte. Die Feldspäte, welche nicht in allen Diffraktogrammen identifiziert

werden konnten, setzten sich vorwiegend aus Kalium-Feldspat und Plagioklasen zusammen. Eine genauere Differenzierung der einzelnen Plagioklase wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgenommen. Mullit als Hauptmatrixmineral ist nicht in allen Proben vorhanden. Dies hat, wie oben bereits erwähnt, seine Ursache in unterschiedlich starken Hitzeeinwirkungen auf die Keramik. Die Proben, die keinen Mullit im Diffraktogramm aufweisen, besitzen Meta-Kaolinit, welcher röntgenamorph ist und mittels dieses Analyseverfahrens nicht dargestellt werden kann. Cristobalit tritt nur in einigen Proben auf und kann als primärer Magerungsbestandteil ausgeschlossen werden. Das bedeutet, dass auch dieses Mineral als Indikator für Temperatureinwirkungen verwendet werden kann.

Verwendete Tone für die Tiegelerstellung und deren Brenntemperaturen

Ausgangsmaterialien für die unterschiedlichen keramischen Lagen

Für *Augusta Raurica* kann nachgewiesen werden, dass die importierten Tiegel nie mit einer Lutumschicht importiert worden sind. Diese äussere Lage («Verschleisschicht») wurde immer aus regionalem Ton der Region Kaiseraugst-Zelgli-

²¹ Velde/Druc 1999.

hof – vermutlich in den Giessereien selbst – gemischt und auch auf die Tiegel regionaler Produktion aufgetragen²². Beim Lutum sind die Zuschlagsstoffe entscheidend, da diese zu einem unterschiedlichen Verhalten bei Temperatureinwirkungen führen. Die keramische innere Lage eines Grossteils der untersuchten Tiegel besteht aus einem Ton, welcher in seiner Grundzusammensetzung eine Mischung von kaolinitischem und illitischem Ton aufweist. Die zugegebene Magerung besteht aus Quarz, Kalium-Feldspat und Plagioklas. Da diese Komponenten teilweise als Gesteinsbruchstücke auftreten, kann davon ausgegangen werden, dass es sich entweder um zerkleinerte Gesteine oder um Verwitterungsmaterial von Gesteinen handelt.

Bei der äusseren verglasten Lage kann von einer ähnlichen Grundtonzusammensetzung ausgegangen werden. Allerdings müssen weitere Zuschlagsstoffe ausser der Magerung, welche vorwiegend aus Quarz besteht, zugegeben worden sein. Die dafür infrage kommenden historischen Rezepte werden von Alex R. Furger in einem ausführlichen Exkurs über das Lutum zusammengestellt und in Experimenten mit verschiedenen Mischungen wurde versucht, den römischen Originalen möglichst nahe zu kommen²³. Das einzige, was aufgrund der hier durchgeführten Analysen gesagt werden kann, ist, dass die äussere Lage einen erhöhten Anteil an Kalzium als Glasbildner aufweist. Es konnte jedoch kein Rückstand gefunden werden, der auf eine Zugabe von einem bestimmten Gestein, Ton oder von organischen Komponenten schliessen lässt.

Die Engobe im Tiegellinnern wurde vermutlich aus der Tonmischung für die äussere Lage, in *Augusta Raurica* also aus lokalem Material, hergestellt. Dafür musste diese aufgeschlämmt werden, um sie möglichst dünn auftragen zu können. Dazu kommt, dass nur wenige Magerungskomponenten in dieser dünnen Schicht zu finden sind, was durch Aufschlännen der initialen Tonmischung und kurzes Warten, während dessen die groben Bestandteile absegregieren können, erreicht werden kann. Die Lage wird auf die bereits vorgetrocknete oder bei niedrigen Temperaturen vorgebrannte innere Keramik durch Ausschwenken mit der Emulsion aufgebracht.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die beiden unterschiedlichen Gruppen von Schmelztiegeln, nämlich die grob und die fein gemagerten, auch aus unterschiedlichen Tönen und Zuschlagsstoffen hergestellt wurden, welche geochemisch nicht sehr stark variieren, jedoch aus unterschiedlichen Quellen stammen²⁴. Die Tiegel mit dem höheren Anteil an grober Magerung besitzen gesamtchemisch betrachtet das gleiche Verhältnis von Silizium zu Aluminium wie die fein gemagerten Schmelztiegel, was auf eine ähnliche Grundtonzusammensetzung schliessen lässt.

Brenntemperaturen

Die Höhe der Brenntemperaturen kann immer nur für die höchste der im Verwendungsprozess verwendeten Temperaturen bestimmt werden. Dabei stützt sich die hier angewendete Methode ausschliesslich auf die mittels XRD bestimmten Mineralparagenesen. Für die Eingrenzung der Temperaturbereiche können vor allem Mullit und Cristobalit sowie der Spinell verwendet werden. Die Abwesenheit von Mullit in einigen Proben wird als Vorhandensein einer röntgenamorphen Phase, nämlich Meta-Kaolinit, gewertet. Für diese Proben kann eine Brenntemperatur zwischen 500 °C und 700 °C angenommen werden²⁵. Proben, in denen nur Spinell vorhanden ist, zeichnen einen Übergangsbereich von Meta-Kaolinit zu Mullit nach und sprechen für eine Brenntemperatur von etwa 700 °C. Proben, in denen Mullit nachgewiesen werden konnte, sind für Brenntemperaturen über 950 °C charakteristisch²⁶. Da mittels REM-Analysen nur primärer und kein sekundärer Mullit nachgewiesen werden konnte, kann eine Verwendungstemperatur unter 1100–1200 °C angenommen werden²⁷.

Für die Nutzung als Schmelztiegel für Kupferlegierungen kann eine Verwendungstemperatur, je nach Metallkapazität und Legierungszusammensetzung, von 900 °C bis 1000 °C postuliert werden. Diese Temperatur deckt sich sehr gut mit den mittels Mineralparagenesen bestimmbar Temperaturen.

Vergleichbarkeit der Tone zwischen *Augusta Raurica* und *Aventicum*

Die unterschiedlichen Schmelztiegel aus *Augusta Raurica* und *Aventicum* können bis jetzt mittels der vorgenommenen Analysemethoden nicht voneinander unterschieden werden. Die einzige deutliche Unterscheidung, die durchgeführt werden kann, ist die Trennung von grob und fein gemagerten Tiegeln. Auch die Gruppe der deutlich kleineren und im Fall von *Augusta Raurica* ungebrauchten Tiegeln (T128, T168, T225) kann mit dem einen zwar benutzten, aber optisch und geochemisch identischen Tiegel aus *Aventicum* (MRA 03/11712-21) korreliert werden. Die fein gemagerten Schmelztiegel beider Fundorte zeigen eine Magerung bestehend aus Quarz und Feldspat und für die innere Lage eine keramische Grundmatrix bestehend aus Mullit, was für einen Ton mit einem erhöhten Anteil an Kaolinit spricht. In einigen Fällen findet man Cristobalit, ein Mineral, welches sich durch den Brennvorgang selbst bildet. Ausserdem zeigen einige Tiegel Gahnit und Willemite, Zinkminerale, die bei der Verwendung der Schmelztiegel gebildet wurden.

22 M. Helfert in: Furger in Vorb.

23 Furger in Vorb., Experimente 3 und 4.

24 Ausführlich M. Helfert in: Furger in Vorb.

25 Lee u. a. 2008.

26 Lee u. a. 1999.

27 Lee/Iqbal 2001.

Literatur

- Bögli 1996:* H. Bögli, Aventicum. La ville romaine et le musée. Guides Arch. Suisse 19 (Avenches 1996³).
- Duvauchelle/Ogay 1999:* A. Duvauchelle/A. Ogay, Avenches/En Selley, investigations 1997–1998: un artisanat du fer et du bronze aux I^{er} et II^e s. ap. J.-C. Le petit mobilier. Bull. Assoc. Pro Aventico 41, 1999, 125–131.
- Furger in Vorb.:* A. R. Furger (mit Beiträgen von M. Helfert), Das Bronzehandwerk in Augusta Raurica 1. Archäologie und Archäometrie der Schmelztiegel. Forsch. Augst (in Vorb.).
- Hochuli-Gysel/Picon 1999:* A. Hochuli-Gysel/M. Picon, Les creusets en graphite découvertes à Avenches/Aventicum. Bull. Assoc. Pro Aventico 41, 1999, 209–214.
- König 2014:* D. König, Roman metallurgical ceramics: an archaeometrical approach. GeoFocus 36 (Diss. Fribourg 2014).
- König u. a. 2014:* D. König/M. Helfert/A. R. Furger, Roman crucibles from Augusta Raurica (Augst, Switzerland) – an interdisciplinary approach using both laboratory and portable analysis. In: König 2014, 57–74.
- Lee u. a. 1999:* S. Lee/Y. J. Kim/H. Moon, Phase transformation sequence from kaolinite to mullite investigated by energy-filtering transmission electron microscope. Journal Am. Ceramic Soc. 43, 1999, 2841–2848.
- Lee/Iqbal 2001:* W. E. Lee/Y. Iqbal, Influence of mixing on mullite formation in porcelain. Journal European Ceramic Soc. 21, 2001, 2583–2586.
- Lee u. a. 2008:* W. E. Lee/G. P. Souza/C. J. McConville/T. Tarvornpanich/Y. Iqbal, Mullite formation in clays and clay-derived vitreous ceramics. Journal European Ceramic Soc. 28, 2008, 465–471.
- Maggetti u. a. 2010:* M. Maggetti/J. Rosen/C. Neururer/V. Serneels, Paul-Louis Cyfflé's (1724–1806) Terre de Lorraine: a technological study. Archaeometry 52, 2010, 707–732.
- Meylan Krause 1999:* M.-F. Meylan Krause, Vom Geschirr zum Genuss. Römische Keramik. Doc. Musée Romain Avenches 7 (o. O. 1999).
- Morel/Chevalley 2001:* J. Morel/Ch. Chevalley (avec la coll. de D. Castella), La fabrication de grands bronzes à *Aventicum*: une fosse de coulée dans l'*insula* 12. Bull. Assoc. Pro Aventico 43, 2001, 141–162.
- Osborn 1977:* E. F. Osborn, Phase-diagrams and refractories. Bull. Am. Ceramic Society 56, 1977, 654–659.
- Serneels/Wolf 1999:* V. Serneels/S. Wolf, Les témoignages du travail de fer et au bronze provenant des fouilles *En Selley* à Avenches en 1997. Bull. Assoc. Pro Aventico 41, 1999, 111–123.
- Velde/Druc 1999:* B. Velde/I. C. Druc, Archaeological Ceramic Materials (Berlin 1999).

Abbildungsnachweis

- Abb. 1:*
Karte Daniela König.
- Abb. 2; 3:*
Zeichnungen Felicitas Prescher; Fotos Alex R. Furger.
- Abb. 4:*
Zeichnungen Felicitas Prescher (Stücke des Musée Romain, Avenches/VD).
- Abb. 5–11:*
Grafiken, Fotos und Mikroskopaufnahmen Daniela König.
- Tabellen 1–3:*
Analysen und Zusammenstellung Daniela König.

Tabelle 1: Gesamtchemische Analysen der Proben aus Augusta Raurica, teilweise nach Lagen getrennt (i. l.: innere Lage; a. l.: äussere Lage = Lutum). Dunkelgrau unterlegt sind die Hauptlegierungskomponenten, welche in den Tiegehn eingeschmolzen wurden. 1 Glastabletten. 2 Presstabletten. 3 Glas-Presstabletten. * unbenutzt. n. g.: nicht gemessen. – T-Nummern: Katalognummern in Furger in Vorb. (siehe Katalog S. 219 ff.).

	T503 ¹	T231 ¹	T548 ³	T673 ¹	T552 i. l. ³	T552 a. l. ¹	T862 i. l. ¹	T862 a. l. ¹	T1281 [*]	T1681 [*]	T688 i. l. ²	T688 a. l. ¹	T533 ²	T454 ²	T262 i. l. ³	T262 a. l. ²	T230 i. l. ³	T230 a. l. ¹	T289 ¹	T225 ^{1*}
SiO ₂ (gew.%)	76,9	72,9	73,3	75,0	79,0	77,9	69,4	76,5	78,5	81,1	69,9	76,1	76,9	72,3	76,4	71,2	78,4	75,3	79,0	79,4
TiO ₂ (gew.%)	0,7	0,8	0,7	1,0	0,7	0,6	0,8	0,7	0,9	0,9	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,4	0,9	0,7	0,9	1,3
Al ₂ O ₃ (gew.%)	12,5	15,4	14,8	15,0	15,9	8,7	17,6	10,9	16,1	14,3	17,7	9,6	13,7	16,0	13,4	11,5	17,4	11,9	14,2	15,9
Fe ₂ O ₃ (gew.%)	3,3	3,6	4,5	2,8	2,3	5,7	5,9	4,6	2,3	1,7	5,4	3,9	3,4	3,6	3,4	4,5	1,7	4,3	1,5	1,6
MnO (gew.%)	0,09	0,06	0,22	0,05	0,03	0,12	0,06	0,11	<0,01	<0,01	0,06	0,10	0,09	0,11	0,09	0,39	0,05	0,13	0,01	<0,01
MgO (gew.%)	1,0	0,9	1,1	0,8	0,4	0,9	1,0	1,2	0,6	0,5	1,0	1,3	0,9	1,1	1,1	1,9	0,4	1,3	0,3	0,4
CaO (gew.%)	2,1	2,7	2,1	3,0	1,0	2,1	0,7	2,0	1,0	0,8	0,7	3,7	1,7	3,2	2,8	4,3	0,5	2,0	0,7	0,9
Na ₂ O (gew.%)	1,1	1,3	0,7	0,6	0,2	1,2	0,5	1,3	0,1	0,2	0,6	1,3	0,8	0,8	0,7	1,4	0,1	1,3	2,6	0,3
K ₂ O (gew.%)	1,9	2,0	2,3	1,7	0,4	2,6	3,9	2,5	0,4	0,4	3,9	3,2	1,8	1,9	1,1	3,5	0,4	2,6	0,6	0,2
P ₂ O ₅ (gew.%)	0,3	0,4	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,3	0,0	0,0	0,2	0,4	0,3	0,4	0,4	0,9	0,1	0,4	0,1	0,0
Summe bevor Norm. (gew.%)	97,1	97,1	95,8	97,4	92,8	97,8	96,4	96,4	95,6	97,7	93,4	99,1	87,8	91,9	93,3	92,5	95,5	98,8	96,8	98,1
Summe Norm. (gew.%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Ba (ppm)	306	307	1400	215	2000	325	3498	365	91	112	3800	416	450	800	1400	1200	1900	440	88	87
Cr (ppm)	90	114	<100	114	100	76	98	88	115	105	<100	74	<100	100	100	<100	100	89	101	116
Cu (ppm)	550	1000	32000	200	7200	250	250	700	100	650	500	950	9600	4800	130800	21800	3200	500	600	46
Nb (ppm)	17	16	<100	20	<100	12	18	15	20	21	<100	13	<100	<100	<100	<100	<100	16	17	28
Ni (ppm)	34	44	100	35	n. g.	45	42	45	27	27	<100	30	<100	<100	n. g.	<100	n. g.	44	37	19
Pb (ppm)	250	1200	9700	220	350	140	600	180	25	110	150	90	1100	550	14000	900	2900	610	140	190
Rb (ppm)	77	71	<100	64	<100	85	202	97	26	21	250	117	100	<100	<100	100	<100	101	21	7
Sn (ppm)	100 ²	n. g.	4600	<100 ²	450	n. g.	n. g.	n. g.	n. g.	n. g.	<100	n. g.	250	1250	13200	3100	500	n. g.	<100 ²	n. g.
Sr (ppm)	115	296	<100	108	<100	98	157	131	52	45	150	117	100	150	<100	200	<100	124	38	41
V (ppm)	77	148	130	123	<100	59	108	79	102	90	100	71	100	100	150	<100	150	84	87	86
Y (ppm)	34	29	<100	27	<100	29	34	39	23	24	<100	31	<100	<100	<100	<100	<100	39	21	25
Zn (ppm)	4230	7060	94400	1445	38200	2615	2525	210	60	425	9300	190	15600	1400	9800	2000	36900	2640	73865	20
Zr (ppm)	307	306	300	283	300	341	255	355	242	278	300	276	400	400	300	450	450	365	248	277
Σ Schmelz-%	0,53	0,95	14,69	0,20	4,98	0,31	0,35	0,11	0,02	0,12	1,07	0,12	3,02	0,87	17,98	3,00	4,55	0,38	7,71	0,03

Tabelle 2: Gesamtchemische Analysen der Proben aus Aventicum, teilweise nach Lagen getrennt (i. l.: innere Lage; a. l.: äussere Lage = Lutum). Dunkelgrau unterlegt sind die Hauptlegierungskomponenten, welche in den Tiegehn eingeschmolzen wurden. 1 Glastabletten. 2 Presstabletten. 3 Glas-Presstabletten. * unbenutzt. n. g.: nicht gemessen.

	MRA 67/5437(1) i. l. ³	MRA 67/5437(1) a. l. ¹	MRA 67/8442 ²	MRA 67/8519 ¹	MRA 67/9918 ²	MRA 68/1215 i. l. ³	MRA 68/1215 a. l. ²	MRA 73/3409 ¹	MRA 79/13516 ¹	MRA 83/835 ¹	MRA 03/11712-21 ¹	MRA X/3319 i. l. ³	MRA X/3319 a. l. ²
SiO ₂ (gew.%)	77,4	73,4	73,4	66,0	72,3	71,2	75,5	76,8	78,5	77,8	81,1	77,9	71,8
TiO ₂ (gew.%)	0,8	0,5	0,3	0,6	0,4	0,8	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,3
Al ₂ O ₃ (gew.%)	17,1	12,1	11,8	14,7	13,0	22,4	10,7	11,2	11,2	10,6	11,2	14,0	11,0
Fe ₂ O ₃ (gew.%)	2,0	3,8	4,3	5,2	3,4	2,1	3,6	3,8	2,5	3,0	2,6	3,6	3,5
MnO (gew.%)	0,02	0,13	0,13	0,13	2,56	0,04	0,18	0,11	0,11	0,09	0,05	0,03	0,24
MgO (gew.%)	0,7	1,5	1,3	2,9	1,3	0,7	1,3	1,2	1,2	1,1	0,7	0,8	1,5
CaO (gew.%)	1,2	2,9	2,8	4,7	3,2	0,6	3,8	1,5	1,1	2,3	1,3	1,4	5,7
Na ₂ O (gew.%)	0,3	2,0	1,9	1,9	0,4	0,4	1,1	2,0	2,2	2,0	0,9	0,6	1,8
K ₂ O (gew.%)	0,5	3,3	3,3	3,5	2,6	1,8	3,2	2,6	2,6	2,5	1,3	0,9	3,7
P ₂ O ₅ (gew.%)	0,1	0,3	0,7	0,3	0,8	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5
Summe bevor Norm. (gew.%)	91,2	98,8	86,5	99,2	98,6	97,8	90,6	99,3	99,3	99,2	98,9	95,4	86,1
Summe Norm. (gew.%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Ba (ppm)	2100	441	680	412	1250	23700	1940	374	351	347	207	800	900
Cr (ppm)	150	82	<100	75	<100	<100	100	78	81	73	88	<100	<100
Cu (ppm)	4100	350	1500	900	5550	3000	3400	150	200	71	26	39100	1050
Nb (ppm)	<100	10	<100	14	<100	700	<100	10	8	10	14	<100	<100
Ni (ppm)	n. g.	44	<100	37	<100	n. g.	<100	33	24	29	33	n. g.	<100
Pb (ppm)	800	350	450	1500	150	750	<100	140	500	143	28	26200	400
Rb (ppm)	<100	123	150	156	<100	400	150	103	102	99	59	<100	150
Sn (ppm)	<100	n. g.	800	n. g.	550	n. g.	<100	<100 ²	<100 ²	n. g.	n. g.	28200	450
Sr (ppm)	<100	135	150	143	100	400	150	96	94	111	69	<100	200
V (ppm)	200	67	<100	89	100	n. g.	<100	64	53	51	82	100	<100
Y (ppm)	<100	27	<100	36	<100	<100	<100	32	31	28	22	n. g.	<100
Zn (ppm)	9300	129	4650	90	63500	2000	100	111	3738	92	54	8900	750
Zr (ppm)	350	157	250	153	200	1700	500	183	185	175	200	250	250
Σ Schmelz-%	1,56	0,08	0,86	0,25	7,07	0,59	0,40	0,05	0,45	0,03	0,01	10,73	0,30

Tabelle 3: Mineralogische Zusammensetzung der unterschiedlichen Schmelztiegel, teilweise nach Lagen getrennt (i. l.: innere Lage; a. l.: äussere Lage = Lutum). Die aufgeführten Mineralabkürzungen stehen für folgende Minerale: Cristobalit (Crs); Gahmit (Gah); Mullit (Mul); Plagioklas (Pl); Kalium-Feldspat (k-Fsp); Quarz (Qz); Spinell (Spl); Willemmit (Wil). – T-Nummern: Katalognummern in Furger in Vorb. (siehe Katalog S. 219 ff.).

Probe	Mineralzusammensetzung
<i>Augusta Raurica</i>	
T503	Qz + Crs + Mul
T231	Qz + Crs + Mul
T548	Qz + Crs + Mul + Spl + Wil
T673	Qz + Crs + Mul
T552 i. l.	Qz + Crs + Mul
T552 a. l.	Qz + Crs
T862 i. l.	Qz + k-Fsp + Mul + Spl
T862 a. l.	Qz + k-Fsp
T128	Qz + Crs
T168	Qz + k-Fsp
T688 i. l.	Qz + k-Fsp + Mul + Spl
T688 a. l.	Qz + Crs
T533	Qz + Crs + Mul + Gah
T454	Qz + Crs + Mul
T262 i. l.	Qz + Pl + Crs + Mul + Spl
T262 a. l.	Qz + Crs + Spl
T230 i. l.	Qz + k-Fsp + Crs + Mul + Gah
T230 a. l.	Qz + k-Fsp + Crs
T289	Qz + k-Fsp + Crs + Mul + Wil
T225	Qz + k-Fsp + Crs + Mul
<i>Aventicum</i>	
MRA 67/5437(1) i. l.	Qz + Crs + Mul
MRA 67/5437(1) a. l.	Qz + Crs + Mul
MRA 67/8442	Qz + Pl + k-Fsp + Crs + Mul
MRA 67/8519	Qz + Pl + k-Fsp
MRA 67/9918	Qz + Pl + Mul + Wil
MRA 68/1215 i. l.	Qz + Crs + Mul
MRA 68/1215 a. l.	Qz + Crs
MRA 73/3409	Qz + Pl + k-Fsp + Crs + Mul
MRA 79/13516	Qz + Pl + k-Fsp + Crs + Mul
MRA 83/835	Qz + Pl + k-Fsp + Crs + Mul
MRA 03/11712-21	Qz + Pl + Mul
MRA X/3319 i. l.	Qz + Crs + Mul + Wil
MRA X/3319 a. l.	Qz + Crs