Zeitschrift: Jahresberichte aus Augst und Kaiseraugst

Herausgeber: Augusta Raurica

Band: 31 (2010)

Artikel: Naturwissenschaftliche Untersuchung römischer Mörtel aus Augusta Raurica

Autor: Berner, Peter

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-395730

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 04.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Naturwissenschaftliche Untersuchung römischer Mörtel aus Augusta Raurica

Peter Berner[1]

Zusammenfassung

Im Zentrum der Arbeit steht die naturwissenschaftliche Analyse von römischen Mörteln aus Augusta Raurica (Schweiz). Es sind dies: 26 Putzmörtelproben aus den Insulae 30 und 32, ferner 25 Mauermörtelproben der verschiedenen Bauphasen des römischen Theaters (Grabungen 1992–2007.055) und sechs Mauermörtelproben einer Peristylvilla in der Insula 27 (Grabung 2005.054).

Der Abgleich der Resultate der Mörtelanalysen mit der Lokalgeologie rund um Augusta Raurica soll Hinweise auf die zur Bindemittelproduktion ausgebeuteten Rohstoffquellen und auf die Art und Herkunft des Zuschlags (Sand, Feinkies) bringen. Untersucht wurden 56 Karbonatgesteinsproben und 40 Lockersedimentproben aus der Umgebung von Augusta Raurica.

Das Bindemittel der Theater-Mörtel aller Bauphasen ist Magnesium-reicher als lokaler Doggerkalk, der obere Muschelkalk (Plattenkalk/Trochitenkalk) wurde als wahrscheinliche Rohstoffquelle für die Branntkalkproduktion identifiziert. Der geringe Magnesiumgehalt in den Mörteln der Grabung 2005.054 (Insula 27) deutet auf die Verwendung eines anderen Rohmaterials (oolithischer Doggerkalk?) hin. Als Zuschlag wurden sowohl in den Putz- als auch in den Mauermörteln hauptsächlich lokale Sande mit hohem Gehalt an oolithischem Kalk verwendet.

Das verbreitete Auftreten von Kalkspatzen in den Mauermörteln zeigt, dass der verarbeitete Branntkalk trockengelöscht und nicht eingesumpft wurde. Auch in Putzmörteln treten teilweise Kalkspatzen auf. Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass auch eingesumpfter Kalk zur Anwendung kam, wie dies einige Sumpfgruben in Augusta Raurica nahelegen.

Schlüsselwörter

Augusta Raurica, Bautechnik, Branntkalk, Kalkmörtel, Kies(zuschlag), Löschtechnik, Mauerwerk, Mörtel, Sand(zuschlag), Wandverputz.

Inhalt

Einleitung 208
- Begriffe 208
  - Kalkmörtel 208
  - Augusta Raurica 208
- «State of the Art» und Problemstellung 210
  - Kalkbrennen 210
  - Kalklöschen 214
  - Abbinden des Kalkes, Karbonatisierung 217
  - Zielsetzung der Arbeit 218
- Methoden 218
  - Polarisationsmikroskopie 218
  - Rasterelektronenmikroskopie (REM) 219
  - Quecksilber-Druckporosimetrie (MIP) 219
  - Infrarotspektroskopie 220
  - Röntgendiffraktion (XRD) 220
  - Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) 220
  - Siebanalysen 220
- Probenvorbereitung und Analyse mit AAS 221
  - Bindemittel 221
  - Karbonatgesteine 222
  - Quartärproben 222

Potenzielle Rohstoffe um Augusta Raurica 222
- Einleitung 222
- Rohstoffe für Branntkalk 222
  - Einleitung 222
  - Potenzielle Rohstoffe für Branntkalk um Augusta Raurica 222
  - Auswahl der Gesteinsproben 227
  - Resultate 227
  - Diskussion 230
- Rohstoffe für den Mörtelzuschlag 230
  - Einleitung 230
  - Potenzielle Rohstoffe für Mörtelzuschlag um Augusta Raurica 230
  - Probennahme und Auswahl von Sedimentproben 234
  - Resultate 234
  - Diskussion 236
- Zusammenfassung: Potenzielle Rohstoffe 236

Mörtelanalysen von Augusta Raurica 237
- Putzmörtel: Insula 36 237
  - Material und Probennahme 237
  - Resultate 238

1 Peter Berner, ZI de Pré-Clos, CH-1852 Roche, Mail: peter.berner@geopro.ch. Dieser Aufsatz ist Teil einer Dissertation unter der Leitung von Marino Maggetti (Universität Freiburg, Schweiz). Ich bedanke mich für die grosse Unterstützung bei der Arbeit. Mein Dank gilt auch Alex R. Furger von Augusta Raurica, Christine Bläuer, Vincent Serneels und Frank Winnefeld für Diskussion und Korrekturarbeit, Mirjam T. Jenny Dorn für Layout, Korrekturen und Literaturrecherche, Jean-Paul Bourqui und Christoph Neururer für die Präparation von Materialproben und Unterstützung bei der Arbeit am REM. Das Projekt wurde durch den Schweizerischen Nationalfonds (Projekt 1214-052729.97/1) und die Stiftung Pro Augusta Raurica, Augst mitfinanziert. Die anderen, naturwissenschaftlichen und analytischen Aspekte der Dissertation sind zur Publikation (voraussichtlich 2010) in verschiedenen Fachzeitschriften vorgesehen (s. Literaturliste am Ende dieses Artikels).

Mauermörtel: Theater 241
Material und Probennahme 241
Resultate 241
Mauermörtel und Baureste: Insula 27 (Grabung 2005.054) 243
Material und Probennahme 243
Resultate zum Mauermörtel 245
Resultate zu den Bauresten 247
Diskussion und Ergebnisse 248
Putzmörtel 248
«Theater-Mörtel» 248
Mauermörtel und Baureste 249
in der Insula 27 (Grabung 2005.054) 249
Resultate und Empfehlungen zur Mörtelanwendung in der Denkmalpflege und Ruinenrestaurierung 249
Portlandzement oder Kalkmörtel? 249
Kalkspatzen und Trockenlöschen 250
Vorteile des trockengelöschten gegenüber dem eingesumpften Kalkmörtel 250
Literatur 250
Abbildungsnachweis 253
Tabellen 254
Anhang 259

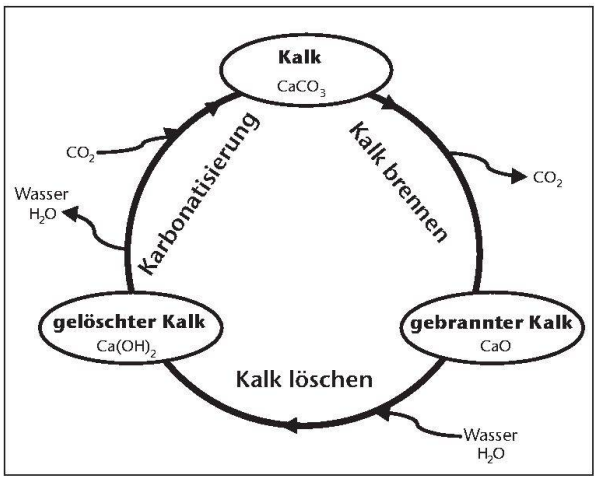


Abb. 1: Der Kalkkreislauf.

Einleitung

Begriffe

Kalkmörtel

Kalkmörtel ist ein mehrphasiges Baumaterial, das sich in frischem Zustand aus gelöschtem Kalk als Bindemittel, Zuschlagsstoffen und Wasser zusammensetzt. Zur Herstellung des Bindemittels wird karbonatreiches Gestein *gebrannt*, z. B. Kalk oder Marmor. Dabei zersetzt sich Kalziumkarbonat in gasförmiges CO_2 und CaO (Abb. 1). Nach dem Abkühlen wird der gebrannte Kalk mit Wasser vermengt. Es bildet sich mit einer stark exothermen Reaktion gelöschter Kalk, $Ca(OH)_2$ (= Portlandit), welcher mit Zuschlag und Wasser vermischt als Putz- oder Mauermörtel in plastischem Zustand verarbeitet wird. Der Mörtel erreicht durch Wasserverlust schnell eine gewisse Grundfestigkeit, Portlandit wandelt sich unter Aufnahme von Kohlenstoffdioxid aus der Luft langsam in Kalziumkarbonat um und härtet so aus.

Die Verwendung von gelöschtem Kalk als Bindemittel lässt sich bis in die Zeit des Neolithikums, um ca. 7000 v. Chr., zurückverfolgen[2]. Kalkmörtel wurde in vielen Kulturen verwendet, so auch in Ägypten und in Griechenland. Eine Hochblüte erlebte die Anwendung in römischer Zeit; die Mörteltechnologie wurde weiterentwickelt und der Einsatz von Puzzolanen (siehe unten) über das ganze Imperium verbreitet. Bis in die Neuzeit galt die Qualität und Dauerhaftigkeit des römischen Mörtels, des *opus caementitium*, als Mysterium. Die Suche nach Materialien mit ähnlichen Eigenschaften führte Ende des 18. Jahrhunderts weg von den bis zu dieser Zeit vorwiegend verwendeten reinen Kalkmörteln, den sogenannten Luftkalkmörteln, zu Bindemitteln mit «hydraulischen» Eigenschaften. Mörtel dieses Typs erhärten auch unter Wasser und weisen höhere Festigkeiten auf als Luftkalkmörtel. Nach der Entdeckung des *Portlandzements* Anfang des 19. Jahrhunderts wurde Kalkmörtel als Baumaterial durch diesen weitgehend verdrängt und die bis zur Industrialisierung bestehende Vormacht von Kalk als Bindemittel ging damit verloren. In den letzten Jahrzehnten hat die Verwendung von gebranntem und gelöschtem Kalk vor allem im Bereich der Denkmalpflege und der Altbausanierung wieder an Boden gewonnen. Es steht dabei einerseits der Wunsch im Vordergrund, sich möglichst an den durch die historischen Bauten vorgegebenen Materialien und Techniken zu orientieren, andererseits haben aber auch die oft unbefriedigenden Restaurierungsergebnisse mit modernen Materialien zum Rückgriff auf «alte», substanzverträglichere Materialien geführt. Dieser Aufschwung der Kalkmörteltechnologie führte auch zu vermehrter Forschung in diesem Bereich.

Augusta Raurica

Die römische Koloniestadt Augusta Raurica (Abb. 2) wurde «politisch» um 44 v. Chr. gegründet. Eine erste Besiedlung des verkehrstechnisch günstig gelegenen Gebiets direkt am Rhein ist aber erst ab ca. 15 v. Chr. nachgewiesen. Es trafen sich hier die Süd-Nord-Verkehrsachse, die das heutige Italien mit dem Rheinland verband, und die dem oberen Rhein entlang führende West-Ost-Verbindung von Gallien bis an die obere Donau. Der Rhein, der bis Augst hinauf schiffbar ist, spielte zudem eine wichtige Rolle für den Gütertrans-

2 Malinowski/Garfinkel 1991.

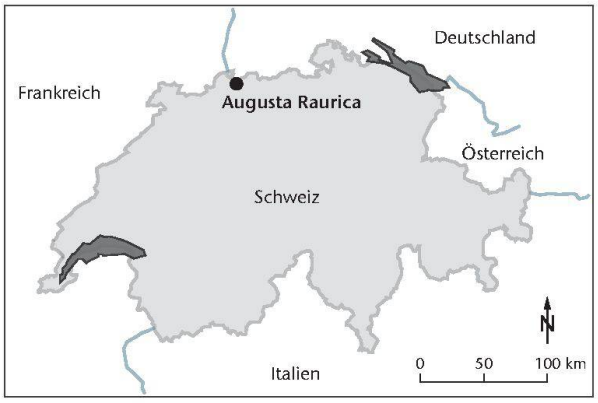


Abb. 2: Geografische Lage von Augusta Raurica.

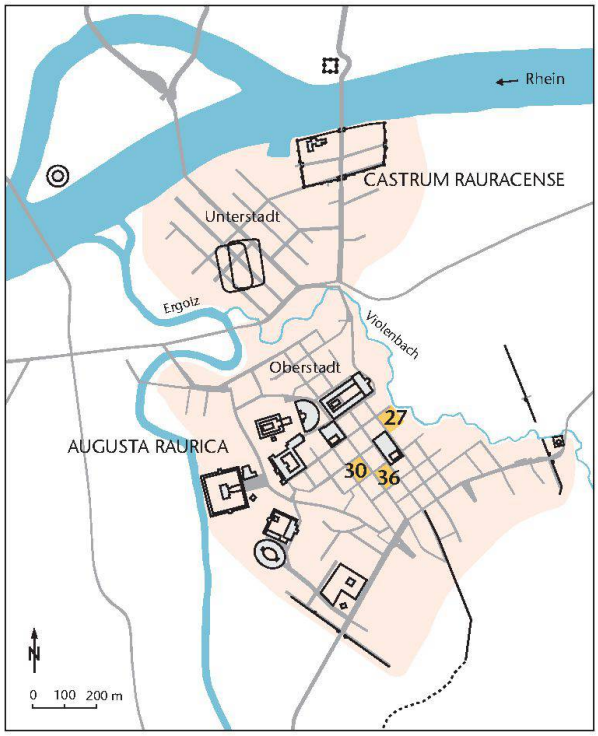


Abb. 3: Übersichtsplan von Augusta Raurica. Herkunft der untersuchten Proben: Insulae 27, 30, 36 und das Theater. M. 1:20000.

port auf dem Wasserweg. Für erste und frühe Bauten wurde Holz verwendet, ab ca. 50–80 n. Chr. baute man vor allem in Stein. Die Blütezeit erlebte die Handels- und Gewerbestadt in den Jahren zwischen ca. 70 n. Chr. und 230 n. Chr.; sie zählte damals rund 15000–20000 Einwohner[3]. Die streng geometrisch angelegte Stadt bestand aus rechteckigen Quartieren, den Insulae, und gliederte sich in eine Ober- und eine Unterstadt (Abb. 3). Die Oberstadt lag auf einer durch quartäre Schotterterrassen gebildeten und durch die Bäche Ergolz und Violenbach begrenzten Hochfläche; die Unterstadt befand sich direkt nördlich auf einer tieferen Terrassenfläche. In der näheren und weiteren Umgebung gab es eine Vielzahl von Gutshöfen, welche für die Versorgung der Stadt von grosser Wichtigkeit waren[4]. Ab etwa 275 n. Chr. wurden Teile der Wohnquartiere verlassen oder schliesslich zerstört. Die Bevölkerungszahl nahm massiv ab und das Siedlungszentrum verlagerte sich in ein um 300 n. Chr. erbautes Kastell *(Castrum Rauracense)* am Rhein (Abb. 3), welches heute noch Zentrum des Dorfes Kaiseraugst ist. Auch der Name der römischen Stadt lebt in den Orten Augst und Kaiseraugst weiter.

Eine Übersicht über die Geologie der Nordwestschweiz und geologisches Kartenmaterial finden sich bei Alfred Isler u. a. und Walter H. Müller u. a.[5] Eine Einführung in die Geologie der Region Basel bieten Peter Bitterli-Brunner und Paul Vosseler[6].

Das ehemalige Stadtgebiet von Augusta Raurica liegt im Tafeljura. Die Bedeckung der Schwarzwald- und Vogesen-Grundgebirgserhebung wird durch zahlreiche, etwa parallel zur Rheintal-Flexur verlaufende Keilgräben segmentiert[7]. Eine Nordnordost–Südsüdwest streichende Abschiebung verläuft durch das antike Stadtgebiet und bildet zusammen mit zwei weiteren Abschiebungen einen komplexen Graben[8]. Der Schichtstapel weist über dem Grundgebirge meistens ein leichtes Südfallen auf, von Süden nach Norden kommen daher stratigrafisch tiefere Sedimente an der Oberfläche zu liegen. Im Stadtgebiet selbst und an den durch die Flüsse Rhein, Ergolz und den Violenbach in nächster Nähe gebildeten natürlichen Aufschlüssen sind Triassedimente des Muschelkalks und Keupers aufgeschlossen[9]. Die umliegenden Anhöhen im Süden von Augusta Raurica werden durch Jurasedimente, vor allem Doggerkalk, gebildet, diejenigen im Norden vorwiegend durch Gesteine des Muschelkalks. Die Landschaft wird stark durch quartäre Sedimente geprägt. So werden in den Ebenen des Rhein- und Ergolztals die Gesteine des Jura und Trias durch weitläufige, abgetreppte Schotterterrassen überdeckt.

Für das ehemalige Stadtgebiet von Augusta Raurica und dessen nähere Umgebung ist eine grosse Menge an geologischen Daten vorhanden, darunter sind seismische und geoelektrische Profile und Resultate vieler Bohrungen[10]. Die Region um Augusta Raurica wurde verschiedentlich geologisch kartiert, unter anderem durch Carl Disler im Massstab 1:50000[11]. Das Gebiet westlich von Augusta Raurica

3 Bossart u. a. 2006.
4 Hecht/Tauber 1998.
5 Isler u. a. 1984; Müller u. a. 1984.
6 Bitterli-Brunner 1987; Vosseler 1947.
7 Gürler u. a. 1987; Merki 1961, 177 ff.; Meyer 2001; Trümpy 1980, 138 ff.
8 Fäh u. a. 2006.
9 Disler 1914.
10 Fäh u. a. 2006.
11 Disler 1931.

wird durch das Blatt Arlesheim, Blatt 1067 des geologischen Atlas der Schweiz 1:25000, abgedeckt[12]. Das Gebiet nördlich des Rheins ist durch die geologischen Karten von Baden-Württemberg flächendeckend im Massstab 1:25000 dokumentiert (Blätter: Weil am Rhein, 8411, Rheinfelden, 8412 und Bad Säckingen, 8413).

«State of the Art» und Problemstellung

Kalkbrennen

Die Entsäuerungsreaktion (1) ist eine Gleichgewichtsreaktion:

(1) $CaCO_3 \dashrightarrow CaO + CO_2$

Entscheidend für die Lage des Gleichgewichts ist der von der Temperatur abhängige Partialdruck des CO_2 in der Brennatmosphäre, welcher bei 898° C Umgebungsdruck (1 atm) erreicht[13]. Ab dieser Temperatur läuft die Zersetzung (Entsäuerung) auch in einer 100%-CO_2-Atmosphäre schnell ab und sie wird daher als Zersetzungstemperatur für $CaCO_3$ angegeben. Beim Kalkbrennen, der Kalzination, haben die Temperatur, die Korngrösse des Rohmaterials, aber auch dessen Mikrostruktur und Mineralogie einen Einfluss auf die Umsatzgeschwindigkeit[14]. Dieselben Parameter und die Brenndauer beeinflussen die mineralogische Zusammensetzung und Morphologie des Produkts[15].

Werden reine, dichte Kalksteine bei Temperaturen unter 1000° C gebrannt, verändern sich diese äusserlich kaum, bis auf ihre Farbe[16]. Wegen der Abgabe von Kohlenstoffdioxid bei Volumenkonstanz resultiert nach vollständigem Umsatz ein Produkt mit einer hohen Porosität von (theoretischen) 55 % und einer Rohdichte von 1,54 gcm^{-3}. Dies wird als «Weichbrand» bezeichnet[17]. Mit steigender Temperatur läuft die Entsäuerungsreaktion schneller ab[18], die Dichte des Branntkalks und die Grösse der einzelnen CaO-Kristalle nehmen zu, die Porosität und die innere Oberfläche werden kleiner[19]. Ab ca. 1200° C, abhängig vom Rohmaterial, beginnt die Oberfläche des Kalkes zu sintern oder es kommt gar zu partieller Aufschmelzung. Die Fragmente schrumpfen dabei deutlich[20], es entsteht «Hartbrand»[21]. Weich und hart gebrannter reiner Kalk sind chemisch identisch, beide bestehen aus Kalziumoxid. Die unterschiedliche Mikrostruktur beeinflussen aber die Geschwindigkeit der Löschreaktion und die Eigenschaften des resultierenden Mörtels. Der Brenngrad von Branntkalk wird daher oft über die Reaktionsgeschwindigkeit beim Löschen definiert, eine klare Abgrenzung zwischen «Hartbrand» und «Weichbrand» gibt es aber nicht. Obwohl der Brennprozess heute gut untersucht ist, fehlt ein umfassendes Modell für die Kalzination, und Prozessparameter werden meist mit praktischen Tests bestimmt[22].

Industrielles und römisches Kalkbrennen: Wichtige Rahmenbedingungen bei der heutigen industriellen Branntkalkproduktion sind Energieeffizienz und hohe Prozessgeschwindigkeit und damit die Rentabilität des Kalkbrennens. Die Optimierung dieser Parameter resultiert in hohen Kalzinationstemperaturen bei kurzer Brenndauer[23]. Die Prozessdauer wird durch vorgängiges starkes Zerkleinern des Rohmaterials weiter minimiert, die kleinen Steine sind schnell bis ins Zentrum erhitzt, und bei der Reaktion freigesetztes CO_2 muss nur über eine kurze Distanz diffundieren. Es besteht bei den hohen Brenntemperaturen aber die Gefahr, dass ein zwar komplett entsäuertes, aber hart gebranntes Produkt resultiert[24].

Handwerkliches Kalkbrennen ist mit einfachsten Mitteln möglich. Ein Brennstoff, also z. B. Holz, Torf oder Kohle, und eine Grube im Boden genügen, um darin ein Feuer zu entfachen und aufgeschichtetes karbonatreiches Material wie Kalkstein, Marmor oder auch «exotische» Materialien, wie z. B. Muschel- oder Schneckenschalen[25], zu entsäuern und Branntkalk zu erzeugen. Einfache Brenngruben sind schon aus dem Neolithikum bekannt[26]. Später wurden in natürliche Hangneigungen eingetiefte Öfen, Feldöfen, Meiler und ummauerte Kalköfen verwendet. Für eine Übersicht über das Kalkbrennen und die gebräuchlichen Ofentypen in römischer Zeit wird auf die Literatur verwiesen (Abb. 4)[27].

In mehreren erhaltenen antiken Texten unterstreichen römische Autoren, so Vitruv im 1. Jahrhundert v. Chr.[28] und Plinius d. Ä. im 1. Jahrhundert n. Chr.[29], dass die Auswahl eines geeigneten Rohmaterials für die Mörtelproduktion wichtig sei, möglichst reiner Kalk soll gebrannt werden. Aber nur Cato beschrieb im 2. Jahrhundert v. Chr. den eigentlichen Brennprozess näher[30]. Der von Cato beschriebene und auch die Mehrheit der durch Befunde belegten römischen Kalköfen (Abb. 4) weisen Gemeinsamkeiten auf: Die Öfen wurden diskontinuierlich betrieben, das heisst, sie kühlten nach abgeschlossener Kalzination auf Umgebungstemperatur ab, bevor sie leergeräumt und neu beschickt werden konnten. Durch Befunde belegte Öfen weisen ver-

12 Bitterli-Brunner u. a. 1984; Bitterli-Brunner/Fischer 1988.
13 Oates 1998, 140.
14 Butenuth u. a. 1993; Frey 1998, 50–53 Anm. 230 f.
15 Frey 1998, 50–53; 230 f.; Moropoulou u. a. 2001.
16 Oates 1998, 147.
17 Frey 1998, 58–62; Wuhrer 1953.
18 Kantiranis u. a. 2005.
19 Butenuth u. a. 1993; Frey 1998, 58–61.
20 Oates 1998, 147–150.
21 Oates 1998, 150.
22 Oates 1998, 139.
23 Oates 1998, 161–180.
24 Oates 1998, 149 f.
25 Uschmann 2006, 12.
26 Rollefson 1990, 51 Abb. 13.
27 Dix 1973; Dix 1979; Dix 1982; Uschmann 1992; Uschmann 2006.
28 Vitruv 2, 5, 1 ff.
29 Plinius nat. 36, 53, 174.
30 Cato agr. 38; Dix 1982, 332; Uschmann 2006, 95.

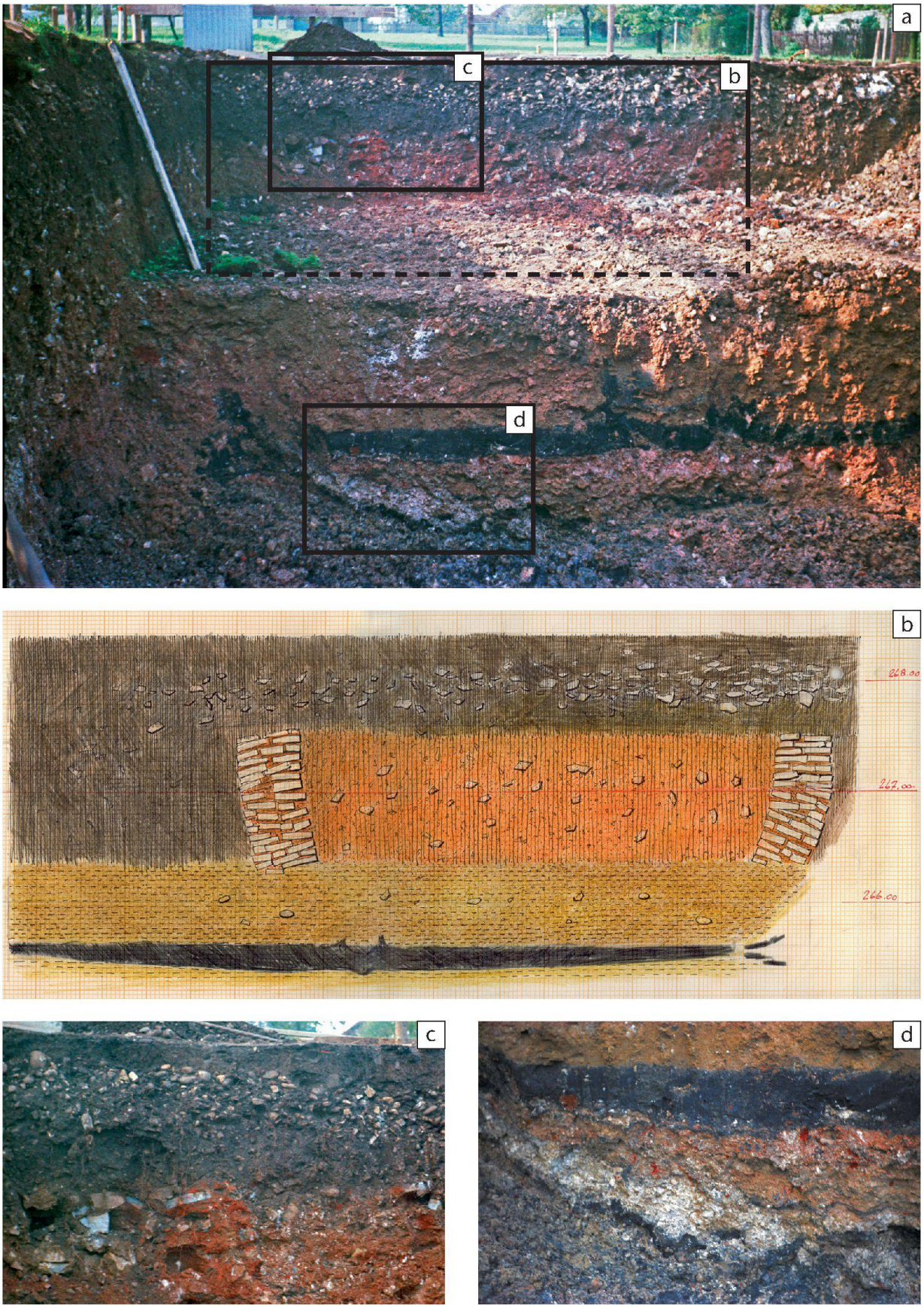


Abb. 4: Kaiseraugst/AG, Neubau Walder (Grabung 1965.005). Römischer Kalkbrennofen (vermutet), aufgedeckt in einer eilends durchgeführten Notgrabung. Die dürftige Grabungsdokumentation lässt leider keine abgesicherte Interpretation zu. ***a:*** *Grabungsübersicht: im Hintergrund das erst in der oberen Hälfte freigelegte Profil* ***b;*** ***b:*** *Profilzeichnung (im Hintergrund von* ***a****), M. 1:50;* ***c:*** *Detail (im Bildhintergrund von* ***a****) der linken Ofenmauer mit starker Brandrötung;* ***d:*** *Detail (im Bildvordergrund von* ***a****) der weiträumig vorhandenen Kohleschicht (oben) mit gebranntem Kalk (unten).*

schiedene Formen auf: Sie haben runde, ovale, birnenförmige und selten rechteckige Querschnitte; die Brennkammern haben oft einen Durchmesser von ca. 3 m und Höhen zwischen 4 und 6 m[31]. Der Brennstoff, wohl praktisch ausschliesslich Holz und nicht Kohle[32], war vom zu brennenden Kalk räumlich getrennt, was die Kontamination des Branntkalks mit Kohle und Asche weitgehend verhinderte[33]. Zudem ergab die Verwendung von Holz als Brennstoff einen Branntkalk mit nur geringer Schwefelbelastung. Das Kalkbrennen war mit einem hohen Brennstoffverbrauch verbunden, da der Ofen für jede Charge neu aufgeheizt werden musste. Der Branntkalk muss bis zur vollständigen Entsäuerung lange auf Temperatur gehalten werden[34]. Die Dauer für eine komplette Kalzination, inklusive Beschicken und Leerräumen solcher Öfen, wird auf ca. 2–3 Wochen geschätzt[35]. Auf die Qualität des Branntkalks wirkte sich dies allerdings günstig aus, da das Risiko, hartgebrannten Kalk zu erzeugen, klein war. Ein optimales Resultat beim handwerklichen Kalkbrennen erforderte einiges an Wissen und Können, sowohl für die Beschickung des Ofens als auch für den eigentlichen Brennvorgang. Da die Temperaturverteilung in einem einseitig beheizten Kalkofen ungleichmässig ist, müssen in kälteren Bereichen des Ofens kleine Gesteinsbrocken positioniert werden, um sie komplett zu entsäuern. Die Gaszirkulation, also die Wegfuhr des beim Brennen frei werdenden Kohlenstoffdioxids, wird bei einer Ofenfüllung mit zu kleinen Steinen behindert. Bei sehr grossen Steinen erfordern das Aufwärmen bis ins Zentrum und die Diffusion des beim Entsäuern freigesetzten CO_2 bis an die Oberfläche viel Zeit, damit wird unnötig Brennstoff verbraucht. Für die Kalkbrenner war das arbeitsintensive Zerkleinern des Kalks auf geeignete Korngrösse daher unumgänglich. Einen grossen Einfluss auf das Resultat hatte die richtige Dauer des Brennvorgangs: Bei zu kurzem Brennen wurden die Kalksteine nur unvollständig in Branntkalk umgesetzt, bei zu langem Brennen wurde unnötig Brennstoff verbraucht. Auch bei sorgfältiger Kalzination blieben aber wohl einzelne, zu grosse oder im Ofen schlecht positionierte Steinbrocken unvollständig gebrannt. Geübte Kalkbrenner konnten wahrscheinlich solche Brocken, sogenannte «Kalkmöpse», nach dem Brand anhand ihres zu hohen Gewichts aussortieren und mit einer späteren Ofenfüllung nochmals brennen.

Brennen von Dolomit: In römischer Zeit wurden auch Dolomite ($CaMg(CO_3)_2$) und magnesiumreiche Kalke gebrannt[36]. Die Zersetzung beginnt bei Temperaturen zwischen ca. 500° C und 750° C, die minimal nötige Temperatur hängt vom Magnesiumgehalt des Gesteins, aber auch von der Kristallinität und Mikrostruktur ab[37].

(2) $CaMg(CO_3)_2 \dashrightarrow CaCO_3 + MgO + CO_2$

Bei Temperaturen bis ca. 800° C findet eine partielle Entsäuerung des Dolomits zu Kalzit und Magnesiumoxid statt (2), es entstehen Teilkalzinate[38]. Erst bei höheren Temperaturen und längerer Brennzeit setzt sich auch der Kalzit komplett zu Kalziumoxid um (1). Je nach Temperatur beginnt das Magnesiumoxid dann aber bereits zu sintern und ein hartgebranntes Produkt resultiert[39].

(3) $CaCO_3 + Mg(OH)_2 + CO_2 \dashrightarrow CaO + Mg(HCO_3)_2$

Eine andere Reaktion läuft beim Brennen von Dolomit in Anwesenheit von Wasser ab. Es entsteht in einer ersten Phase ein Zwischenprodukt in der Form eines harten, bläulich gefärbten Materials, das aus den Mineralien Kalzit und Brucit ($Mg(OH)_2$) besteht[40]. In einer zweiten Phase (3) entsäuert der Kalzit, der Brucit nimmt hingegen CO_2 auf und geht in das wasserlösliche Bikarbonat $Mg(HCO_3)_2$ über. Kalkbrenner im Binntal/VS, Schweiz, erzeugten so aus porösem, wassergesättigtem Dolomit, wahrscheinlich durch Auswaschen des $Mg(HCO_3)_2$, ein gegenüber dem Ausgangsmaterial an Magnesium verarmtes Produkt[41].

Kalkbrennen um Augusta Raurica: Aus archäologischer Sicht interessieren bei der Branntkalkproduktion neben der Art und Herkunft des verarbeiteten Rohmaterials auch Prozessparameter, so die für das Brennen einer Charge benötigte Zeit, die Menge an verbrauchtem Brennstoff und produziertem Branntkalk. Das zur Mörtelproduktion gebrannte Rohmaterial kann allenfalls mit chemischen und mikroskopischen Analysen an Mörteln[42] und durch Befunde in Steinbrüchen eruiert werden. Die für die Kalzination einer Charge benötigte Zeit und der Brennstoffverbrauch sind hingegen nur anhand von archäologischen Befunden an Kalköfen und gezielten Brennexperimenten abzuschätzen[43]. Aus Augusta Raurica fehlen detaillierte Untersuchungen zu römischen Kalköfen und Brennexperimente. Daher wird ein ortsfremdes Beispiel hinzugezogen, die römische Kalkbrennerei von Bad-Münstereifel, Iversheim in Deutschland[44]. Es wurden sechs nebeneinander angeordnete Öfen freigelegt, die zwischen ca. 150 und 300 n. Chr. direkt unterhalb eines Steinbruchs durch Legionäre betrieben worden sind. Man nimmt an, dass in der unmittelbaren Umgebung noch bis ein Dutzend weitere ähnliche Brennereien in Betrieb

31 Dix 1982, 333.
32 Scheidegger 1994, 90.
33 Dix 1982, 333.
34 Oates 1998, 145 f.
35 Baradez 1957, 293 Anm. 12; Dix 1982, 335 f.
36 Wisser/Knöfel 1988, 163.
37 Oates 1998, 141.
38 Kühn 1985, 32.
39 Oates 1998, 141.
40 Graeser 1994, 49.
41 Graeser 1994, 48 f.
42 Ortega u. a. 2008.
43 Althaus 1994, 32.
44 Sölter 1970.

waren und somit eine regelrechte «Kalkindustrie» betrieben wurde[45]. Einer der Öfen von Iversheim war bei der Freilegung noch mit Kalk und Brennstoffresten gefüllt. Die bei der Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse erlaubten den Wiederaufbau eines Ofens und ein anschliessendes Brennexperiment. Die von Walter Sölter rekonstruierte Art und Weise der Beschickung des Ofens wird heute teilweise angezweifelt, so die Hypothese, dass der «Himmel» zeitaufwendig mithilfe eines Lehrgerüsts aufgesetzt und nicht freitragend ausgeführt wurde[46]. Dies ändert aber nichts an der Gültigkeit der gewonnenen Daten. Die experimentelle Kalzination der ca. 25 Tonnen Kalkstein umfassenden Charge dauerte inklusive Abkühlen eine Woche. Für das Brennexperiment wurden 10 Ster Buchenholz bereitgestellt, bis zur vollständigen Entsäuerung der Kalksteine wurde aber eine viel grössere Holzmenge, 60 Ster, verfeuert[47], was ca. 30–40 t Buchenholz entspricht. Eine maximale Temperatur von ca. 1050° C wurde beim Brennvorgang erreicht. Dank dieser Resultate konnte die wahrscheinliche Arbeitsorganisation der römischen Kalkbrenner in Iversheim eruiert werden. Die nebeneinander angeordneten Öfen sind zeitversetzt betrieben worden, damit während der langen Brenn- und Abkühlphase eines Ofens bereits ein anderer mit frischen Kalksteinen beschickt werden konnte. So waren wohl, trotz der diskontinuierlichen Brenntechnik, ständig mehrere Öfen in Betrieb und es konnte kontinuierlich, dank des Wechsels von Ofen zu Ofen, frisch gebrannter Kalk ausgeräumt werden. Dabei wurde eine beachtliche Kapazität von ca. 200 t Branntkalk pro Monat erreicht[48]. Der Iversheimer Branntkalk wurde bis an den Niederrhein transportiert[49]. Man nimmt allerdings an, dass ein solch organisierter Grossbetrieb für die römische Zeit nicht als Normalfall angesehen werden kann[50].

Die Resultate der Ausgrabung von Iversheim, der Rekonstruktion und des Brennexperiments lassen sich nicht direkt auf Augusta Raurica übertragen, denn schliesslich ist nicht bekannt, ob Branntkalk in ähnlich organisierter Weise oder ausschliesslich in verstreuten Einzelöfen produziert wurde. Die bisher wenigen archäologischen Nachweise in Augusta Raurica lassen eher auf kleine Einzelöfen schliessen (Abb. 4). Dennoch kann man davon ausgehen, dass der Gesamt-Brennstoffverbrauch in gleicher Grössenordnung lag. Dieser deckt sich auch gut mit Werten von handwerklichem Kalkbrennen in nachrömischen Öfen mit vergleichbarer Brenntechnik und Grösse der Kalkcharge, so z. B. 80 Ster Holz für 27 t Kalkstein[51] oder 80–85 Ster für 28–30 t Kalkstein[52].

Das Gebiet von Augusta Raurica war bei der Stadtgründung bewaldet. Hinweise darauf liefern an Holzkohle angereicherte Schichten unter den ältesten Kulturhorizonten und Reste einer (*in situ* vorgefundenen) um die Stadtgründungszeit gerodeten Eiche[53]. Man geht davon aus, dass in der Umgebung der Stadt ein Eichen-Buchen-Mischwald mit Tannen stand[54]. Es finden sich aber Hinweise auf eine Übernutzung des näheren Waldes. Dieser war um die Stadt wohl bald nach der Stadtgründung weiträumig abgeholzt. Neben der Branntkalkherstellung wurden grosse Mengen an Holz auch für die Befeuerung von Backöfen sowie von Öfen für die Keramik- und Ziegelherstellung und zur Nutzung als Bau- und Werkholz verbraucht. Holzkohle wurde in den Waldgebieten geköhlert[55] und in der Stadt für Schmiede und Giesser in grosser Menge gebraucht.

Arbeitsorganisation und Transport beim Kalkbrennen: Beim Brennen verlieren Kalksteine ca. 40% ihres Gewichts. Arbeitstechnisch ist daher das Brennen der «schweren» Kalksteine nahe beim Abbauort, einem Steinbruch oder einem Ruinengelände, günstig, um dann erst den gebrannten Kalk über weitere Strecken zu transportieren. Auf der Baustelle nimmt der Branntkalk beim Löschen durch den Einbau von Wasser in die Kristallstruktur einen Teil des Gewichts wieder auf. Die beim handwerklichen Brennen benötigte Menge an Holz ist enorm, daher ist die Nähe des Brennofens zur Brennstoffquelle Wald von grossem Vorteil. Dass diesen Gesichtspunkten in römischer Zeit Beachtung geschenkt wurde, lässt sich u. a. am Beispiel der Iversheimer Kalköfen zeigen. Sie befanden sich direkt unterhalb des Steinbruchs und nahe beim Wald. In der Antike wurde Holz bevorzugt auf dem Wasserweg transportiert[56]. Holz konnte auf dem Rhein und wohl auch auf der Ergolz geflösst werden, was bei Überlegungen hinsichtlich wahrscheinlicher Standorte für Kalkbrennöfen in Augst miteinzubeziehen ist.

Gebrannter Kalk muss beim Transport und vor allem bei längerer Lagerung vor Feuchtigkeit geschützt werden; alleine mit der Luftfeuchtigkeit löscht dieser nach einer gewissen Zeit und wird damit unbrauchbar. In jüngerer Vergangenheit wurde gebrannter Kalk daher oft in Fässern transportiert[57]. Der Kalk nimmt beim Löschen deutlich an Volumen zu. Neben dem Gewicht ist dies ein zweites Argument, den gebrannten und nicht den gelöschten Kalk zu transportieren. Trocken gelöschter Kalk ist zudem enorm «staubig» und damit weniger einfach zu verladen und zu befördern. Das Löschen des Kalkes auf der Baustelle hat einen weiteren Vorteil: Der Mörtel kann nach dem Löschen und Mischen warm verarbeitet werden. Alte Maurer sagen noch heute, dass der beste Kalkmörtel bei warmer Verarbeitung entsteht[58]. Bis in die Neuzeit war es üblich, stückigen

45 Sölter 1970, 16.
46 Sölter 1970, 35 ff.; Scheidegger 1994, 91.
47 Sölter 1970, 38.
48 Sölter 1970, 40.
49 Scheidegger 1994, 91.
50 Scheidegger 1994, 91.
51 Bitterli-Waldvogel 1995, 2.
52 Imesch 1989, 22.
53 Furger 1985, 123 ff.; Furger 1988, 157.
54 Albrecht 1989, 339 f.
55 Bosch/Schmid 1952.
56 Nenninger 2001, 73.
57 Althaus 1994, 32 Anm. 21.
58 Jenny 1995.

Branntkalk erst auf der Baustelle kurz vor der Verwendung zu löschen. Heute verunmöglicht der Wunsch nach einem genormten, homogenen Produkt mit konstanten, vorausschaubaren Eigenschaften das Löschen auf der Baustelle. Der Branntkalk wird industriell gelöscht und gelangt meist als feinkörniges Kalkhydrat auf die Baustelle.

Kalklöschen

Unter dem Löschen von Branntkalk versteht man die stark exotherme Reaktion von Kalziumoxid mit Wasser (4):

(4) $CaO + H_2O \dashrightarrow Ca(OH)_2$

Es werden pro Kilogramm gelöschtem Kalziumoxid 1162 kJ Energie frei und ca. 320 g Wasser chemisch gebunden. Unter deutlicher Volumenzunahme bildet sich Portlandit, gelöschter Kalk ($Ca(OH)_2$). Das Kalklöschen als industrieller Prozess und der Einfluss verschiedenster Prozessparameter sind heute gut untersucht[59].

Vitruv und auch Plinius beschreiben den Vorgang des Kalklöschens relativ detailliert, es sind zudem mehrere Bildquellen des Prozesses in Form römischer Wandmalereien und Mosaiken überliefert[60]. Wie auch beim Kalkbrennen lassen sich aber wichtige Parameter, z. B. die zum Löschen verwendete Wassermenge, kaum aus diesen Quellen ableiten. Zwei Kalklöschtechniken, eine mit Wasserüberschuss und eine mit wenig Wasser, werden im Folgenden separat beschrieben.

Abb. 5: Experimentelle Lösch- und Sumpfanordnung für Kalkmörtel mit Temperaturmesssonden des Autors in Gelterkinden/BL im Jahr 2003.

Kalklöschen mit Wasserüberschuss: Wird gebrannter Stückkalk mit mehr Wasser gelöscht, als sich chemisch bindet und verdampft, z. B. wenn er komplett mit Wasser überdeckt wird, so zerfallen die Fragmente bei der Bildung von feinkörnigem $Ca(OH)_2$ komplett. Dabei werden 100° C nicht überschritten und die Hydratation läuft über die flüssige Phase ab. Je nach verwendeter Wassermenge resultiert Kalkbrei oder Kalkmilch. Nach dem Löschen können unvollständig gebrannte Fragmente («Kalkmöpse») ausgesiebt und allfällige an der Oberfläche schwimmende Brennstoffreste, also Kohlefragmente oder Asche, entfernt werden.

Ein solcher Kalkbrei kann unter Luftabschluss durch ständige Wasserbedeckung lange Zeit *gelagert* werden. Dieser Prozess wird als *Einsumpfen* bezeichnet (vgl. Abb. 5; 6) und als fördernd für die Qualität des Produkts angesehen[61]. Über die für eine gute Kalkqualität nötige Einsumpfdauer finden sich verschiedene Angaben. So empfehlen Andreas Arnold u. a. als allgemeine Regel: «Je länger der Kalk eingesumpft wird, desto besser!»[62]. Diese Autorengruppe empfiehlt für normale Mörtelbereitung und Maurerarbeiten sowie Kalkanstriche eine minimale Einsumpfdauer von einem Jahr, für Flicke in der Nähe von Stuck und Wandmalerei mindestens anderthalb bis zwei Jahren, für anspruchsvollere Arbeiten mindestens zwei bis drei Jahren. Eine minimale Einsumpfdauer von zwei Monaten wird von John Ashurst vorgeschlagen[63]. Gemäss Olga Cazalla u. a. und Kay U. Uschmann soll ein römisches Gesetz verlangt haben, dass Branntkalk vor der Verwendung mindestens drei Jahre eingesumpft werden muss[64]. Kalk soll sogar von einer Generation für die nächste eingesumpft worden sein[65].

Nur wenige Arbeiten untersuchten den Vorgang des Einsumpfens naturwissenschaftlich[66]. O. Cazalla u. a. konnten aufzeigen, dass sich die Grösse der Kalziumhydroxid-Kristalle mit fortschreitender Einsumpfzeit verringert und sich die Morphologie der Portlanditkristalle von länglichen, säuligen Kristallen zu kleineren, hexagonalen Plättchen ändert[67]. Damit steigt auch die spezifische Oberfläche der Partikel, was die veränderten physikalischen Eigenschaften des Produkts erklärt. Für die Herstellung von Sumpfkalk wird die Verwendung von möglichst reinem Kalk, der zudem

59 Frank 1977; Oates 1998, 207–224; Potgieter u. a. 2002; Potgieter u. a. 2003.
60 Vitruv 7, 2, 1 ff.; Plinius nat. 36, 55, 176; Dix 1982, 337 f.; Kraus u. a. 1989, 213.
61 Elert u. a. 2002, 502.
62 Arnold u. a. 1979, 2.
63 Ashurst 1990, 79.
64 Cazalla u. a. 2000, 1070; Uschmann 2006, 124.
65 Cazalla u. a. 2000, 1070.
66 Cazalla u. a. 2000; Elert u. a. 2002.
67 Cazalla u. a. 2000, 1075.

► *Abb. 6: Eher die Ausnahme als die Regel: römische Kalksumpfgrube aus Augst, Insula 28 (Grabung 1964.053). Im Hintergrund ist die Kalkfüllung aufgeschnitten. Der 1,3 × 1,13 m messende Holzboden im Vordergrund war mit zwölf schmalen dachziegelartig aufeinander gelegten Brettern ausgekleidet, die mit zwei Querleisten vernagelt waren. Der Kalk hat bewirkt, dass das Holz sich gut erhalten konnte.*

dolomitfrei ist, empfohlen[68]. Nicht sinnvoll ist das Einsumpfen von Branntkalken mit hydraulischem Anteil.

Kalklöschen mit wenig Wasser (Trockenlöschen): Wenn dem gebrannten Kalk nur so viel Wasser zugegeben wird, dass ein trockenes Produkt entsteht, spricht man von Trockenlöschen. Für eine komplette Hydratation des Branntkalks muss mehr als die stöchiometrisch benötigte Wassermenge zugegeben werden, da während der stark exothermen Reaktion ein Teil des Löschwassers verdampft.

Eine unbekannte Autorengruppe mutmasste schon im Jahre 1854, dass in römischer Zeit vor allem für Mauermörtel nicht eingesumpfter Kalk, sondern trocken gelöschter Stückkalk verwendet wurde[69]. Es werden im Text zwei Verfahren beschrieben, das Besprengen von geschichtetem Stückkalk mit Wasser und das Tauchen von in Körbe gefülltem Branntkalk unter Wasser. Dieser Text und auch die römischen Quellen wurden durch Karin Kraus u. a. kritisch aufgearbeitet[70]. In der seltenen, vor der Mitte des 18. Jahrhunderts erschienenen Literatur über die Geschichte der Architektur und Bautechnik finden sich auffällig wenig Hinweise über das Löschen von Branntkalk. Die Autoren, z. B. Plinius und später Alberti und Palladio, beziehen sich zudem alle mehr oder weniger auf Vitruv und konzentrieren sich auf die Technik des Einsumpfens[71]. Dies wird von K. Kraus u. a. als Grund angesehen, dass bis vor einigen Jahren angenommen wurde, dass Mauer-, Fugen- und Putzmörtel in römischer Zeit allgemein aus eingesumpftem Kalk hergestellt worden ist[72]. In der Arbeit von K. Kraus u. a. wird hingegen die These vertreten, dass für Mauermörtel kein Sumpfkalk, sondern trocken gelöschter Kalk verwendet wurde[73]. Für diese Tatsache sprechen auch praktische Überlegungen: Es ist kaum vorstellbar, dass schon Jahre vor grossen Bauprojekten mit dem Einsumpfen von Hunderten von Tonnen Kalk begonnen wurde. So hat z. B. alleine die Auskleidung der grossen Wasserleitung von Augusta Raurica mit Ziegelschrotmörtel über 1 200 m³ Branntkalk verschlungen[74]. Für die verbreitete Anwendung von trockengelöschtem Kalk spricht auch, dass die Zahl der ausgegrabenen römischen Sumpfgruben (Abb. 6)[75] im Vergleich zu den riesigen Mengen an Kalk, die verbaut worden sind, allgemein eher klein ist[76]. Man kann also davon ausgehen, dass abhängig von der Qualität des verwendeten Ausgangsmaterials und vom Verwendungszweck des gelöschten Kalks unterschiedliche Löschtechniken angewendet wurden.

Wird wenig Löschwasser gebraucht, entsteht wegen der grossen Reaktionsenergie Wasserdampf und damit kann es zum Teil zu einem eigentlichen «Dampflöschen» kommen. Die Hydratation läuft dann hauptsächlich als topochemischer Prozess bei hoher Temperatur ab und es kann zum «Vergriessen» des gelöschten Kalks kommen[77]. Teilweise wird solch vergriesstes Material mit schlechter Qualität gleichgesetzt und daraus gefolgert, dass zu hohe Temperaturen schädlich für den Kalk sind[78]. Zudem kann beim Löschen mit wenig Wasser der Löschprozess unvollständig ablaufen und noch ungelöschter Branntkalk übrig bleiben. Solch ungelöschte Fragmente löschen dann erst im Mörtel unter Volumenzunahme vollständig, was vor allem in Putzmörteln zu Schäden führen kann.

68 Arnold u. a. 1979, 2.
69 Bauzeitung 1854.
70 Kraus u. a. 1989.
71 Plinius nat. 36, 55, 176; Vitruv 7, 2, 2; Kraus u. a. 1989, 206.
72 Kraus u. a. 1989, 213.
73 Kraus u. a. 1989, 206.
74 Ewald u. a. 1997, 43.
75 Laur-Belart 1965, 26 Abb. 9.
76 Althaus 1994, 31.
77 Berner in Vorb. A.
78 Frank 1977, 35.

Kalkspatzen: In historischen Putz- und Mauermörteln treten oft weisse, kreidige, bis ca. Zentimeter grosse «Knollen» auf[79]. Auch in römischen Mörteln sind diese als Kalkspatzen bezeichneten Kalkkonkretionen verbreitet, sie wurden ebenfalls in Mörteln von Augusta Raurica nachgewiesen[80]. Es handelt sich bei den Kalkspatzen um zuschlagfreie Zonen im Bindemittel (Abb. 7). Um deren Entstehung und Beschaffenheit abzuklären, haben mehrere Autoren diese gezielt analysiert und mit dem restlichen Bindemittel von Mörtelproben verglichen[81]. Es zeigte sich, dass sie die gleiche chemische Zusammensetzung wie das restliche Bindemittel der Mörtelproben aufweisen[82]. Daraus kann geschlossen werden, dass die Kalkspatzen aus dem gleichen gebrannten Kalk wie das restliche Bindemittel hervorgegangen sind und es sich kaum um künstlich zugegebene Kalkfragmente handelt[83]. Franz Drexler deutete solche Knollen in Mörteln eines Römerkastells in Altrip als dem Mörtel kurz vor der Verarbeitung absichtlich zugegebene, ungelöschte Branntkalkknollen; dies, um den Mörtel aufzuwärmen und somit auch bei Kälte mauern zu können[84]. Heute geht man aber davon aus, dass die Entstehung dieser Knollen mit dem für die Mörtelherstellung verwendeten Brenn- und vor allem Löschprozess in Zusammenhang steht und dass es sich nicht um absichtlich zugegebene Knollen handelt[85]. Silvia Bruni u. a. mutmassen, dass die Knollen Reste der bei der Lagerung des Kalkes in der Sumpfgrube an den Rändern und an der Oberfläche entstandenen Karbonatkruste sind und bei der Mörtelherstellung nicht sorgfältig ausgesiebt wurden[86]. Die Mehrheit der Autoren/-innen geht aber davon aus, dass die Kalkspatzen ein Hinweis für die Anwendung von Trockenlöschverfahren sind[87], sie gelangen wohl hauptsächlich in der Form von $Ca(OH)_2$, also als gelöschter Kalk und nicht als komplett ungelöschter Branntkalk, in die Mörtelmischung[88]. Durch eine grosse Zahl an Analysen von Bindemittelknollen in historischen Mörteln verschiedener Kulturen kommt Jan Elsen zum Schluss, dass neben den eigentlichen wohl auf Trockenlöschen zurückzuführenden Kalkspatzen auch überbrannte oder unvollständig gebrannte Fragmente als Knollen im Bindemittel vorliegen[89].

Es wurde aufgezeigt, dass sich die Kalkspatzen positiv auf die Mörtelqualität, vor allem auf die Dauerhaftigkeit, auswirken können[90]. Kalkspatzen karbonatisieren langsam, es kann daher lange $Ca(OH)_2$ gelöst werden, das für Umkristallisationen zur Verfügung steht[91]. Es wurde in Kalkspatzenmörteln eine Selbstheileigenschaft nachgewiesen, so wurden Risse durch aus Kalkspatzen gelöstem Kalzit gefüllt[92].

Kalkspatzenmörtel sind oft reicher an Bindemittel als Kalkmörtel ohne Spatzen. Beim Versuch, solch bindemittelreichen Mörtel mit eingesumpftem Kalk herzustellen, resultiert ein unbrauchbarer, mit Schwundrissen durchsetzter Mörtel. Es ist notwendig, vor allem für Restaurierungsarbeiten, Mörtel zu verwenden, der kompatible physikalische Eigenschaften mit dem ursprünglichen Mörtel aufweist. Es besteht aber durchaus auch aus anderen Gründen ein

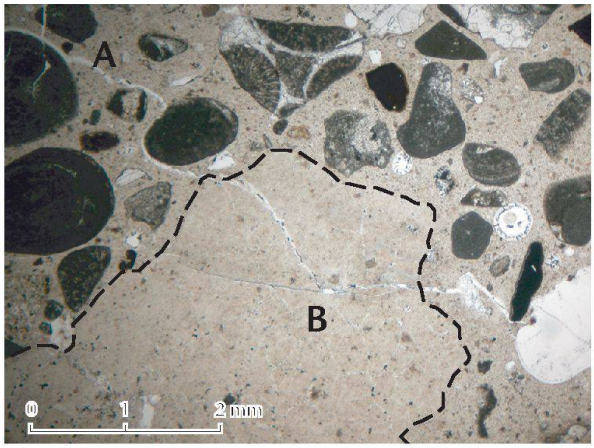


Abb. 7: Kalkspatz in einem Mörtel aus Augusta Raurica im Dünnschliff. ***A:*** *Bindemittel mit Zuschlag, v. a. oolithischem Doggerkalk vermengt. –* ***B:*** *«Kalkspatz», zuschlagsfreie Zone.*

Interesse an «Kalkspatzenmörtel». Dieser ist mit weissen Knollen durchsetzt und hat ein sehr charakteristisches Erscheinungsbild. Ein optisch vergleichbares Resultat lässt sich nur mit einem modernen «Kalkspatzenmörtel» erreichen.

Löschen von gebranntem Dolomit oder gebranntem magnesiumhaltigem Karbonat: Die Hydratation von Periklas, MgO, läuft langsamer ab als die von CaO[93]. Bei kurzer Löschdauer eines gebrannten Kalks, der MgO und CaO enthält, kann daher ein partiell gelöschtes Produkt resultieren, das zwar Kalzium als Hydroxid, aber Magnesium teilweise noch in Form des Oxids enthält. Wird ein aus Dolomit gebrannter Kalk nass gelöscht und lange eingesumpft, kann sich das Produkt nach kompletter Hydratation ins spezifisch schwerere $Mg(OH)_2$ und leichtere $Ca(OH)_2$ auftrennen, das $Mg(OH)_2$ sinkt ab und es resultiert eine Schichtung in der Grube[94]. Somit ist der gelöschte Kalk, je nach verwendetem Bereich

79 Kraus u. a. 1989, 206.
80 Ewald u. a. 1997, 47.
81 Bakolas u. a. 1995; Bruni u. a. 1997.
82 Bruni u. a. 1997, 6.
83 Bruni u. a. 1997, 6.
84 Drexler 1928.
85 Berner in Vorb. B; Kraus u. a. 1989, 206.
86 Bruni u. a. 1997, 6.
87 Kraus u. a. 1989, 206.
88 Bakolas u. a. 1995, 814 f.
89 Elsen 2004.
90 Böttger 1997, 138; Ewald u. a. 1997, 51; Winnefeld u. a. 2001, 40 f.
91 Böttger 1997, 163.
92 Ewald u. a. 1997, 42–47; 49 Abb. 49a.b.
93 Oates 1998, 222.
94 Bläuer Böhm/Jägers 1997.

der Sumpfgrube, gegenüber dem Ausgangsmaterial an Magnesium angereichert oder verarmt. Wenn im gebrannten Material Magnesium in Form von Bikarbonat vorliegt, kann dieses beim (Trocken-)Löschen weiter ausgewaschen und damit ein gegenüber dem Ausgangsgestein an Magnesium verarmter Mörtel produziert werden[95].

Abbinden des Kalkes, Karbonatisierung

Der mit Wasser und Zuschlag vermischte gelöschte Kalk erhärtet in einer ersten Phase durch Austrocknen. In einer zweiten Phase wird Portlandit mittels Kohlenstoffdioxid aus der Luft in Kalziumkarbonat überführt. Diesen Prozess nennt man Karbonatisierung (5):

(5) $Ca(OH)_2 + CO_2 \dashrightarrow CaCO_3 + H_2O$

Die Karbonatisierung von Kalkmörteln ist ein langwieriger und komplexer Prozess, der bis mehrere Jahrhunderte dauern kann[96]. Es laufen mehrere Teilreaktionen ab, u. a. bildet Kohlenstoffdioxid aus der Umgebungsluft mit Wasser Kohlensäure, das Kalziumhydroxid reagiert unter Anwesenheit von Wasser zu Kalziumkarbonat (6, 7):

(6) $CO_2 + 3H_2O \dashrightarrow CO_3^{2-} + 2H_3O^+$
(7) $Ca(OH)_2 + CO_3^{2-} + H_2O \dashrightarrow CaCO_3 + H_2O + 2OH^-$

Bei Putzmörteln hat die Behandlung nach dem Auftragen einen grossen Einfluss auf den Verlauf der Reaktion. Entscheidend sind u. a. der Feuchtegehalt und die Permeabilität des Mörtels, die relative Luftfeuchtigkeit und der Kohlenstoffdioxidgehalt der Luft[97]. Für den Verlauf der Rekarbonatisierung an Mörteln, für die eingesumpfter Kalk als Bindemittel verwendet wurde, wird auf die Literatur verwiesen[98].

Puzzolane und hydraulische Mörtel: Durch die Beimischung von Stoffen wie Vulkanasche, Trass oder fein zerstossener Schamotte zu gelöschtem Kalk kann die Festigkeit der resultierenden Kalkmörtel und auch deren Beständigkeit gegen Süss- und Salzwasser verstärkt werden[99]. Eine erste schriftliche Bestätigung dieser Praktik und die Beschreibung verwendeter Materialien, aber auch Überlegungen zur Wirkungsweise der Stoffe finden sich bei Vitruv[100]. Er beschreibt unter anderem die Zugabe von «Erde von Puteoli», einer vulkanischen Asche. Die Stadt Pozzuoli ist heute namengebend für solche Stoffe, sie werden Puzzolane genannt. Erste Kalkmörtel mit beigemengter Vulkanasche wurden schon früh verwendet, so z. B. in der antiken Stadt Akrotiri auf Santorini, ca. 1625 v. Chr.[101] Die Griechen bevorzugten den vulkanischen Tuff der Insel Santorini, welcher auch heute im Mittelmeerraum noch eingesetzt wird[102]. In römischer Zeit wurde auch gezielt fein zerstossene Schamotte beigemischt, dies vor allem, wenn lokal kein geeignetes vulkanisches Material vorlag[103]. Ein Beispiel einer solchen gezielten Anwendung ist der innere Putz der römischen Wasserleitung von Augusta Raurica: Der Mörtel wurde durch Zugabe von Schamotte (Ziegelschrot) wasserdicht und resistent gemacht[104].

Puzzolanische Stoffe enthalten reaktionsfähige Kieselsäure und Aluminiumoxid. Für die Bildung von Kalzium-Silikat-Hydratphasen, C-S-H, und Kalzium-Aluminat-Hydratphasen, C-A-H, benötigen sie Wasser und CaO-$Ca(OH)_2$ als Reaktionspartner. Da $Ca(OH)_2$ in wässriger Lösung stark basisch ist, können sich die OH^--Ionen an die SiO_2- und Al_2O_3-Moleküle der Glasphase der Puzzolane anlagern und Si- und Al-Atome abtrennen[105]. Diese reagieren mit gelöstem $Ca(OH)_2$ und Wasser und es bilden sich so C-S-H- und C-A-H-Phasen aus. Moderne hydraulische Stoffe (z. B. Portlandzement) benötigen für die Bildung der C-S-H- und C-A-H-Phasen nur Wasser. Wegen des geringen Eigenanteils an CaO reagieren die Puzzolane langsamer als Portlandzementklinker und brauchen länger zum Erhärten[106].

Künstliche puzzolanische Materialien können u. a. durch Brennen von tonhaltigem Material erzeugt werden. Dabei wird Wasser eliminiert und es resultiert ein teilweise amorphes Gemisch aus Silizium und Aluminium[107]. Bei hohem Gehalt an Ton im Kalk können bei geeigneten Brennbedingungen, d. h. bei hohen, meist nur in modernen Brennöfen zu erreichenden Brenntemperaturen, natürliche hydraulische Kalkmörtel erzeugt werden.

Heutige Klassierung von Baukalken: Heute werden Baukalke in Weisskalk (Kurzzeichen CL), Dolomitkalk (Kurzzeichen DL) und hydraulischen Kalk (Kurzzeichen HL) eingeteilt[108]. Weisskalk und Dolomitkalk werden u. a. anhand ihres Gehalts an Kalziumoxid und Magnesiumoxid eingeteilt (Tabelle 1).

Hydraulische Kalke können einerseits durch Brennen von tonhaltigem Kalkstein oder durch Mischen von geeigneten Stoffen wie Puzzolan, Zement oder Trass mit Weisskalk hergestellt werden. Ausschliesslich durch Brennen von tonhaltigem Kalkstein unterhalb 1250° C und anschliessendem Löschen hergestellte Kalke werden «Natürliche Hydraulische Kalke» (Kurzzeichen NHL) genannt. Die hydraulischen Mörtel werden nach ihrem Gehalt an SO_3, freiem Kalk (= nicht an Hydraulefaktoren gebundenem Kalk) und ihrer Druckfestigkeit nach sieben Tagen, $ß_D$ (7d), und 28 Tagen, $ß_D$ (28d), eingeteilt (Tabelle 2).

95 Graeser 1994, 46–49.
96 Elert u. a. 2002, 503.
97 Elert u. a. 2002, 503–506; Moorehead 1986, 701–703.
98 Elert u. a. 2002; Rodriguez-Navarro u. a. 2002.
99 Furlan/Houst 1980, 29.
100 Vitruv 2, 4, 1 ff.
101 Furlan/Bissegger 1975, 3.
102 Furlan/Houst 1980, 29.
103 Furlan/Houst 1980, 30.
104 Ewald u. a. 1997, 46 f.
105 Mett 2004, 2.
106 Mett 2004, 2 f.
107 Furlan/Houst 1980, 30.
108 DIN EN 459-1, 5 f.

Zielsetzung der Arbeit

Mittels naturwissenschaftlicher Analyse von Putz- und Mauermörteln soll das Wissen über die in Augusta Raurica in römischer Zeit verwendete Kalkmörteltechnologie erweitert werden. Eine der Charakteristiken vieler historischer Mörtel ist das Auftreten von weissen Kalkknollen, sogenannten «Kalkspatzen», im Bindemittel. Diese wurden auch in Augster Mörteln schon nachgewiesen[109]. Deren Entstehung wird nachgegangen und entsprechende Kalklöschtechniken werden experimentell nachgestellt. Der Abgleich der Resultate der Mörtelanalysen mit der Lokalgeologie soll Hinweise auf die zur Bindemittelproduktion ausgebeuteten Rohstoffquellen und auf die Herkunft des Zuschlags bringen. Als Untersuchungsmaterial dient bei den Putzmörteln eine Sammlung von Fragmenten aus der Insula 36 der Grabung 1984.051 (Abb. 3)[110]. Sie wird durch zwei Putzfragmente aus der Insula 30 ergänzt. Es soll abgeklärt werden, ob sich die nach optischen Kriterien an Bruchstücken definierten und durch Referenzstücke belegten Mörteltypen auch nach naturwissenschaftlichen Kriterien unterscheiden und ob sie sich zur Klassierung von andernorts im Stadtgebiet gefundenen Putzen heranziehen lassen. Mauermörtel wird vom szenischen Theater und einer Peristylvilla der Insula 27 untersucht (Abb. 3)[111]. Die Mörtel des ebenfalls untersuchten öffentlichen Baus, des Theaters von Augusta Raurica, können so mit denen dieses privaten Bauwerks verglichen werden. Das Theater wird ausgewählt, da es ein gut untersuchter und dokumentierter Bau ist, der Mörtel mehrerer Bauphasen enthält, die einen grossen Zeitraum abdecken[112]. Es ist damit ein ideales Objekt, um etwaige Änderungen in der Mörteltechnologie oder den für die Mörtelproduktion ausgebeuteten Rohstoffquellen über mehrere Jahrhunderte studieren zu können. Es soll abgeklärt werden, ob und wie sich die Mörtel aus diesen verschiedenen Bauphasen unterscheiden, und versucht werden, durch chemische Analysen Hinweise auf die verwendeten Rohmaterialien zu gewinnen. Das Theater wurde in römischer Zeit verschiedentlich aus- und komplett umgebaut. Es sind drei grosse Bauperioden bekannt[113]. Um 70/80 n. Chr. entstand ein erstes szenisches Theater (Bauperiode I, älteres szenisches Theater) im Zentrum von Augusta Raurica. Dieses wurde abgebrochen und durch ein Amphitheater ersetzt (Bauperiode II, älteres Amphitheater, 110–140 n. Chr.). An die Stelle des Amphitheaters wurde 180/190 n. Chr. (Bauperiode III) ein ca. 10 000 Leute fassendes neues szenisches Theater gesetzt, welches gegen 270 n. Chr. teilweise zerstört wurde. Das Theater wurde zwar noch beschränkt weiter begangen (und verwendet?), Anfang des 4. Jahrhunderts jedoch endgültig zerstört. Heute können weitere Bau- und Nutzungsphasen ausgeschieden werden[114]. Das Theater diente danach verschiedentlich als «Steinbruch», sowohl in römischer Zeit zum Bau des Kastells beim Rhein als auch im Mittelalter und in der frühen Neuzeit. Für eine Übersicht über die Geschichte des Theaters, dessen Freilegung und Sanierung wird auf Thomas Hufschmid und Ines Horisberger-Matter verwiesen[115].

Methoden

Polarisationsmikroskopie

Qualitative Mörtelanalyse: Die Polarisationsmikroskopie an Dünnschliffen ist ein oft verwendetes Verfahren zur Charakterisierung von historischen Putzen und Mörteln. Eine Einführung in die Methodik und Probenpräparation findet sich bei Frank Schlütter u. a., eine allgemeine Übersicht über den Einsatz der Polarisationsmikroskopie in der Archäometrie bei Chandra L. Reedy[116]. Die Methode eignet sich zur Analyse des Gefügeaufbaus von Mörteln und Putzen, zur Beschreibung des Mörtelzuschlags und eingeschränkt auch des Bindemittels[117].

Der Mörtelzuschlag kann mit erprobten Verfahren aus der Sedimentpetrografie und Mineralogie analysiert werden, da Kalkmörtel sowohl in ihrer Zusammensetzung als auch in ihrer Struktur natürlichen klastischen Karbonatsedimenten gleichen[118]. Die Petrografie des Zuschlags wird mit den klassischen Methoden der Dünnschliffmikroskopie ermittelt. Die Analyse des feinkörnigen Bindemittels von Kalkmörteln ist mit Polarisationsmikroskopie nur beschränkt möglich, wegen der Präparatdicke von ca. 20–30 µm werden die Bindemittelkristalle meist in Überlagerungen betrachtet. Das erschwert oder verunmöglicht die Bestimmung der petrografischen Zusammensetzung wie auch diejenige von morphologischen Details. Zur sicheren Feststellung von Dolomit können Schliffe gefärbt werden[119], es wird zur Analyse von Dolomitmörteln auch auf Christine Bläuer Böhm und Elisabeth Jägers verwiesen[120].

Quantitative Mörtelanalyse: Vergleichsbilder erlauben die Quantifizierung von Kornform, Kornrundung, Korngrössenverteilung und Korneinregelung einzelner Zuschlagsklassen oder des Zuschlags insgesamt[121]. Mit der gleichen Technik lässt sich auch der Modalanteil verschiedener Komponenten und damit das Verhältnis Bindemittel zu Zuschlag abschätzen, eine genauere Quantifizierung kann mit Pointcounting für Modalanteile[122], aber auch Korngrössenverteilung[123] erreicht werden. Oft werden die klassischen Ver-

109 Ewald u. a. 1997, 47.
110 Asal 2007.
111 Rychener u. a. 2006, 118 ff.
112 Hufschmid/Horisberger-Matter 2008, 167–169 Abb. 9; S. 195 f.
113 Hufschmid/Horisberger-Matter 2008, 167.
114 Hufschmid/Horisberger-Matter 2008, 167–169.
115 Hufschmid/Horisberger-Matter 2008.
116 Schlütter u. a. 2001; Reedy 1994.
117 Schlütter u. a. 2001, 6.
118 Tucker 1985, 6–9.
119 Ney 1986, 11–16.
120 Bläuer Böhm/Jägers 1997.
121 Folk 1968, Abb. 1; Abb. S. 9; Tucker 1985, 15–19.
122 Flügel 2004, 247–255 Abb. 40a–i.
123 Friedman 1958.

fahren heute durch computergestützte Bildanalyseverfahren ergänzt oder ersetzt[124].

Der Anteil an Bindemittel, Zuschlag und mikroskopisch erfassbaren Poren an den Putz- und Mauermörteln wurde mittels Pointcounting (> 500 Punkte) am Dünnschliff bestimmt.

Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Für eine Einführung in die Technik und Probenpräparation in Bezug auf historische Putze und Mörtel wird auf Frank Schlütter u. a. verwiesen[125]. Die Oberfläche der zu untersuchenden Materialprobe wird im REM mit einem fein gebündelten Elektronenstrahl abgetastet. Der Strahl tritt mit der Probe in Wechselwirkung, von der Probenoberfläche emittierte Elektronen oder Röntgenstrahlung können erfasst und daraus kann nach elektronischer Verarbeitung ein Bild errechnet werden. Durch Sekundärelektronenbilder, REM-SE, wird vor allem die Topografie einer Probe, durch Rückstreuelektronenbilder, REM-BS, wird die Phasenverteilung in mehrphasigen Materialien abgebildet[126]. Das Rasterelektronenmikroskop bietet eine wesentlich höhere Auflösung (wenige nm) als das Lichtmikroskop, daher ist auch die Analyse feinster Details des Bindemittels möglich. REM-Bilder wurden schon verschiedentlich in Kombination mit computergestützter Bildanalyse zur Charakterisierung von Mörteln genutzt[127]. In Verbindung mit energiedispersiver Röntgen-Mikroanalytik, REM-EDS, kann zudem punktgenau die chemische Zusammensetzung der polierten Materialprobe qualitativ bis semiquantitativ ermittelt werden. Die Methode eignet sich daher zur Bestimmung des Bindemittelchemismus[128]. Durch das Abrastern von polierten Proben mit dem Elektronenstrahl und Aufzeichnen des EDS-Detektor-Signals entsteht ein Elementverteilungsbild. Diese Technik wird «Element Mapping» genannt und eignet sich zum Erfassen der räumlichen Verteilung von chemischen Elementen in inhomogenen, mehrphasigen Materialien.

Mörtel enthält einerseits mm- bis cm-grosse Aggregate, das Bindemittel setzt sich andererseits aus teils nur mikrometergrossen Mineralen zusammen. Um mehrere mm^2 bis cm^2 grosse Flächen mit genügender Auflösung zu erfassen und auch noch Details des Bindemittels aufzulösen, wurden von ausgewählten Proben bis 100 in einem x-y-Raster angeordnete, leicht überlappende Element-Maps aufgenommen und anschliessend zu einem Ganzen zusammengefügt[129]. Es wurde dazu der «merging algorithm» der Software «Analysis» verwendet. Die Aufnahme der grossflächigen Element-Maps ist zeitintensiv und dauerte bis zu zehn Stunden pro Probe. Es wurden so neun Putzmörtelproben und sechs Mauermörtelproben charakterisiert, um die Verteilung von Magnesium, Kalzium, Silizium, Aluminium und Eisen auf Bindemittel und Zuschlag zu studieren.

Von allen Putzmörtelproben wurden mit dem REM je zehn hochauflösende Rückstreuelektronenbilder zur Charakterisierung der Bindemittelmorphologie und des Porenraums aufgenommen, immer mit gleicher Auflösung von 0,064 µm pro Pixel, zur Auswertung mit computergestützter Bildanalyse[130]. Mit je mindestens zehn REM-EDS-Punktmessungen (total > 300 Messungen) im feinkörnigen Bindemittel wurde dessen chemische Zusammensetzung bestimmt. Es sollte so das allfällige Auftreten von dolomitischen Kalken (Mg) und hydraulischem Bindemittel detektiert werden. Die EDS-Messungen wurden ohne Verwendung von Standards durchgeführt und haben daher qualitativen bis semiquantitativen Charakter.

Unsere Analysen wurden an einem Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop (FEI XL 30, Sirion FEG, Departement für Geowissenschaften der Universität Freiburg, Schweiz) durchgeführt. Eingesetzt worden sind neben dem Sekundärelektronendetektor der Rückstreuelektronendetektor (Centaurus) und das EDS-System.

Quecksilber-Druckporosimetrie (MIP)

Das von Howard Ritter und Leonard Drake entwickelte Verfahren wird heute standardmässig zur Untersuchung des Porenraums von makro- bis mesoporösen Materialien genutzt[131], so auch für Baumaterialien[132]. Es können damit offene Poren im Bereich von ca. 0,003 µm bis 360 µm gemessen werden[133]. Bei zementhaltigen Materialien kann das Verfahren teilweise zu grossen Fehlern führen, dies u. a. wegen «Flaschenhalsporen»[134].

Im verwendeten Gerät wird ca. 1,5 g der zu analysierenden Probe in einer Glaszelle nach Evakuation mit Quecksilber umgeben (Autopore 9220, Micromeritics, Departement für Geowissenschaften der Universität Freiburg, Schweiz). Die Maschine erhöht danach schrittweise nach einer vom Benutzer vorgegebenen Tabelle den Druck auf das Quecksilber, wobei immer kleinere offene Poren mit Quecksilber gefüllt werden. Die Abhängigkeit zwischen Druck und Porenradius der gefüllten Poren wird durch die Washburn Formel beschrieben[135].

Wegen der beschränkten Menge an Material, das von Putzproben zur Verfügung stand, konnten nur von sechs ausgewählten Proben je drei Porosimetrie-Messungen durchgeführt werden, dabei wurden aber die verschiedenen Putzmörteltypen abgedeckt[136].

124 Carò/Di Giulio 2004; Carò u. a. 2006.
125 Schlütter u. a. 2001, 125.
126 Berner in Vorb. C.
127 Abell u. a. 1999; Lange u. a. 1994; Leeman 1995; Wang 1995; Werner/Lange 1999; Yang/Buenfeld 2001.
128 Adriano u. a. 2008.
129 Berner in Vorb. D.
130 Berner in Vorb. C; Berner in Vorb. D.
131 Ritter/Drake 1945.
132 Rübner u. a. 2001; Rübner/Hoffmann 2006.
133 Webb 2001, 16.
134 Diamond 1998; Diamond 2000.
135 Washburn 1921.
136 Berner in Vorb. D; siehe auch unten S. 238 f.

Infrarotspektroskopie

Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie, FTIR, wurde von verschiedenen Autoren zur Charakterisierung des Bindemittels historischer Kalkmörtel verwendet[137]. Die Bestimmungen sind meist qualitativ oder semiquantitativ, quantitative Analysen anorganischer Bestandteile mittels FTIR sind aber möglich, z. B. des Anteils an Karbonat in Zement[138]. Für die Aufnahme von Infrarotspektren mit FTIR an Kaliumbromid-Presslingen wird wenig Probenmaterial (ca. 0,5–1 mg) benötigt. Das ermöglicht Analysen an Objekten mit geringem zerstörendem Eingriff, aber auch gezielte Analysen an kleinen Strukturen im Mörtel, z. B. an Kalkspatzen. Es lassen sich mit Infrarotspektroskopie auch schlecht kristallisierte oder amorphe Phasen und organische Bestandteile nachweisen[139].

Für eine Einführung in die Infrarotspektroskopie anorganischer Substanzen wird auf John Gadsden verwiesen[140]; bei diesem Autor finden sich zudem Infrarotspektren von über 600 Mineralen und 100 weiteren anorganischen Substanzen. Die Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie (FTIR) nutzt die Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung im Bereich von ca. 400–4000 cm^{-1} mit fester, flüssiger oder gasförmiger Materie. Bei der Absorptionsmessung wird durch die zu analysierende Substanz dem eingestrahlten Kontinuum Energie für die Anregung von Schwingungen und Rotationen der Moleküle entnommen. Dies führt zu Funktionsgruppen-charakteristischen Absorptionsbanden im Spektrum. Die Bereiche der Absorptionsbanden überschneiden sich teilweise, was eine eindeutige Identifikation oft schwierig macht[141]. FTIR eignet sich zur Unterscheidung verschiedener Karbonate. Sie zeigen eine starke Absorption im Bereich von 1530–1320 cm^{-1} (v3), mittelstarke Absorption zwischen 890–800 cm^{-1} (v2) und 760–670 cm^{-1} (v4)[142]. Die Absorptionsbande der v4-Deformationsschwingung liegt bei Kalzit bei ca. 713–710 cm^{-1}, bei Dolomit hingegen bei 729–727 cm^{-1} [143]. Die IR-Spektren wurden an 13-mm-KBr-Presslingen von 450 cm^{-1} bis 4400 cm^{-1} mit einer Auflösung von 2 cm^{-1} oder 4 cm^{-1} aufgenommen mit einem Perkin-Elmer 1760X, mit Mikrofokussier-Einrichtung oder einem Perkin-Elmer 1600. Zur Verringerung des Untergrundrauschens wurden fünf Spektren eingezogen und gemittelt, zudem wurde vor jeder Probenmessung der Untergrund am leeren Probenhalter gemessen.

Zur Auswertung der Messungen diente eine eigene Sammlung an Spektren von für Kalkmörtel relevanten Phasen und die Software «Spectrum for Windows» von Perkin-Elmer. Folgende Substanzen wurden rein und in Gemischen gemessen: Kalziumkarbonat, Kalziumoxid, Kalziumhydroxid, Gips, Anhydrit, Magnesiumkarbonat, Magnesiumoxid, Magnesiumhydroxid und Quarz. Es wurden käufliche Chemikalien mit einer Reinheit von p. a. verwendet (Carl Roth). Zudem wurde eine publizierte, auf Pigmente ausgerichtete Datenbank mit ca. 300 Spektren hinzugezogen[144].

FTIR wurde neben Analysen am Mörtelbindemittel auch zur Bestimmung des Phasengehalts der Gesteinsproben eingesetzt, vor allem zum sicheren Erkennen von dolomitischen Gesteinen. Es wurden von allen Gesteinsproben Infrarotspektren an KBr-Presslingen aufgenommen.

Röntgendiffraktion (XRD)

Röntgendiffraktion (XRD) wird standardmässig zur Phasenbestimmung von Kalkmörteln verwendet. Analysen wurden an Pulverpresslingen mit einem Röntgendiffraktometer, PW 1800, Philips, Cu-Kα-Strahlung, Departement für Geowissenschaften der Universität Freiburg, Schweiz, durchgeführt und mit der Software X-Pert, Philips, ausgewertet.

XRD wurde zur Charakterisierung der Gesteinsproben, der Lockersedimente und des Bindemittels der Mauermörtel verwendet.

Atomabsorptionsspektrometrie (AAS)

Die Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) erlaubt die quantitative Bestimmung von chemischen Elementen in Flüssigkeiten. Bei der Flammen-AAS (FAAS) liegt die Nachweisgrenze für die meisten Elemente in der Grössenordnung von einigen µg/l, also im ppm-Bereich, bei der Graphitrohr-AAS (GFAAS) ca. um den Faktor 1000 niedriger. Da mit der AAS Feststoffe nicht direkt gemessen werden können, müssen Feststoffproben aufgeschlossen werden. Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Verfahren sind an entsprechender Stelle vermerkt. Die Elemente Ca, Mg, Si, Al, Fe, Mn und Sr wurden in Lösungen mit einem AAnalyst 700 (Perkin-Elmer) im Flammen-Modus bestimmt. Um im linearen Konzentrationsbereich messen zu können, wurden die Probenlösungen entsprechend verdünnt und für Ca und Mg wurde zudem zur Verhinderung von Störungen Lanthan im Überschuss sowohl den Standardlösungen als auch den Probenverdünnungen zugegeben. Sr wurde mit der Lachgas-Acetylen-Flamme gemessen, die anderen Elemente konnten mit der Luft-Acetylen-Flamme bestimmt werden. Es kam zudem die Zeeman-Graphitrohr-AAS (Perkin-Elmer, 4100ZL) zum Einsatz. Für die Kalibration wurden Verdünnungsreihen mit käuflichen Einzelelementstandards (Bernd Kraft GmbH) gemessen.

Siebanalysen

Die Korngrössenverteilung ist eine grundlegende Eigenschaft von Lockersedimenten. Aus der Korngrössenverteilung können Sedimente verschiedener Bildungsbereiche voneinander unterschieden und Rückschlüsse auf das Transportmedium und die Art und Weise der Ablagerung gezogen

137 Anastasiou u. a. 2006; Paama u. a. 1998; Silva u. a. 2005.
138 Legodi u. a. 2001.
139 Silva u. a. 2005, 40.
140 Gadsden 1975.
141 Gadsden 1975, 36 Abb. 6.
142 Gadsden 1975, 62–76.
143 Gadsden 1975, 62–67.
144 Hochleitner 2002, 115–122.

werden[145]. So lässt sich zum Beispiel ein Zusammenhang zwischen Fliessgeschwindigkeit in einem Gewässer und abgelagerter Korngrösse herstellen[146].

Von den als Lockersedimenten vorliegenden Quartärproben wurden je ca. 500 g auf einer Rüttelmaschine (Fritsch Analysette) nass gesiebt (Siebe: 32; 45; 63; 90; 125; 250; 400; 500; 800; 1000; 2000; 4000 Mikrometer). Die einzelnen Fraktionen wurden bei 105° C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, gewogen und die Sieblinien ermittelt und grafisch dargestellt.

Probenvorbereitung und Analyse mit AAS

Bindemittel

Wenn die chemische Analyse an Mörteln ausschliesslich auf das Bindemittel abzielt, dann scheiden Bulkverfahren wie z. B. Röntgenfluoreszenz am zermahlenen Mörtel, d. h. einem Gemisch aus Bindemittel und Zuschlag, aus. Es bieten sich entweder hoch ortsauflösende Verfahren wie die Elektronenstrahl-Mikrosonde an, oder es muss vor der Bulkanalyse eine physikalische und/oder chemische *Separierung des Zuschlags vom Kalkbindemittel* vorgenommen werden.

Eine verbreitete Methode ist das Lösen des karbonatischen Bindemittels mit verdünnter (Salz-)Säure[147]. Bei Verwendung dieser Methode geht man davon aus, dass es sich beim säureunlöslichen Anteil um den Mörtelzuschlag handelt. Somit kann der prozentuale Anteil an Zuschlag und Bindemittel gravimetrisch bestimmt und durch Analyse der Lösung die chemische Zusammensetzung des Bindemittels ermittelt werden. Der Kalkanteil im Bindemittel lässt sich zudem volumetrisch über das freigesetzte Kohlenstoffdioxid ermitteln. Das von Hanna Jedrzejewska eingeführte Verfahren wird heute in einer Vielzahl von Abwandlungen verwendet, mit variierenden Parametern für Säurekonzentration, Reaktionszeit, -temperatur und Probenmenge[148]. Ein erkanntes Problem dieser Methode ist, dass karbonatische Aggregate im Kalkmörtel angelöst oder gar gänzlich aufgelöst werden. Vorbehaltlos lässt sich das Verfahren also nur für Kalkmörtel mit ausschliesslich säureunlöslichem Zuschlag und komplett löslichem Bindemittel anwenden. Durch Reduktion der Reaktionszeit, der Säurestärke und der Temperatur kann die Lösung des karbonatischen Zuschlags eingeschränkt werden. Die im Vergleich zum Zuschlag kleinen Kristalle des Bindemittels mit ihrer hohen spezifischen Oberfläche lösen sich in der Säure schneller auf als die um ein Vielfaches grösseren Zuschlagskörner.

In der vorliegenden Arbeit wurden ausschliesslich Kalkmörtel mit einem hohen Anteil an Kalkzuschlag untersucht. Um die Säuremethode für die chemische Analyse des Bindemittels dennoch anwenden zu können, wurde vorgängig eine mechanische Aufkonzentrierung des Bindemittels vorgenommen und zudem eine stark verdünnte Säure zum Lösen der Probe bei Zimmertemperatur verwendet. Die zwei zur Trennung benutzten Siebgrössen (siehe unten) sind nach vorgängigen Versuchen ausgewählt worden, um eine möglichst starke Anreicherung des Bindemittels zu erzielen. Die Aufteilung des Bindemittels in zwei Korngrössenfraktionen soll Rückschlüsse auf die Grössenverteilung einzelner Bestandteile des Bindemittels ermöglichen.

Oberflächliche Verschmutzungen der Mörtelproben wurden mit einem Skalpell entfernt und das gesäuberte Material (> 10 g) wurde anschliessend im Achatmörser zerstossen. Der Kraftaufwand auf den Stössel blieb dabei so gering, dass der Mörtel in kleine Bruchstücke zerfiel, die Zuschlagskörner aber nicht zersprangen. Die Körner rollten dank deren guter Rundung im Mörser und trennten sich dabei vom Bindemittel. Ca. ⅓ der so zerkleinerten Probe wurde in ein 0,5-mm-Sieb (Ø 10 cm, DIN 4188) überführt, der restliche Teil in ein Sieb mit einer Maschenweite von 0,05 mm. Mit Latexhandschuhen wurde die Probe über die Sieboberfläche verteilt und das Siebgut gesammelt, bis mindestens 1 g an Probe gewonnen war. Im Sieb blieb ein an Zuschlag angereicherter, aber nicht komplett bindemittelfreier Rückstand zurück. Der Siebrückstand wurde verworfen. 500 mg der feinkörnigen Probe (± 1 mg) wurde in einem Teflonbecher mit 30 ml verdünnter Salzsäure (1:5) versetzt und anschliessend bei Zimmertemperatur auf einem Schüttler, IKA MTS 4, mit 500 U/min 5 Minuten geschüttelt. Für die anschliessende Filtration kamen Filter aus 100% Zellulose mit einem Rückhaltebereich von 8 µm zum Einsatz (Carl Roth). Nach Reinigung des Filters mit zwei Mal 10 ml Säure wurde die Probe mit einem Vakuumfiltrationsgerät in einen Teflonbecher filtriert und, um lösliche Reste vom Filter zu entfernen, mit ca. 50 ml Wasser nachgespült. Das Filtrat wurde in einem Masskolben auf 100 ml ergänzt und umgehend in Polypropylenbehälter überführt.

Der mittlere Gehalt von 74 chemischen Elementen und deren Verteilungskoeffizient auf die Karbonat- oder detritische Fraktion in Karbonatsedimenten wurde von Karl Hans Wedepohl berechnet[149], dies unter der Annahme eines mittleren detritischen Anteils von 13%. Mit Ausnahme weniger Elemente sind sie bevorzugt an die detritische, silikatisch-oxidische Fraktion gebunden[150]. Deutlich im Karbonatanteil angereichert sind: Ca (150 ×), Mg (13 ×), Sr (11,5 ×), Mn (6,3 ×), Pb (3,3 ×), Fe (2,3 ×) und Ba (1,6 ×). Strontium ist ein wichtiges Spurenelement in Kalksteinen und Dolomiten, es wird im Kristallgitter der Karbonatminerale eingebaut[151]. Dabei wird die Aragonitstruktur gegenüber Kalzit und Magnesiokalzit bevorzugt[152]. Der mittlere Gehalt von rezenten Sedimenten liegt mit wenigen Ausnahmen zwischen 10000 und 1000 ppm, in Kalksteinen zwischen 1000 und 100 ppm

145 Tucker 1985, 10.
146 Hjulström 1935, 297 f. Abb. 17; 18.
147 Jedrzejewska 1960.
148 Jedrzejewska 1960.
149 Wedepohl 1970.
150 Wedepohl 1970, 692.
151 Wedepohl 1970, 699–701.
152 Wedepohl 1970, 699.

und in Dolomiten zwischen 200 und 60 ppm[153]. Aus obiger Liste wurden die in Karbonaten angereicherten Elemente Ca, Mg, Sr, Mn, Fe zur Analyse ausgewählt, auf die Messung von Pb und Ba wurde wegen deren geringer Konzentration in Karbonaten verzichtet.

Karbonatgesteine
Um das Kontaminationsrisiko durch oberflächliche Verschmutzung zu minimieren, wurde aus den Gesteinsproben mit einer Diamantsäge Material aus dem Inneren freigelegt. Ca. 1 kg der gesäuberten Proben wurde danach gewaschen, auf Feinkiesgrösse zerkleinert, homogenisiert und eine Teilprobe im Achatmörser fein zerstossen und bis zur Gewichtskonstanz bei 40° C getrocknet. Anschliessend kam das gleiche Säure-Lösungs- und Analyseverfahren wie für die Mörtel-Bindemittelanalysen zur Anwendung, um direkt vergleichbare Resultate zu erhalten (siehe oben). Die Elemente Ca, Mg, Si, Al, Fe, Mn und Sr wurden mit FAAS gemessen.

Quartärproben
Von neun Quartärproben wurden chemische Analysen an Säureaufschlüssen je dreier Siebfraktionen durchgeführt. Zum trockenen Aufsieben der Proben diente eine Rüttelmaschine (Fritsch Analysette, Siebe: 0,063 mm; 0,63 mm; 6,3 mm). Die zwei groben Fraktionen wurden anschliessend im Sieb so lange gewaschen, bis das Wasser klar durchströmte und dann bei 105° C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Ca. 10 g der zwei groben Fraktionen wurden im Achatmörser pulverisiert und danach nochmals getrocknet, bei der Fraktion < 63 µm wurde auf die Zerkleinerung verzichtet. Anschliessend kam das gleiche Säure-Lösungs- und Analyseverfahren wie für die Mörtel-Bindemittelanalysen zur Anwendung (siehe oben). Die Filter wurden bei 105° C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, die Rückstände gravimetrisch ermittelt und von der Fraktion < 63 µm zudem Pulverpräparate in Kanadabalsam hergestellt. Die Elemente Ca, Mg, Mn, Sr wurden in den Filtraten mit FAAS, Al und Si mit GFAAS gemessen.

Potenzielle Rohstoffe um Augusta Raurica

Einleitung

Für die Herstellung von Branntkalk wird ein karbonatreiches Gestein benötigt und bei der Mörtelzubereitung ein als Zuschlag geeignetes Material («Sand»). Die in der römischen Stadt Augusta Raurica verarbeiteten Mengen an Kalkmörtel waren sehr gross[154]. Man kann daher davon ausgehen, dass – wenn immer möglich – lokale Rohstoffe verarbeitet wurden. So konnten unnötige Materialtransporte vermieden werden. Die Verfügbarkeit und potenzielle Verwendung von lokalen Karbonaten für die Branntkalkherstellung und die von klastischen Lockersedimenten als Mörtelzuschlag werden im Folgenden getrennt behandelt.

Rohstoffe für Branntkalk

Einleitung
Die während des Jura und der Trias abgelagerte Sedimentsäule ist in der Region Basel mehr als einen Kilometer mächtig[155] und umfasst Kalke, Dolomite, Mergel, Tone und auch Sandsteine (Abb. 8). Um das Feld möglicher Rohstoffe einzuengen, galt es abzuklären, welche Gesteine sich zur Branntkalkherstellung überhaupt eignen, welche an der Erdoberfläche aufgeschlossen sind und für welche eine Verwendung in römischer Zeit wahrscheinlich ist.

Sowohl aus Kalkstein als auch aus Dolomit, der aus Kalzium- und Magnesiumkarbonat besteht, lässt sich Branntkalk herstellen. Ungeeignet sind an Karbonat arme Gesteine, unter anderem also Tonsteine, stark tonhaltige Mergel, Gips, Anhydrit, (Quarz-)Sandsteine und kieselige Konglomerate. Diese Gesteinstypen machen zusammen ca. die Hälfte der Sedimentsäule im Raum Basel aus (Abb. 8). Werden die ungeeigneten Gesteine aus dem Profil eliminiert, bleiben drei mächtige zusammenhängende Abschnitte übrig: der *obere Muschelkalk, Doggerkalke und Malmkalke*.

Im Umkreis von 10 km um das ehemalige Stadtgebiet von Augusta Raurica finden sich alle drei potenziellen Rohstoffe (Abb. 9). Am Talboden des Ergolz- und Rheintals sind die Trias- und Juragesteine aber praktisch durchgehend durch quartäre Sedimente überdeckt. Die stratigrafisch am höchsten gelegenen Sedimente des Malm liegen auch topografisch hoch, an den Talflanken sind vor allem Sedimente des Muschelkalks und des Dogger aufgeschlossen, an den Flanken des Ergolztals u. a. der mächtige Hauptrogenstein. Direkt in Augusta Raurica steht der obere Muschelkalk an[156].

Potenzielle Rohstoffe für Branntkalk um Augusta Raurica
Oberer Muschelkalk: Der obere Muschelkalk im östlichen Jura wurde durch Paul Jakob Merki untersucht[157]. Er beschreibt aus der näheren Umgebung von Augusta Raurica mehrere Detailprofile. Teilweise wurden die Aufschlüsse schon von Carl Disler aufgenommen; er bearbeitete die Geologie beiderseits des Rheins zwischen Rheinfelden und Augst[158]. Einige lokale Profile sind bei Karl Strübin zu finden[159]. Die Feldarbeit der älteren Autoren wurde vor der Aufstauung

153 Wedepohl 1970, 699 f.
154 Beispiel Wasserleitung: Ewald u. a. 1997, 43–46.
155 Bitterli-Brunner 1987, 23; Müller u. a. 1984, 55–112; Trümpy 1980, 13–17.
156 Merki 1961, 177–181.
157 Merki 1961.
158 Disler 1914; Disler 1931.
159 Strübin 1901.

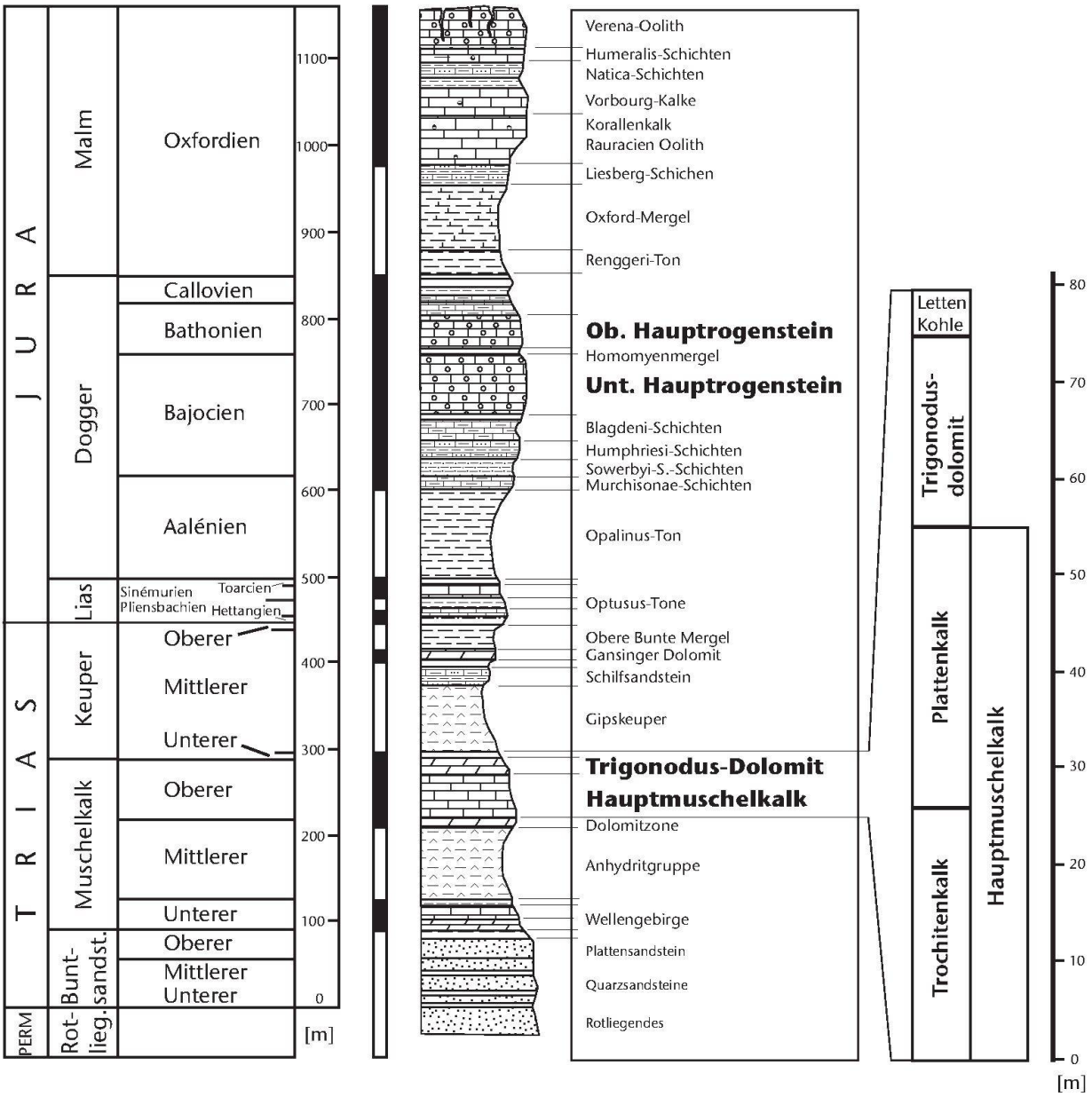


Abb. 8: Jura- und Trias-Stratigrafie um Basel (nach Bitterli-Brunner 1987, Abb. 5; 14). In der mittleren Säule sind die kalkreichen, potenziell zur Bindemittelproduktion nutzbaren Schichten schwarz eingezeichnet.

des Rheins im Jahre 1912 durchgeführt. Mehrere Aufschlüsse beim Rhein oder bei der Ergolz sind heute teilweise überflutet oder durch junge, nach der Aufstauung abgelagerte Sedimente eingedeckt. Die Stratigrafie weicht bei den verschiedenen Autoren teilweise leicht ab, so wird z. B. die Grenze zwischen Keuper und Muschelkalk unterschiedlich gelegt. Eine vergleichende Tabelle findet sich bei P. J. Merki[160].

Im Stadtgebiet von Augusta Raurica wird der Muschelkalk im Allgemeinen durch Sande und Schotter überlagert, im Gebiet der Unterstadt ist diese Bedeckung allerdings geringmächtig (max. 10 m)[161] und das anstehende Gestein war an einigen Stellen leicht zugänglich. Freigelegt wurden die Karbonate unter anderem durch die fluviatile Erosion der Ergolz und des Rheins. So fanden sich rheinauf- und rheinabwärts am Flussufer und im Gebiet des Ergolzunterlaufs mehrere natürlich gebildete Aufschlüsse[162]. Umfangreiche Muschelkalkvorkommen liegen nördlich von Augusta Raurica auf heute deutschem Gebiet, aufgeschlossen an der südlichen Talflanke des Dinkelbergs.

160 Merki 1961, 145 Tabelle 1.
161 Fäh u. a. 2006, 3; Rentzel 1998, 188.
162 Disler 1914, 31–74; Disler 1931, 18–30.

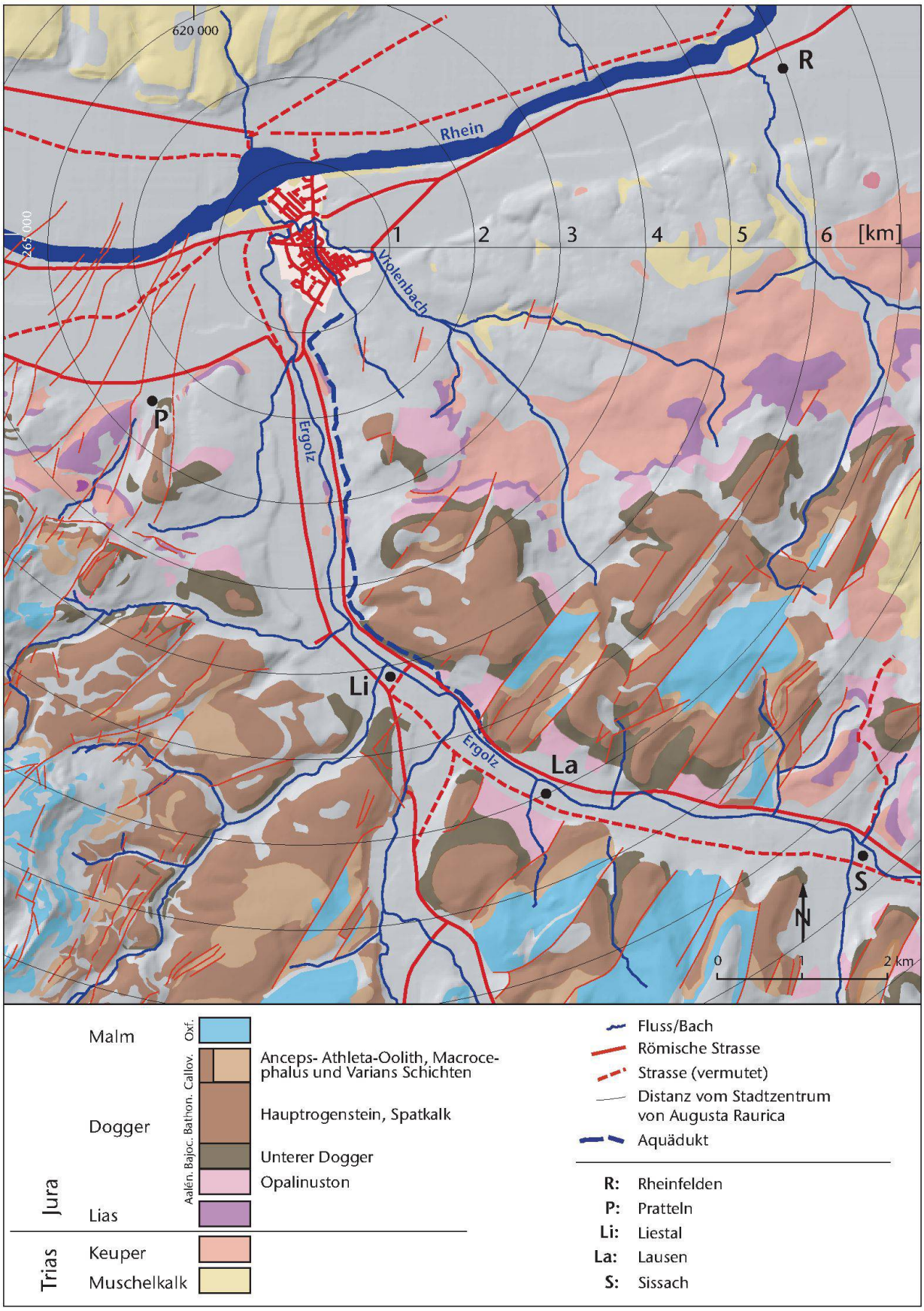


Abb. 9: Geologische Karte der Region um Augusta Raurica, zusammengestellt nach: Isler u. a. 1984; Bitterli-Brunner u. a. 1984. M. 1:65 000.

Der *Hauptmuschelkalk* besteht aus dem Trochitenkalk und dem Plattenkalk. Der um Augusta Raurica ca. 24–26 m mächtige *Trochitenkalk* (unterer Hauptmuschelkalk) lässt sich in zwei Abschnitte gliedern, in den Unteren und den Oberen Trochitenkalk. Der Untere Trochitenkalk beginnt mit einer Serie aus gut gebankten, teilweise leicht dolomitischen Kalken, praktisch frei von Schill und Encrinitenresten. Lokal ist eine ca. 0,5–1,8 m mächtige feinoolithische Schill und Trochiten führende Lage zwischengeschaltet (Basaloolith)[163]. Im Oberen Trochitenkalk (ca. 20 m) findet sich eine Wechsellagerung von graubraunen, mehr oder weniger Trochiten führenden Bruchschillkalken und fein- bis grobkörnigen, teilweise lagig und schlierig dolomitisierten Kalken und Einschaltungen von beigen, kalkigen Dolomiten. Die Schichtfolge ist fein gebankt (5–30 cm), es finden sich oft dünne Mergellagen.

Der *Plattenkalk* (oberer Hauptmuschelkalk) wird in einen Unteren und Oberen Plattenkalk unterteilt. Der Untere Plattenkalk unterscheidet sich lithologisch kaum vom liegenden Trochitenkalk, es finden sich allerdings Mergelzwischenlagen. Es treten Schillkalke auf, die vor allem im unteren Bereich auch Encrinitenresten enthalten. Der obere Teil des 28–30 m mächtigen Plattenkalks besteht aus plattigen, gebankten Kalken und dolomitischen Kalken. Es finden sich mehrere Komplexe von 5–15 cm dick gebankten, grauen, feinkörnigen Kalken mit regelmässigen, hellbeigen, dolomitischen, teilweise tonigen 3–5 cm starken Zwischenlagen[164]. Gegen oben wird der Plattenkalk durch einen oolithischen, teilweise dolomitisierten Komplex (Giebenacher Oolith) abgeschlossen.

Der *Trigonodusdolomit* weist in der Gegend von Augst eine Mächtigkeit von ca. 20 m auf[165]. Die unteren 15 m bestehen aus hellbeigen, porösen, undeutlich gebankten Dolomiten. Es finden sich bis faustgrosse Kalzitdrusen und rundlich-knollige Kalzit-Silex-Konkretionen[166]. Darüber folgt ein Komplex aus gut gebankten, grobkörnigen, beigen Dolomiten. Darin finden sich schwarze und weisse bis 20 cm dicke Silexlagen. Die Grenze zum Estherienschiefer bildet ein Hardground mit Bonebed[167].

Die *Lettenkohle* hat in der Region Augst eine Mächtigkeit von ca. 4–5 m. Über dem Grenzbonebed folgen die ca. 1,5–2 m mächtigen Estherienschiefer, schwarz-bläuliche bis braune, blättrige bis schieferige Tone. Darüber folgt der 3–4 m mächtige Grenzdolomit mit mehr oder weniger gut gebankten Dolomiten.

Doggerkalke: Hauptrogenstein: Der Hauptrogenstein in der Umgebung von Basel wurde unter anderem durch Hansjörg Schmassmann im Rahmen einer Dissertation untersucht, er nahm auch lokale Detailprofile im Ergolztal auf[168]. Eine neuere Bearbeitung fand der Hauptrogenstein in der Nordwestschweiz durch Ramon Gonzalez[169].

Die Sedimente des Hauptrogenstein wurden in der Nordwestschweiz in der Form von drei «shallowing up»-Folgen abgelagert und je durch einen Hartgrund abgeschlossen[170]. Jede der drei Folgen beginnt mit Mergeln und Mergel/Kalk-Wechsellagerungen. Diese werden von schräggeschichteten, oolithischen Kalken überlagert. Die untere Hauptrogenstein-Formation beginnt oberhalb der Blagdeni-Schichten (Rothenfluh-Schichten), die obere Hauptrogenstein-Formation mit den Homomyen-Mergeln. Für die detaillierte Stratigrafie des Hauptrogenstein wird auf die Literatur verwiesen[171], ebenso für die tiefer liegenden Doggersedimente, vom unteren Aalénien bis zum unteren Bajocien[172].

Malm: Sedimente des Malm stehen in Augusta Raurica nicht direkt an. Für die Stratigrafie wird auf Robin Allenbach und Markus Jank u. a. verwiesen[173].

Archäologische Hinweise und Überlegungen: Eine Übersicht über die antike Steingewinnung im Hochrheintal zwischen Basel und Rheinfelden findet sich bei Philippe Rentzel, es wird auch auf Otto Wittmann und Francis de Quervain verwiesen[174]. Die vermuteten und belegten römischen Abbaustellen liegen gehäuft entlang des Rheins, was die Wichtigkeit des Flusses und der Wasserwege im Allgemeinen zum Materialtransport unterstreicht[175]. Gesteine aus dem oberen Muschelkalk wurden in römischer Zeit nachweislich direkt bei der Stadt abgebaut. Zwei Steinbrüche sind belegt, südlich und östlich des spätantiken *Castrum* (Abb. 10)[176]. Weitere Abbaustellen am Unterlauf der Ergolz werden vermutet[177]. Nahe bei einem der gesicherten Steinbrüche ist ein Kalkbrennofen belegt, aber leider schlecht dokumentiert[178]. Von der Lage her kann aber davon ausgegangen werden, dass der Ofen zum Brennen von lokal abgebautem Muschelkalk diente. Weitere Abbaustellen für Muschelkalk werden rheinaufwärts bei Rheinfelden und möglicherweise rheinabwärts bei Schweizerhalle vermutet[179].

Historische Bau- und Werksteine lassen sich einfacher einzelnen lithostratigrafischen Einheiten zuordnen als bei der Bindemittelproduktion durch das Brennen stark veränderte Gesteine. Die durch geoarchäologische Untersuchung solcher Steine gewonnenen Hinweise können als Grundlage für die Herkunftssuche der zur Kalkmörtelproduktion verwendeten Rohstoffe dienen, ist doch eine Ausbeutung der gleichen Steinbrüche zur Produktion von Bau- oder Werkstein *und* für Branntkalk unter bestimmten Voraussetzungen wahrscheinlich. Eine umfassende geoarchäologische Untersuchung zu den in Augusta Raurica verwendeten Bausteinen fehlt, dennoch lassen sich anhand von Einzelbeobachtungen klare Tendenzen für den Gebrauch verschiedener Gesteine ausmachen[180]. Der dichte, feinkristalline und damit verwitterungsresistente Muschelkalk (Plattenkalk und Trochitenkalk) ist der in Augusta Raurica am häufigsten

163 Merki 1961, 179.
164 Merki 1961, 179.
165 Merki 1961, 180.
166 Merki 1961, 181.
167 Merki 1961, 181.
168 Schmassmann 1945, 93–109 Tabelle 1; 2.
169 Gonzalez 1993.
170 Gonzalez 1993, 2.
171 Gonzalez 1993, 1–5; 151–159; Gonzalez 1994, 112 f.; Gonzalez/Wetzel 1996.
172 Burkhalter 1996.
173 Allenbach 2001, 265–286; Jank u. a. 2006.
174 Rentzel 1998; Wittmann 1973, 60–65; de Quervain 1969, 22 ff.
175 Rentzel 1998, 185 f. Abb. 1.
176 Grezet u. a. 2010, Abb. 9; Müller 1983; Müller/Rentzel 1994; Rentzel 1994.
177 Rentzel 1998, 189; Wittmann 1973, 61.
178 Rentzel 1998, 188.
179 Rentzel 1998, 188–190.
180 Rentzel 1994, 39; Wittmann 1973, 60 f.

◄ *Abb. 10: Einer der archäologisch dokumentierten römischen Kalksteinbrüche in Kaiseraugst (Grabung Mühlegasse 2008.003). Die verschiedenen durchschnittlich ca. 10 cm dicken Lagen des dünnbankigen Muschelkalks lassen sich – z. B. mit einem horizontal geführten Pickel – leicht vom Untergrund abheben und ergeben mit wenig zurichtenden Hammerschlägen Handquader zur Mauerherstellung. Dabei entsteht viel Splitt und Schutt, der zu Mörtel gebrannt werden kann.*

verarbeitete Baustein[181]. Der stratigrafisch höchste, dolomitische Bereich des oberen Muschelkalk, der Trigonodusdolomit, wurde hingegen durch die römischen Baumeister vorwiegend gemieden[182]; so findet er sich beim Steinbruch südlich des *Castrum* im Abraum. Verbaut wurden auch Sandsteine des oberen Buntsandstein, der Plattensandstein und selten auch der grobkörnige untere und mittlere Buntsandstein. Römische Abbaugebiete für den Buntsandstein werden am Rhein u. a. bei Warmbach/D und bei Degerfelden/D vermutet[183]. Der Buntsandstein zeichnet sich durch seine Härte und Verwitterungsresistenz aus, kommt aber wegen der siliziklastischen Natur als Rohmaterial für Branntkalkproduktion nicht infrage. Es findet in Augusta Raurica auch Kalktuff Verwendung, so für Einwölbungen[184]. Als wahrscheinliches Abbaugebiet wird u. a. das Rheinufer bei Rheinfelden angesehen[185]. Wohl nur vereinzelt fanden hingegen Doggerkalke, so der Hauptrogenstein, als Baustein Verwendung[186].

Für Skulpturen wurden in Augst mehrheitlich Malmkalke der südlichsten Ketten des Solothurner und Berner Juras verwendet[187]. Ein römischer Steinbruch im «Rauracien» ist in Dittingen/BL nachgewiesen[188], für dekorative Elemente wurde auch ein oft als «Solothurner Marmor» bezeichneter Kalkstein aus dem Kimmeridge verwendet. Die optisch ansprechenden Dittinger Kalke und der «Solothurner Marmor» mussten im Vergleich zu den lokal anstehenden Gesteinen über grössere Distanz nach Augst gebracht werden; sie wurden von den römischen Baumeistern daher gezielt eingesetzt. Eine primäre, grossmassstäbliche Ausbeutung für die Augster Branntkalkproduktion ist wegen des langen Transportweges auszuschliessen, da für das Kalkbrennen geeignete Gesteine direkt bei der Stadt anstehen. Eine sekundäre Verwendung, also das Brennen von ursprünglich als Bau- oder Werkstein verwendetem Material, ist hingegen möglich.

Dass Hauptrogenstein als Baustein in Augusta Raurica kaum Verwendung fand, ist einerseits mit der gegenüber dem Hauptmuschelkalk schlechteren Verwitterungsresistenz zu erklären, aber auch mit der etwas grösseren Entfernung der Vorkommen zur Stadt. Dennoch liegt auch der Hauptrogenstein transporttechnisch gesehen günstig an den Talflanken des Ergolztals. Zudem eignet sich das Gestein dank des hohen Karbonatgehalts vorzüglich zur Branntkalkherstellung. Ein Transport ist über das gut ausgebaute Wegnetz, allenfalls auch durch Flössen auf der Ergolz denkbar.

Sowohl der Hauptrogenstein als auch die Karbonate des oberen Muschelkalk, vor allem der Plattenkalk und Trochitenkalk, weisen für eine Nutzung zur Branntkalkherstellung einige weitere Vorteile auf. Beide treten über mehrere 10 m vertikal und über mehrere Kilometer horizontal in gleicher Ausbildung auf[189]. Dies erleichtert den Abbau grosser Gesteinsmengen mit konstanter chemischer und morphologischer Zusammensetzung und ermöglicht somit reproduzierbare und damit vorhersehbare Resultate bei der Branntkalkherstellung und der Mörtelbereitung. Hauptro-

181 Rentzel 1994, 39; Wittmann 1973, 60.
182 Müller 1983, 182.
183 Disler 1914, 14–31; Rentzel 1998, 189 f.; Wittmann 1973, 61 f.
184 Wittmann 1973, 60 f.
185 Rentzel 1998, 190.
186 Rentzel 1994, 40; Wittmann 1973, 60.
187 Bossert-Radtke 1992, 11.
188 Gerster-Giambonini 1978.
189 Gonzalez 1993, 8; Merki 1961, 206–213.

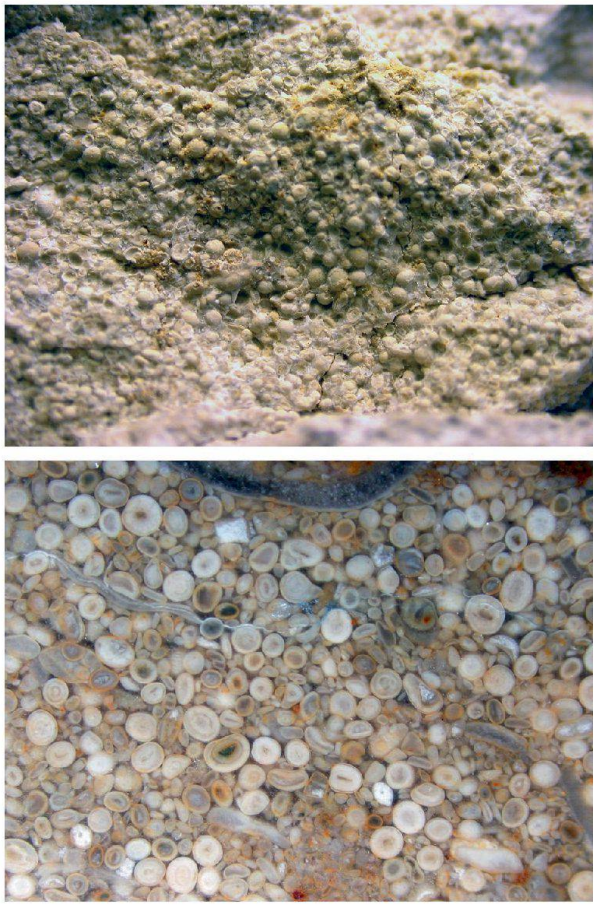


Abb. 11: Hauptrogenstein mit den typischen Ooiden. Oben natürlich gebrochen (Ausschnitt ca. 34 mm breit); unten angeschliffen und poliert (Ausschnitt ca. 13 mm breit).

genstein und Muschelkalk sind im Gelände gut zu erkennen. Das Merkmal des Hauptrogenstein sind die das Gestein aufbauenden und namengebenden, kugeligen, mit blossem Auge gut zu sehenden Ooide (Abb. 11). Der obere Muschelkalk ist anhand des typischen Auftretens in dünnen Bänken und der Gesteinsfarbe im Gelände zu erkennen, über Bereiche auch wegen der im Anschlag glänzenden Fossilien (Trochiten). Damit stand dem römischen Bindemittelproduzenten eine einfache Methode zur Verfügung, einmal gemachte Erfahrungen bei der Branntkalkherstellung einzelnen Gesteinstypen zuzuordnen und gezielt neue Vorkommen gleicher Gesteine zu suchen und auszubeuten.

Zusammenfassend werden in dieser Arbeit folgende Arbeitshypothesen für die Verwendung der verschiedenen Kalke in römischer Zeit aufgestellt:

1) Die gleichen Gesteine aus dem Muschelkalk, die als Bau- und Werksteine abgebaut wurden, also Trochiten- und Plattenkalk, wurden auch bevorzugt zur Branntkalkproduktion verwendet.
2) Der Trochiten- und Plattenkalk ist in den Aufschlüssen oft durch den als Baustein äusserst schlecht geeigneten porösen Trigonodusdolomit überlagert. Letzterer wurde aber zu Branntkalk verarbeitet.
3) Hauptrogenstein steht im nahen Ergolztal am Talboden in grosser Menge zur Verfügung, er ist als Baustein aber eher schlecht verwendbar. Er wurde jedoch zu Branntkalk verarbeitet und damit gleichzeitig die Ressource «Muschelkalk» geschont.

Mit diesen Hypothesen soll keineswegs die Verwendung auch anderer Gesteine zum Brennen ausgeschlossen werden, dies ist sogar punktuell höchst wahrscheinlich. Die beim Bau von Grossprojekten wie der Wasserleitung oder des Theaters benötigten Branntkalkmengen sind riesig und konnten wohl kaum aus einer einzigen Quelle gedeckt werden.

Auswahl der Gesteinsproben

Einleitung: Es wurde eine Sammlung von potenziell um Augusta Raurica zur Branntkalkherstellung verwendeter Karbonatgesteine zusammengetragen, um sie als Referenzproben zum Vergleich mit dem Bindemittel der antiken Mörtel zu verwenden. Die Beprobung und die chemischen Analysen wurden gemäss obenstehenden Arbeitshypothesen auf den oberen Muschelkalk und den Hauptrogenstein konzentriert. Gesteinsproben wurden ausschliesslich in natürlichen Aufschlüssen oder Steinbrüchen entnommen, die schon im Rahmen von stratigrafischen und sedimentpetrografischen Arbeiten aufgearbeitet worden sind. Es standen somit Resultate zur Verfügung, die mit den klassischen petrografischen Methoden gewonnen und publiziert wurden.

Probennahme: Total 56 möglichst unverwitterte Gesteinsproben von > 5 kg wurden aus den neun Profilen entnommen (Tabelle 3); die genaue stratigrafische Lage der Proben findet sich im Anhang 1. Der obere Muschelkalk, von der Obergrenze der Dolomitzone bis zur Lettenkohle, ist im Umkreis von wenigen Kilometern um Augusta Raurica praktisch durchgängig aufgeschlossen. Er wurde in fünf Profilen, A1–A5, beprobt (Abb. 12; 13). Der Hauptrogenstein ist fast in seiner gesamten Mächtigkeit ca. 10 km südöstlich von Augst in aufgelassenen Steinbrüchen bei Lausen im Ergolztal zugänglich (Abb. 14, A6–A8). Auf eine systematische Beprobung der Malmkalke (A9) wurde verzichtet (siehe oben).

Resultate

Chemische Analysen (AAS): Die Resultate der chemischen Analysen sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Drei Proben wurden nicht analysiert: Bei A1_1 handelt es sich um toniges, nicht zur Bindemittelproduktion geeignetes Material aus dem Estherienschiefer, die Proben A7_5 und A7_7 waren bis ins Innere verwittert und daher nicht von Verunreinigungen zu säubern. Im Diagramm Ca-Mg bilden sich klar zwei Gruppen heraus (Abb. 15,a.b): (1) Mg-reiche Lösungen mit einem Verhältnis von Kalzium zu Magnesium von ca. 1:2, und solche mit einem Ca/Mg-Verhältnis > 100:1. Zur ersten Gruppe zählen die Analysen aller Gesteine der Profile A1 und A2, bis auf Probe A1_5. Es zeigt sich, dass der Mg-Gehalt aller Säureaufschlüsse der Hauptrogensteinpro-

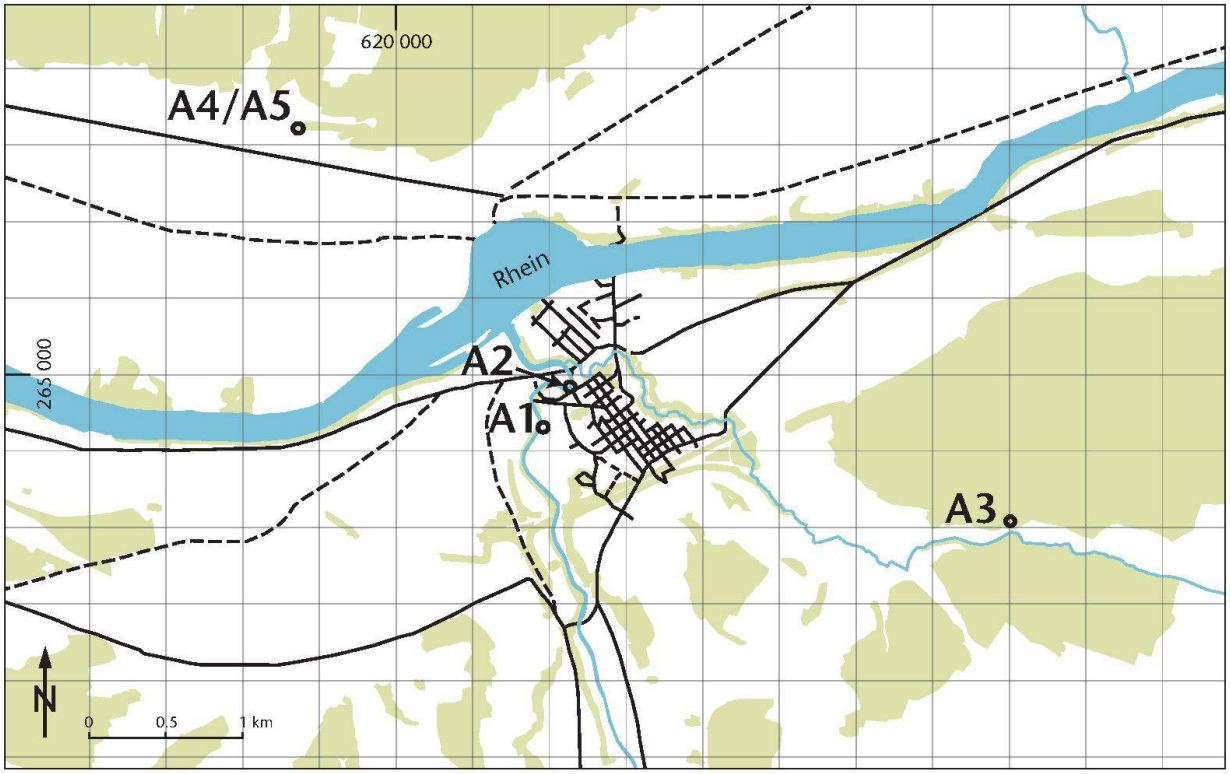


Abb. 12: Beprobte Profile im Muschelkalk (A1–A5). Hellgrün: aktuelle Bewaldung, Schwarz: Römisches Wegnetz. M. 1:50000.

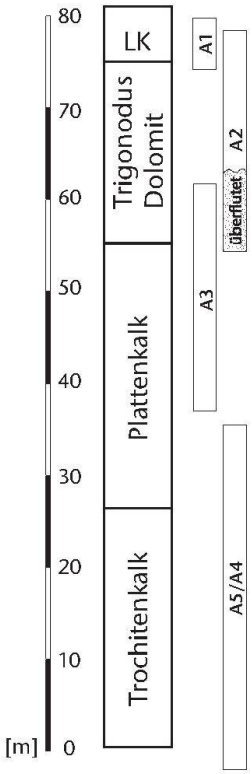
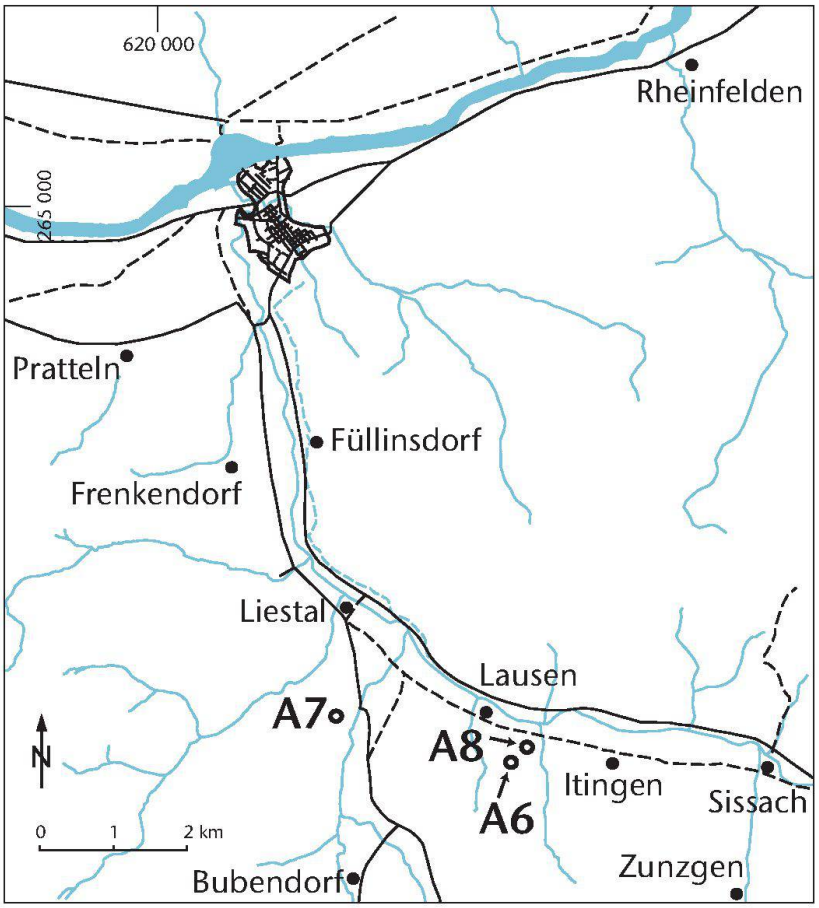
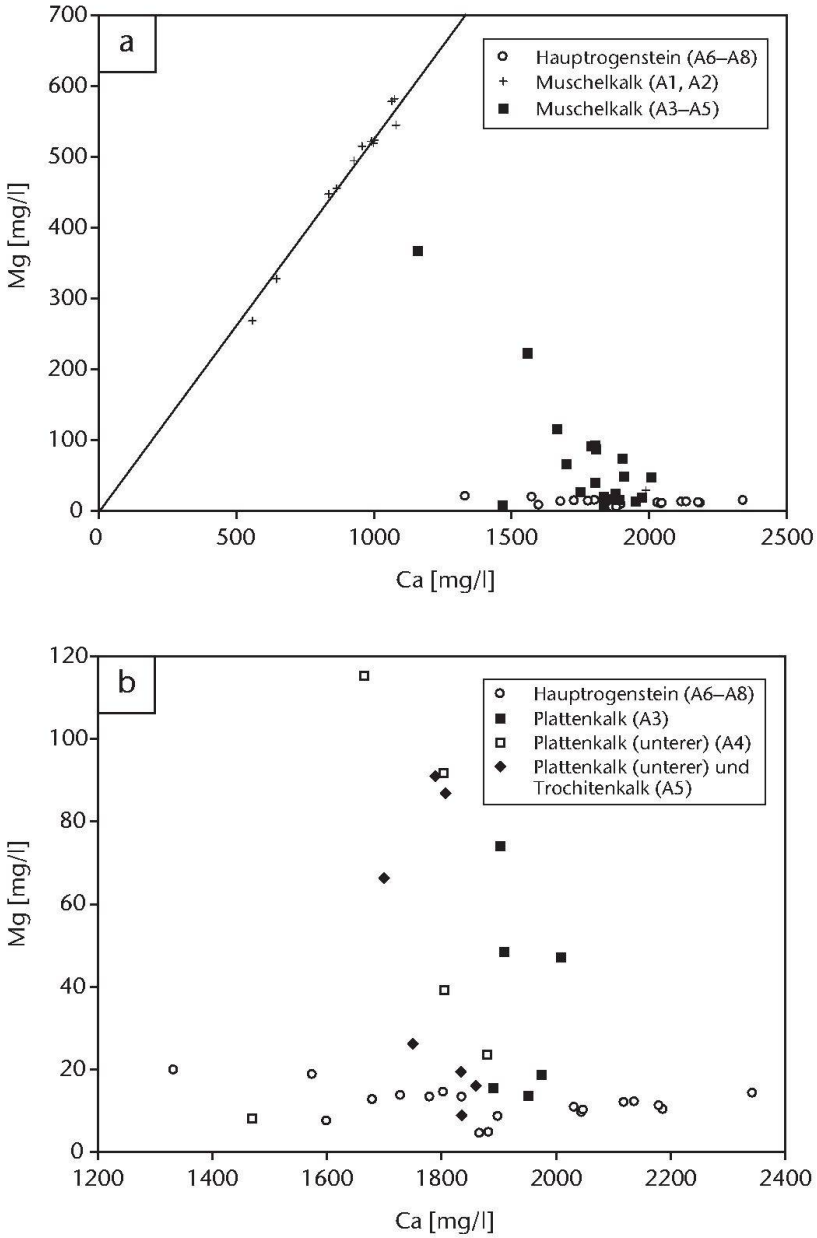


Abb. 13: Stratigrafische Lage der beprobten Profile im Muschelkalk. LK = Lettenkohle.

► *Abb. 14: Beprobte Profile im Hauptrogenstein (A6–A8). M. 1:100000.*



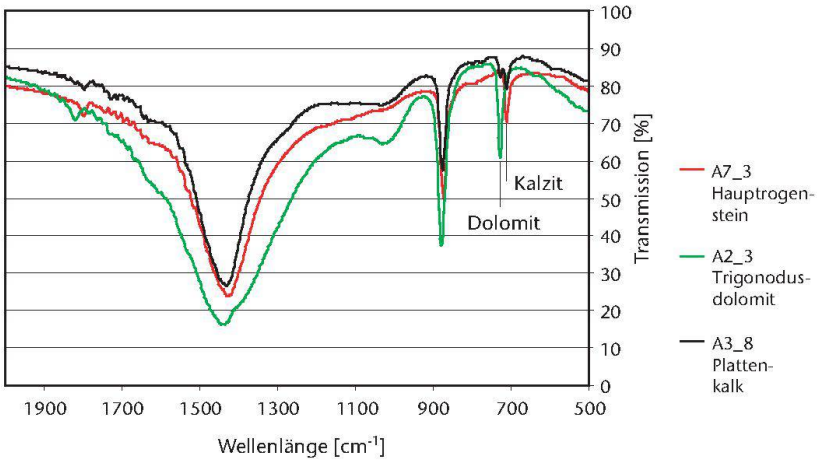


► *Abb. 15: a) Mg/Ca-Diagramm der Gesteinsproben aus dem Muschelkalk und dem Hauptrogenstein. – b) Mg/Ca-Diagramm, Detail aus a).*

ben (Aufschlüsse A6–A8) unter 20 mg/l und damit unter ca. 1 Gew.-% liegt. Die Gesteine der Aufschlüsse A3–A5 haben einen variablen Mg-Gehalt, dieser ist im Mittel aber deutlich grösser als jener der Hauptrogensteinproben (Abb. 15,b).

Die Sr-Gehalte in den Säureaufschlüssen der dolomitischen Gesteine (Aufschlüsse A1 und A2) sind im Schnitt ca. 5 × geringer als die der Mg-armen Karbonate (Aufschlüsse A6–A8). Auch die nicht dolomitischen, aber Mg-reichen Proben des Profils A3 (A3_2 und A3_8) sind arm an Strontium. Der Anteil des bei Umgebungstemperatur in der stark verdünnten Salzsäure löslichen Siliziums und Aluminiums der Gesteinsproben ist sehr gering. Die Gehalte konnten mit der Flammen-AAS nachgewiesen werden, für eine Quantifikation waren sie aber bei allen Proben zu klein.

FTIR und XRD: Eine Auswahl von drei Infrarotspektren findet sich in Abbildung 16. Absorption tritt bei allen Gesteinsproben in den für Karbonaten typischen Bereichen auf. Die Proben der Aufschlüsse A1 und A2, bis auf Probe A1_5, weisen bei 728 cm^{-1} eine Absorptionsbande auf, es handelt sich um Dolomit. In den anderen Proben wurde Kalzit nachgewiesen, mit einer Absorptionsbande bei 712 cm^{-1}, in den Proben A3_2 und A3_8 zudem Dolomit. Mit der Röntgendiffraktion wurde in den Proben der Aufschlüsse A1 und A2 Dolomit und teilweise Quarz gefunden, die Präsenz von Dolomit in den Proben A3_2 und A3_8 konnte bestätigt werden. In den Proben der Aufschlüsse A6–A8 (Hauptrogenstein) wurde hingegen in keinem Fall Dolomit nachgewiesen.



◄ *Abb. 16: Drei typische FTIR-Spektren von beprobten Kalksteinen aus dem Muschelkalk und Hauptrogenstein.*

Diskussion

Die Resultate sowohl der chemischen Analysen als auch der FTIR- und XRD-Messungen decken sich bezüglich der für Mg (Dolomit) und Ca (Kalzit) erwarteten Verteilung sehr gut mit den Resultaten der sedimentologisch-petrografischen Analysen der entsprechenden Profile aus der Literatur[190]. Bei den Aufschlüssen A1 und A2 im Trigonodusdolomit ist der karbonatische Anteil in den Detailprofilen durchgängig als Dolomit ausgewiesen[191]. Die einzige Probe dieser zwei Aufschlüsse mit geringem Mg-Gehalt (A1_5) wurde in der Lettenkohle im Liegenden zum Keuper genommen; es handelt sich allenfalls um einen verstürzten Block und nicht um ursprünglich anstehendes Gestein. Im Plattenkalk (Aufschluss A3) wechsellagern teilweise plattige Kalke mit dolomitischen Zwischenlagen. So sind auch die Mg-Gehalte der Proben dieses Aufschlusses variabel. Probe A3_2 (hoher Mg-Gehalt) und A3_3 (tiefer Mg-Gehalt) wurden mit vertikalem Abstand von nur ca. 30 cm genommen. In zwei der beprobten Kalke (A3_2 und A3_8) kommen Kalzit und Dolomit nebeneinander vor. Eine hohe Variabilität der Mg-Gehalte wurde auch in den Plattenkalk und Trochitenkalk umfassenden Aufschlüssen (A4/A5) beobachtet.

Die dolomitischen Gesteine (Aufschlüsse A1 und A2; Trigonodusdolomit) des Muschelkalks lassen sich also anhand ihres hohen Mg-Gehaltes klar von den anderen Gesteinsproben abgrenzen. Es zeigte sich, dass auch die nicht als Dolomit ausgewiesenen Proben aus dem Plattenkalk und Trochitenkalk (Aufschlüsse A3–A5) einen höheren Anteil an Magnesium aufweisen als die Doggerproben. Bei einer Verwendung des Plattenkalks und/oder des Trochitenkalks zur Branntkalkproduktion kann davon ausgegangen werden, dass eine Durchmischung von Mg-reichen und Mg-ärmeren Gesteinen stattfindet, liegen die Gesteine doch in den Aufschlüssen oft fein gebankt (einige 10er cm) vor. Der Gehalt an Magnesium im Branntkalk und damit auch im Bindemittel der daraus hergestellten Mörtel sollte als einfaches Unterscheidungskriterium zwischen aus Hauptrogenstein und aus oberem Muschelkalk hergestellten Mörteln zu nutzen sein.

Rohstoffe für den Mörtelzuschlag

Einleitung

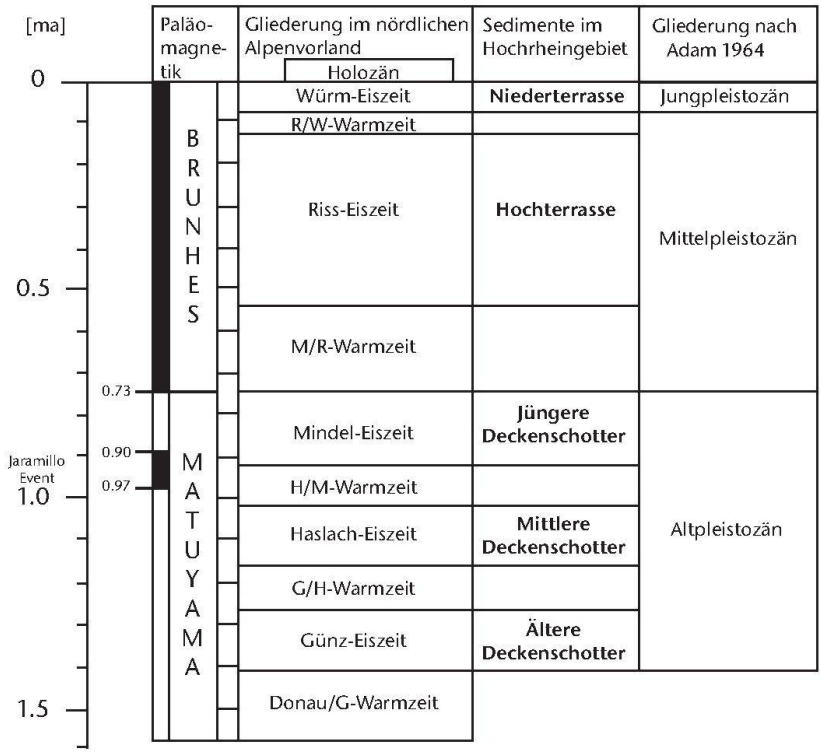
Mit der Beprobung und Analyse von klastischen Sedimenten in der Umgebung von Augusta Raurica sollte abgeklärt werden, welche der reichhaltig vorhandenen Quartärablagerungen sich als Zuschlag für Mörtel eignen und welche allenfalls bei der römischen Mörtelproduktion Verwendung fanden.

Potenzielle Rohstoffe für Mörtelzuschlag um Augusta Raurica

Das Quartär umfasst die letzten ca. 2,6 Millionen Jahre, in denen im Gebiet der heutigen Schweiz Eiszeiten mit Warmzeiten abwechselten. Die Gletscher und Schmelzwasserströme zu Beginn der Zwischeneiszeiten transportierten wiederholt enorme Geröllmassen ins Vorland. Es lagerten sich so auch im Rhein- und im Ergolztal weitläufige und mächtige Schotterfluren ab (Abb. 17; 18). In den Warmzeiten schwollen Flüsse durch das Schmelzwasser an und schnitten sich dabei in die früher abgelagerten Schotter oder gar in die tiefer liegenden Jura- oder Triassedimente ein. Später abgelagerte Sedimente kamen so topografisch tiefer als die älteren zu liegen. Oft blieben aber an den Talflanken Reste der älteren Ablagerungen bestehen. Auf den jüngsten Schotterfluren, den Niederterrassenschottern, liegt das ehemalige Stadtgebiet von Augusta Raurica. Die Mächtigkeit der unkonsolidierten Sedimente unter der Oberstadt beträgt zwischen 20 und 40 m, unter der auf einer tieferen Terrasse gelegenen Unterstadt maximal 10 m[192]. Durch Albrecht Penck und Eduard Brückner wurden Quartärformationen mit den weiträumigen Vorlandvereisungen korreliert[193]. Nach der klassischen Nomenklatur werden vier grosse Eiszeiten un-

190 Gonzalez 1993, 8; Merki 1961, 177; Schmassmann 1945, 93–109 Tabelle 1; 2.
191 Merki 1961, 177.
192 Fäh u. a. 2006, 3.
193 Penck/Brückner 1909.

► *Abb. 17: Übersicht über die Quartärsedimente im Hochrheingebiet, nach Verderber 1992, Tabelle 1.*



terschieden: Günz, Mindel, Riss und Würm. Neuere Untersuchungen zeigen allerdings, dass sich die zugehörigen vier morphostratigrafischen Einheiten des schweizerischen Alpenvorlands, Höhere Deckenschotter und Tiefere Deckenschotter, Hochterrasse und Niederterrasse intern weiter gliedern lassen. Es lassen sich deutlich mehr einzelne Kalt- und Warmzeiten abgrenzen, als dies durch die klassische Vierteilung vorgegeben war[194]. In der vorliegenden Arbeit wird die Nomenklatur von Rainer Verderber verwendet[195].

Deckenschotter: Die hoch über den heutigen Tälern liegenden Reste glaziofluvialer Schotter werden als Deckenschotter bezeichnet[196]. Die Deckenschotter in der Umgebung von Basel wurden von Andreas Gutzwiller und Roman Frei ausführlich beschrieben[197]. Eine Neubearbeitung der Deckenschotter zwischen Schaffhausen und Basel führte R. Verderber durch[198]. R. Frei unterteilt die Deckenschotter in Ältere und Jüngere Deckenschotter, R. Verderber scheidet zudem Mittlere Deckenschotter aus[199]. Diese Dreiteilung wurde anhand von Höhenlage und Geröllzusammensetzung vorgenommen. Die drei Schotterniveaus werden durch bis zu 20 m mächtige Löss- und Lösslehmschichten bedeckt, daher treten sie morphologisch meist nicht deutlich hervor. Beschreibungen mehrerer Aufschlüsse in der näheren Umgebung von Augusta Raurica und Geröllanalysen finden sich bei R. Verderber[200]. Allen Aufschlüssen des Deckenschotter um Augusta Raurica ist der hohe Anteil an alpinen Geröllen (≥ 90%) gemein, wobei die Menge an kalkigen, kieseligen und kristallinen Geröllen variiert[201]. Die restlichen Prozente machen Schwarzwald-Kristallin und Juragerölle aus.

Hochterrasse: Die Hochterrasse ist vor allem an der linken Talseite des Ergolztals bei Liestal gut aufgeschlossen. Eine Beschreibung findet sich bei Franz Leuthardt und bei Hansjörg Schmassmann, eine Übersicht über die Quartärablagerungen im Ergolztal bei Paul Suter[202]. Die Schotter im Ergolztal weisen einen hohen Anteil an gut gerundeten, oolithischen Kalken des Hauptrogenstein und anderen Doggergeröllen, aber auch einen geringen Anteil an alpinen Geröllen (u. a. Quarziten) auf.

Niederterrasse: Im Umkreis von Basel zeigen die Ablagerungen der Würm-Eiszeit, die Niederterrasse des Rheins, eine Aufgliederung in mehrere Einzelfelder, welche durch im Gelände zu verfolgende, gegen den aktuellen Rheinlauf hin abgetreppte Stufen voneinander getrennt werden. Es hat

194 Nagra 2002, 53–56.
195 Verderber 1992.
196 Verderber 1992, 26.
197 Gutzwiller 1894; Gutzwiller 1912; Frei 1912.
198 Verderber 1992.
199 Frei 1912, 3; Verderber 1992, 26.
200 Verderber 1992, 26–33.
201 Verderber 1992, 29.
202 Leuthardt 1923, 104–106; Schmassmann 1970, 23–30; Suter 1971.

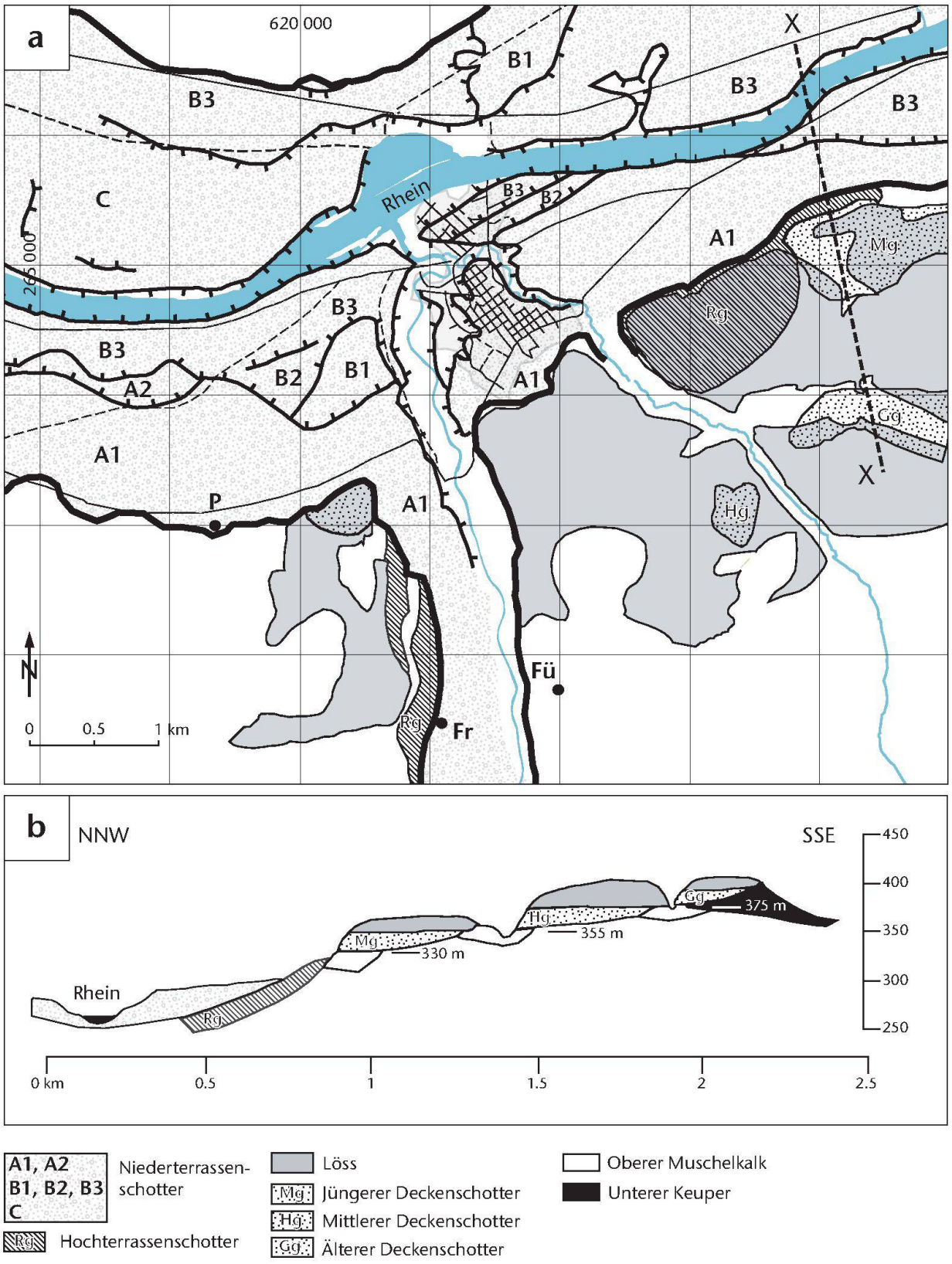
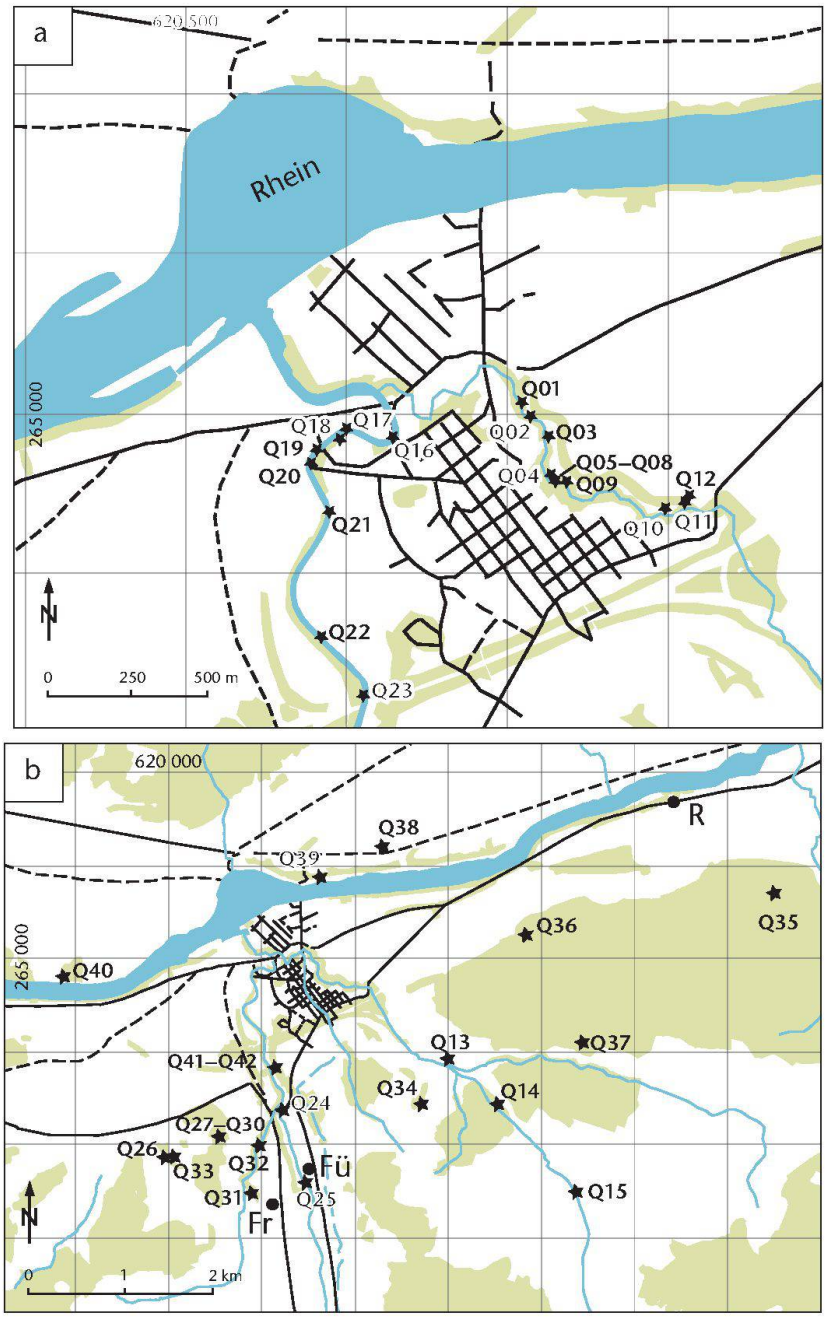


Abb. 18: a) Quartärgeologie um Augusta Raurica (zusammengestellt nach: Disler 1931; Rentzel 1997; Verderber 1992; Wittmann 1961). Fü = Füllinsdorf, Fr = Frenkendorf, P = Pratteln. X ----- X = Profilspur (Abb. 18b). M. 1:45 000. – b) Schnitt durch das Rheintal (nach Verderber 1992, Abb. 10). Die Mittleren Deckenschotter sind in den Schnitt projiziert. M. ca. 1:17 000, 30-fach überhöht.



▶ *Abb. 19: Beprobte Lockersedimente (hellgrüne Flächen: aktuelle Bewaldung). a) Proben nahe der Oberstadt von Augusta Raurica. M. 1:23 000. – b) Restliche Proben. M. 1:83 000.*

sich eine Aufteilung in drei Gruppen, A, B und C, durchgesetzt. Die A- und B-Felder werden wiederum in je drei Felder unterteilt, (A1, A2, A3) und (B1, B2, B3). Die weiten Ebenen der Rheinterrassen werden durch Rheinschotter und teils auch durch Hochflutsande gebildet, welche je nach Ausgangsgestein und geomorphologischer Lage durch unterschiedlich ausgeprägte Verwitterungsdecken überlagert werden[203].

Die zeitliche Einordnung der Felder wurde kontrovers diskutiert, es liegt nur für das C-Feld ein chronostratigrafischer Fixpunkt vor[204]. Eine chronologische Einordnung der Felder wurde durch Philippe Rentzel anhand von quartärgeologisch-bodenkundlichen Untersuchungen an den linksrheinischen Niederterrassen erarbeitet[205]. Die Niederterrassenschotter sind im ehemaligen Stadtgebiet von Augusta Raurica an der Oberfläche nicht direkt aufgeschlossen. Sie werden im Süden nahe der Talflanke («Im Sager») von einer periglazialen, von der Hochterrasse abgeflossenen Ablagerung von Löss, Kalkschottern und wenig alpi-

203 Rentzel 1997, 34.
204 Graul 1962, 181–196; Wittmann 1961, 41 Tabelle 2.
205 Rentzel 1997, 43 Abb. 9.

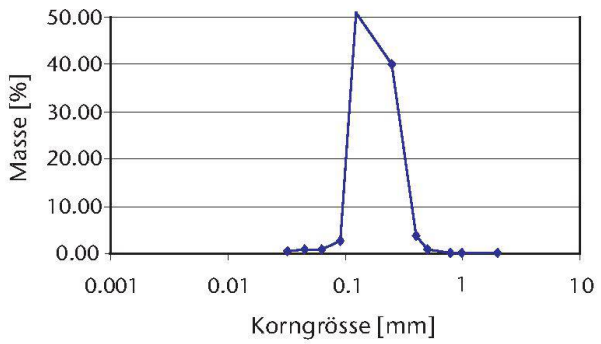


Abb. 20: Siebanalyse von Q08, Niederterrassenschotter (Sandlinse). Das Korngrössenspektrum ist sehr eng, Körner mit einigen mm Durchmesser fehlen total.

nen Geröllen bedeckt[206]. Darüber folgen Bodenbildungen. Diese Schwemmlössdecke keilt gegen Norden hin aus und ist auf dem Geländesporn von Augst-«Kastelen» nicht mehr vorhanden[207]. Dort findet sich als Äquivalent eine orangerötliche Parabraunerde mit Schottern, überlagert durch gelbbraunen bis orangen, schwach lehmigen Sand mit Fein- und Grobkies[208]. Die Schwemmlössdecken und überlagernden Bodenhorizonte wurden in römischer Zeit zur Ziegelherstellung verwendet[209].

Probennahme und Auswahl von Sedimentproben

Es wurden 42 Sedimentproben im Gelände genommen (Abb. 19,a.b; Koordinaten der Aufschlüsse: Anhang 2). Die Proben verteilen sich auf die Deckenschotter, die Hochterrassenschotter der Ergolz, die Niederterrassenschotter des Rheins und rezent aufgearbeitete Sedimente. Diese stammen entweder direkt aus den Flussbetten oder Ablagerungen der Ergolz und dem Violenbach. Beprobt wurde auch die den Niederterrassenschotter überlagernde Decke (siehe oben).

Um auch die gut zementiert vorliegenden Deckenschotter in die Einzelfraktionen aufsieben und analysieren zu können, wurde eine rezent verwitterte Probe direkt unterhalb eines Deckenschotteraufschlusses genommen. Von den Proben wurde eine Auswahl, die alle obgenannten Sedimenttypen abdeckt, petrografisch quantitativ und auf ihre chemische Zusammensetzung mit AAS untersucht. Bei den anderen Proben beschränkte sich die Analyse auf Siebanalysen, XRD an Siebfraktionen und qualitative Mikroskopie an Dünnschliffen, Anschliffen und losem Material.

Resultate

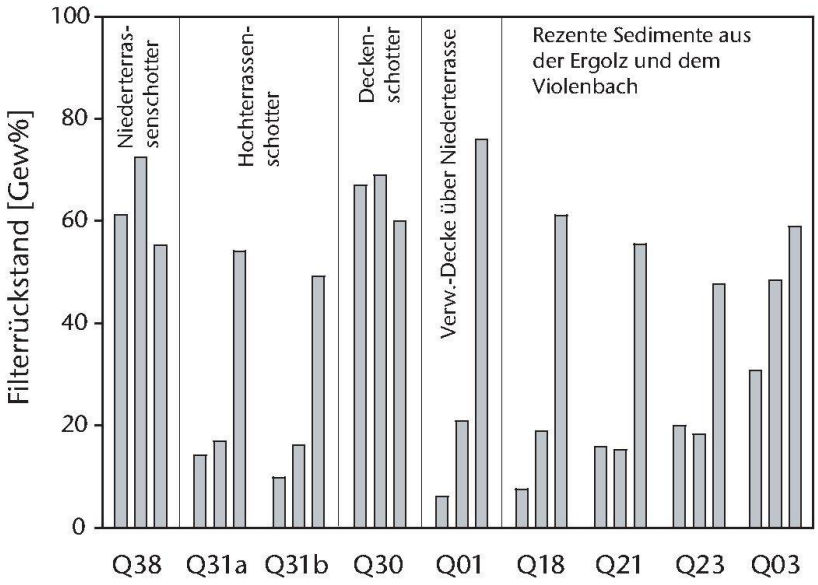
Siebanalysen: Die Analysen sind im Anhang 3 zusammengefasst. Die direkt im Flussbett der Ergolz oder dem Violenbach in Bereichen mit stärkerer Strömung genommenen Proben weisen meist nur einen geringen Feinanteil (< 100 µm) auf. Die Fliessgeschwindigkeit des Wassers ist zu hoch für die Sedimentation von Partikeln dieser Korngrösse. Bei der Entnahme von Proben im fliessenden Wasser werden zudem feinkörnige Partikel freigesetzt und weggewaschen, die vorher durch Adhäsionskräfte am Sediment gehaftet sind. Die anstehende Hochterrasse des Ergolztals, aber auch die durch die Ergolz und den Violenbach freigelegte, auf die Niederterrasse auflagernde Verwitterungsdecke weisen einen höheren Gehalt an feinen Partikeln auf. Zu erklären ist dies unter anderem mit deren sekundären Aufarbeitung und Vermengung mit dem in der Region verbreitet vorhandenen Löss, welcher einen grossen Anteil an siltigen Partikeln, vor allem Quarz und Feldspat, aufweist. Die Korngrössenverteilung beider beprobter Aufschlüsse der Niederterrassenschotter des Rheins ist klar bimodal, bestehend einerseits aus feinem Sand und andrerseits aus grobem Kies. Auch die in den Schotterkörpern liegenden Sandlinsen weisen ein relativ enges Korngrössenspektrum zwischen ca. 0,1 und 1 mm auf. Gerölle mit Durchmessern von einigen Millimetern fehlen (Abb. 20).

Chemische Analysen und Analysen am Filterrückstand: Die Resultate der Analysen sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Der säureunlösliche, als Filterrückstand zurückbleibende Anteil an den Siebfraktionen liegt zwischen 6 und 76% (Abb. 21). Es lassen sich zwei Probengruppen ausscheiden: Bei Q30 (Deckenschotter) und Q38 (Niederterrassenschotter des Rheins) variiert der Anteil an säureunlöslichem Material der je drei einzelnen Siebfraktionen wenig und ist hoch (> 55%). Bei den anderen Proben ist der säureunlösliche Anteil bei der Fraktion < 0,063 mm deutlich höher als bei den zwei gröberen Fraktionen. Zwischen der gröbsten und der feinsten Fraktion beträgt die Differenz bei den sechs Proben minimal 28% (Q03), maximal 70% (Q01). Der Anteil an Karbonatfragmenten nimmt bei kleinerer Korngrösse also deutlich ab. Der Gehalt an Kalzium in den Lösungen verhält sich indirekt proportional zum Filterrückstand (Abb. 22). Ein Wert schert aus, Q38 (< 0,063 mm): Im Filtrat muss neben Kalzium mindestens ein anderes Element in grösserer Menge gelöst sein. Bei dieser Probe ist der Gehalt an Magnesium mit 207,9 mg/l im Filtrat deutlich höher als bei den anderen Proben mit einem mittleren Gehalt von 11 mg/l. In allen neun Proben bestehen die Rückstände vor allem aus farblosen, eckigen Mineralen mit einem Brechungsindex von ca. 1,55; es handelt sich um Quarz.

Röntgendiffraktion (XRD): In Abbildung 23 sind die Röntgendiffraktogramme von fünf Siebfraktionen der Probe Q01 dargestellt. Die Probe stammt aus der die Niederterrassenschotter überdeckenden Verwitterungsdecke. Der Karbonatgehalt der Sedimentprobe nimmt in den kleinen Fraktionen ab, dafür nimmt vor allem der Quarzgehalt zu.

206 Rentzel 1997, 35 f.
207 Rentzel 1997, 36 f.
208 Rentzel 1997, 37.
209 Rentzel 1997, 35–37.

► *Abb. 21: Filterrückstand von neun in verdünnter Salzsäure gelösten Lockersedimentproben. Die erste Säule jeder Probe entspricht der Korngrössenfraktion 0,63–6,3 mm, die zweite der Fraktion 0,063–0,63 mm, die dritte der Fraktion < 0,063 mm.*



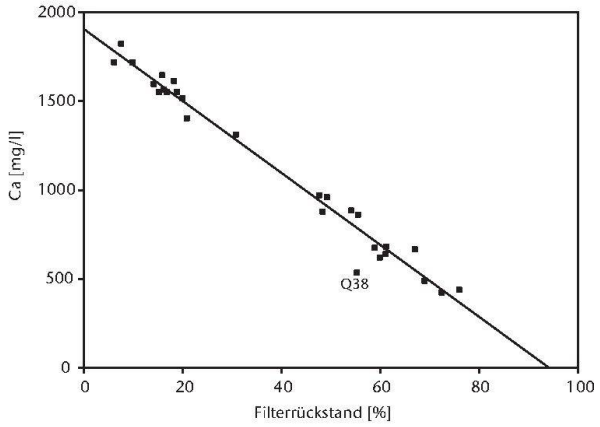


Abb. 22: Filterrückstand der in Säure gelösten Quartärproben gegen Ca-Gehalt in der Lösung (mit AAS gemessen).

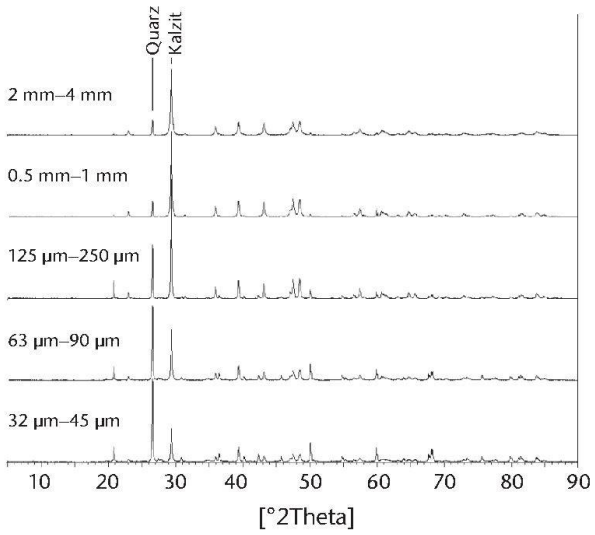
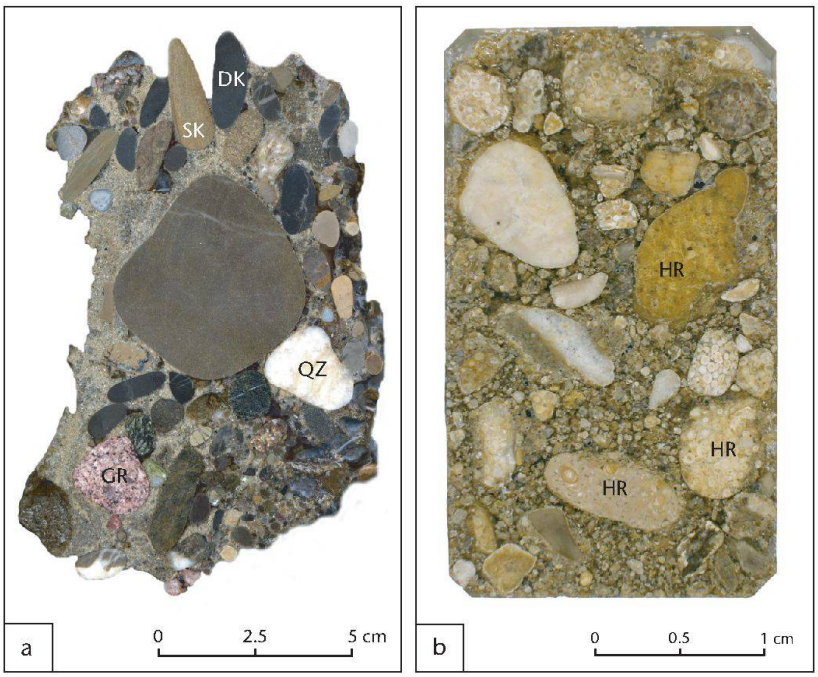


Abb. 23: Röntgendiffraktogramme von fünf Siebfraktionen der Probe Q01.

Stereomikroskopie: Der durch Kornzählung ermittelte Gehalt der Proben an oolithischem Kalk variiert stark (Tabelle 5). Die zwei untersuchten Proben aus dem Niederterrassenschotter des Rheins (Q38) und dem Deckenschotter (Q30) enthalten keinen oolithischen Kalk. Die höchsten Gehalte weisen die Proben aus dem Hochterrassenschotter der Ergolz (Q31 und Q18) auf. Die Proben aus dem Violenbach, der Ergolz und dem Deckenschotter des Ergolztals enthalten alle einen hohen Anteil an oolithischem Kalk. In den zwei Proben aus dem Deckenschotter und dem Niederterrassenschotter des Rheins ist der Gehalt an oolithischem Kalk hingegen verschwindend klein resp. oolithischer Kalk ist nicht nachzuweisen.

Dieses Verteilungsmuster wurde durch die Abschätzung des Gehalts an oolithischen Kalken bei den anderen Proben bestätigt. In den Proben aus dem Niederterrassenschotter und dem Hochterrassenschotter wurde der Gehalt an oolithischen Kalken in allen Fällen auf < 5% geschätzt, in den anderen Proben auf ≥ 50%. Die Deckenschotter liegen in unverwittertem Zustand gut zementiert vor (Abb. 24,a), es dominieren alpine Gesteine. Die beprobten Sedimente der Niederterrasse des Rheins zeigen alle eine mehrheitlich helle bis dunkelgraue Farbe und sind durch ihren geringen oder fehlenden Gehalt an oolithischem Kalk einfach von den an den Talflanken des Ergolztals anstehenden Hochterrassenschotter der Ergolz zu unterscheiden. In diesen dominieren lokale Juragerölle, besonders stark ist der oolithische Hauptrogenstein vertreten (Abb. 24,b). Das im Violenbach und in der Ergolz auftretende rezente Spektrum an Gesteinstypen im Sand und Feinkies gleicht demjenigen der Hochterrasse des Ergolztals. Auch hier dominieren lokale Juragesteine.



◄ *Abb. 24: Polierte Anschliffe von Quartärsedimenten: a) Probe aus dem Deckenschotter (Q27). Der Deckenschotter besteht zu über 90% aus alpinen Geröllen. Markiert sind: Dunkler Kalk (DK), Sandiger Kalk (SK), Quarzit (QZ) und Granit (GR). – b) Probe aus dem Hochterrassenschotter der Ergolz (Q31). Jurakalke herrschen klar vor. Klar am häufigsten treten oolithische (Dogger-)Kalke, d. h. Hauptrogenstein (HR), auf.*

Diskussion

Die antike Stadt Augusta Raurica stand direkt auf durch Lösslehm und Bodenbildungen überdeckten quartären Schotterterrassen. Sande und Schotter waren an durch die Flüsse Rhein und Ergolz und den Violenbach gebildeten, natürlichen Aufschlüssen direkt zugänglich oder aber durch untiefe Gruben im Umkreis des Stadtgebiets einfach zu erreichen. Wenn man an der Oberfläche der Niederterrasse, auch zwischen Ergolz und Violenbach, in die Tiefe gräbt, dann stösst man zuerst auf die umgelagerten und verwitterten, durch Juragerölle dominierten Schichten, und erst danach auf die anstehenden Niederterrassenschotter. In der Umgebung der Oberstadt von Augusta Raurica am einfachsten zu erreichen waren also durch fluviatile Erosion der Ergolz freigelegte Sedimente oder aber umgelagerte, die Niederterrasse bedeckende Sande und Schotter.

Die Deckenschotter waren aus geografischen Überlegungen wenig geeignet als Mörtelzuschlag, liegen sie doch erhöht über den Talböden und waren damit schlecht zugänglich. In den Talniederungen finden sich deutlich einfacher zu erreichende und zudem unzementierte Sande und Schotter. Die beprobten Sedimente aus der Niederterrasse sind für die Kalkputzherstellung wegen des sehr engen Grössenspektrums des feinen Anteils nur bedingt geeignet. Das heutige Geröllspektrum und die Korngrössenverteilung der Sedimente der Ergolz und des Violenbachs weichen wohl von denjenigen zur römischen Zeit ab. Durch die Aufstauung des Rheins im Jahre 1912 hat sich nicht nur der Wasserspiegel, sondern auch die Flussmechanik und damit die Sedimentation im Unterlauf der Bäche verändert. Das zeigt sich daran, dass einzelne durch Carl Disler und Karl Strübin vor der Aufstauung beschriebene Aufschlüsse an der Ergolz heute nicht nur überflutet, sondern mit mehreren Metern an Sediment eingedeckt sind[210]. Zudem änderte sich vor allem der mäandrierende Unterlauf der Ergolz seit römischer Zeit mehrmals[211].

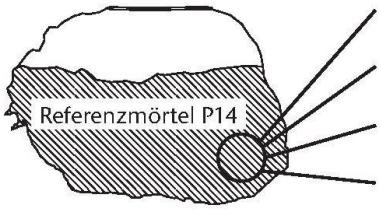
Zusammenfassung: Potenzielle Rohstoffe

Den römischen Mörtelproduzenten von Augusta Raurica stand eine Vielzahl verschiedener Rohstoffquellen zur Verfügung, sowohl für Karbonate zur Branntkalkproduktion als auch für Lockersedimente als Mörtelzuschlag. Zum Brennen eignen sich viele der Karbonate, am wahrscheinlichsten ist aber die hauptsächliche Verwendung des oberen Muschelkalks und allenfalls des Hauptrogensteins durch die römischen Kalkbrenner, da umfangreiche Vorkommen nahe bei der Stadt liegen und leicht abbaubar sind. Es zeigte sich, dass sich Gesteine dieser zwei Typen anhand ihres Gehalts an Magnesium unterscheiden lassen. Dieses Kriterium sollte auch zur *Unterscheidung* von Mörteln zu nutzen sein, falls sie aus den zwei unterschiedlichen Rohmaterialien produziert wurden.

Als Mörtelzuschlag eignen sich viele der um und in Augusta Raurica anstehenden Sande und Schotter. Bei Putz- und Mauermörteln in nicht-dekorativer Anwendung sind die Anforderungen an die inerte Magerung gering, bis auf die passende Sieblinie (Korngrösse). Daher kann von der

210 Disler 1914, 68–75; Strübin 1901, 14–26.
211 Clareboets 1994, 239–246.

Putzfragmente der Römerstadt Augusta Raurica, mit Katalognummer (19xx.xxxx)



Auswahl von Referenzmörteln, Namensgebung (P1–P20): B. Janietz, Augusta Raurica

Alle Präparate: PB19

Dünnschliff

SEM Probe (Anschliff)

SEM Probe (Bruchstück)

Probe für MIP

Gezielte Beprobung der Referenzmörtel Namensgebung (PBxx): P. Berner

Abb. 25: Namensgebung der Putzproben am Beispiel von P14. Nur die rote «Ziegelmörtel»-Schicht wurde als Referenzmörtel definiert und darum gezielt beprobt.

Verwendung der nächstliegenden Sedimente ausgegangen werden. Ausgeschlossen wurde hingegen die Verwendung der hoch liegenden und meist gut zementierten Deckenschotter.

Die verschiedenen Quartärsedimente können teilweise anhand ihres stark unterschiedlichen Gehalts an oolithischen Doggerkalken einfach unterschieden werden, so die Niederterrassenschotter des Rheins und die Deckenschotter (beide sehr geringe Gehalte, < 5 %) von den Hochterrassenschottern des Ergolztals (hohe Gehalte, > 40 %).

Mörtelanalysen von Augusta Raurica

Putzmörtel: Insula 36

Material und Probennahme

In der Römerstadt Augusta Raurica liegen mehrere Zehntausend Wandmalereifragmente vor. Eine umfassende archäologische Bearbeitung der Funde wurde 1986 begonnnen, aber nicht abgeschlossen[212]. Im Rahmen eines Projekts des Schweizerischen Nationalfonds wurden die Putzfragmente der Grabung 1984.051 in der Insula 36 untersucht. Diese Insula wurde für die naturwissenschaftlichen Analysen an Putzmörteln gewählt, unter anderem weil sie mitten im Stadtgebiet von Augusta Raurica lag und die Grabungsbefunde in einer Lizentiatsarbeit ausgewertet worden sind[213].

Naturwissenschaftliche Untersuchungen an Wandmalereifunden zielen oft auf die oberste, bemalte Schicht und im Speziellen auf die Pigmente ab. Es existiert eine umfassende Literatur zum Thema und zur Analysemethodik[214]. In der vorliegenden Arbeit wurden die Pigmente bewusst ausgeklammert und die Analysen auf die unterliegenden Putzmörtelschichten konzentriert. Aufgrund der optischen Beurteilung der Fragmente unter dem Binokular definierte die archäologische Bearbeiterin, Bettina Janietz, 20 Putzschichten als Referenzmörtel (P1–P20; Abb. 25), teilweise belegt durch mehrere Proben aus verschiedenen Dekorationen (Anhang 3). Die Referenzmörtel sollten später als Vergleichsstücke dienen, um andere Putzmörtel des Fundortes Augusta Raurica klassieren zu können. Um die Sammlung der Referenzmörtel zu komplettieren, damit ein möglichst weites Spektrum der in Augusta Raurica auftretenden Putzmörtel abgedeckt ist, wurden zusätzlich zwei Schichten aus Putzfragmenten der Insula 30 als Referenzmörtel definiert.

Es lagen 26 mehrschichtige, teilweise bemalte Putzfragmente zur Untersuchung vor (Anhang 4). Sechs der zwanzig Referenzmörtel waren durch je zwei verschiedene, aus unterschiedlichen Dekorationen stammende Putzfragmente belegt. Die Mörtelfarbe war mithilfe des Pantone Matching Systems bestimmt, der Zuschlag grob beschrieben und allfälliges Auftreten von «Kalkspatzen», Schamotte und organischen Zusätzen (z. B. Halmen) in der Augster Datenbank vermerkt worden. Bei den meist mehrschichtigen Putzproben wurden nur jene Putzschichten detailliert untersucht, die als Referenzmörtel definiert waren.

Die Putzproben wurden senkrecht zur Schichtung zweigeteilt. Eine Probenhälfte stand für die naturwissenschaftliche Untersuchung zur Verfügung, die andere wird ohne weitere Präparation als Belegstück für die Referenzsammlung (in Augusta Raurica) aufbewahrt. Die für mögliche Analysen zur Verfügung stehende Probenmenge variierte zwischen < 1 cm^3 bis ca. 200 cm^3. Für AAS-Analysen an angereichertem Bindemittel, analog zu den Mauermörteln (s. o. S. 221 bzw. u. S. 241), stand damit nicht genug Material zur Verfügung.

Mit einer Diamantsäge wurden senkrecht zur Putzoberfläche orientierte, ca. 1 cm dicke Scheiben geschnitten und daraus nach Härtung mit Kunstharz petrografische Dünnschliffe erstellt. Von den anfallenden Abschnitten wurden nach optischer Vorbeurteilung am Stereomikroskop wo möglich 1–2 cm^2 umfassende Teilproben entnommen und für

212 Janietz 2003.
213 Asal 2007.
214 Zum Beispiel Béarat u. a. 1997; Hochleitner 2002.

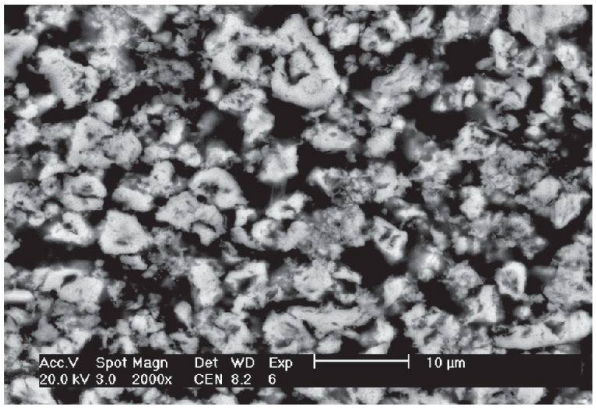


Abb. 26: REM-BS-Bild des Bindemittels (Putzklasse: P12). Die mit Kunstharz gefüllten Poren erscheinen schwarz, die Kalzitkristalle des Bindemittels in hellen Grautönen.

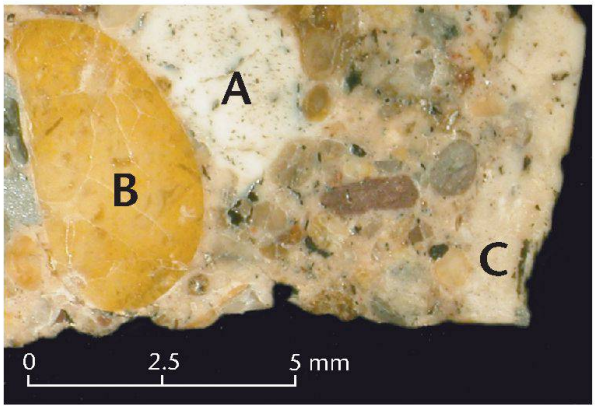


Abb. 27: Anschliff einer Putzprobe (Putzklasse: P1, Probe: PB01). A: Weisse Bindemittelkonkretion (Kalkspatz), frei von Zuschlag. B: Zuschlag (oolithischer Kalk). C: Mörtelschicht mit sehr wenig Zuschlag an der Putzoberfläche als Pigmentträger.

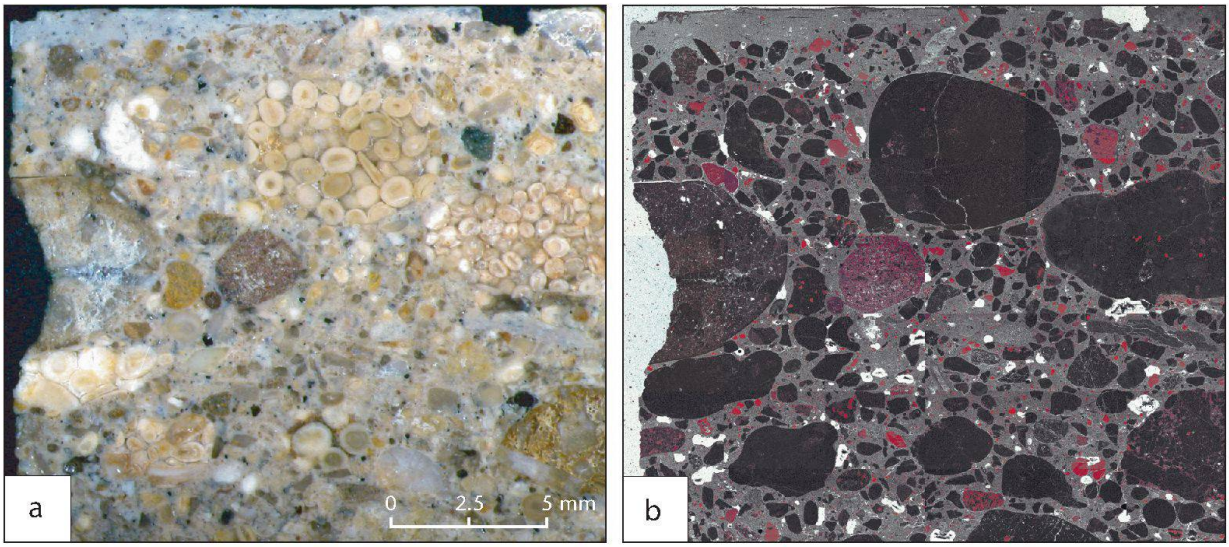


Abb. 28: a) REM-Probe (Anschliff) PB17 unter dem Binokular. – b) Gleiche Probe wie in a), Element Mapping mit REM (Rot = Silizium; Schwarz = Kalzium). Der Ausschnitt ist aus 36 Einzelbildern zusammengesetzt. Der aus Karbonat bestehende Zuschlag erscheint schwarz, das Bindemittel wegen der hohen Porosität heller. Grosse Poren und Löcher im Präparat sind weiss.

die Untersuchung am Rasterelektronenmikroskop (REM) in Kunstharz eingebettet, poliert und mit Grafit beschichtet. Von den Mörteln wurden kleine Bruchstücke (ca. 0,5 cm³) für das Studium der Bindemittelmorphologie mit dem REM abgebrochen und mit Gold beschichtet.

Resultate

Bindemittel: Polarisationsmikroskopie und REM: Das feinkörnige Bindemittel der Putzproben erscheint im Polarisationsmikroskop in der für Luftkalkmörtel typischen hellbeigen Farbe, es wurden keine Anzeichen für einen hydraulischen Anteil des Bindemittels gefunden. Die Morphologie des Bindemittels kommt erst in Rasterelektronenmikroskopie-Bildern detailliert zum Vorschein. In Abbildung 26 ist ein für die untersuchten Putzmörtel typischer Ausschnitt einer angeschliffenen Probe dargestellt. Man erkennt die kleinen Kalzitkristalle (hell) und den dunklen Porenraum, das Bindemittel weist eine hohe Porosität auf[215].

In mehreren Putzen sind an den zerbrochenen Proben oder Anschliffen weisse, kreidige «Knollen» sichtbar (Abb. 27,A). Diese unterscheiden sich vom karbonatischen Zuschlag durch die hellere Farbe und durch ihre deutlich geringere Konsistenz; mit dem Fingernagel lassen sie sich leicht zerreiben. Im Dünnschliff zeigt sich, dass es sich um «Kalkspatzen» handelt, um Bereiche aus reinem Bindemittel ohne

215 Berner in Vorb. D.

Zuschlag. Im Rasterelektronenmikroskop wird deutlich, dass die Morphologie der Kalkspatzen der des umgebenden Bindemittels stark gleicht. Einzelne «Kalkspatzen» erscheinen aber etwas weniger porös als das umgebende Bindemittel.

Bindemittel: Quecksilber-Druckporosimetrie: Die Messungen an den Proben mit Kalkzuschlag führten alle zu vergleichbaren Resultaten, der mittlere Porendurchmesser liegt bei ca. 1 µm[216]. Gemein ist den Putzen auch die hohe offene Porosität.

Bindemittel: EDS-Messungen und Element Mapping: Weil zu wenig Material für AAS-Analysen des Bindemittels vorlag, wurde die chemische Zusammensetzung des Bindemittels mit total ca. 300 EDS-Punktmessungen an den polierten REM-Proben ermittelt. Die gemittelten Messungen im kalkigen Bindemittel der Putze ergaben Al-, Si-, Mg- und Fe-Werte unter einem Prozent. Es handelt sich demnach um Luftkalkmörtel ohne hydraulische Zusätze. Von dieser Zusammensetzung weicht das Bindemittel der Mörtel ab, die fein zerstossene Schamotte enthalten (siehe unten), vor allem die Si-Werte, aber auch Al-Werte sind gegenüber den anderen Mörteln erhöht.

In den neun grossflächigen aus bis zu 100 Einzelbildern bestehenden Ca-Element-Maps der Putzmörtel erscheint der karbonatische Zuschlag (Oolith des Hauptrogenstein) in dunkleren Farbtönen als das Bindemittel. Dies liegt an der hohen Porosität des Bindemittels und dem damit geringeren über die Fläche gemittelten Ca-Gehalt (Abb. 28). In den Element-Maps zeigt sich, dass die Mörtelmatrix teilweise an Silizium angereichert ist. Das Silizium ist aber in Form von klar begrenzten inerten Partikeln, vor allem siltigem Quarz, im Mörtel vorhanden (Abb. 28). Es ist nicht homogen und feinst in der Matrix verteilt, wie dies bei einem hydraulischen Bindemittel zu erwarten wäre.

Zuschlag: Mikroskopie qualitativ: Die mineralogisch-petrografisch-geologische Charakterisierung des Zuschlags in den Referenzputzmörteln erlaubt die Ausscheidung von vier Zuschlagstypen (Abb. 29). Die Verteilung der Typen auf die Referenzmörtel ist in Tabelle 6 verzeichnet.

Gut gerundeter Sand und Feinkies mit oolithischem Doggerkalk (Abb. 29,a)
In der Mehrheit der untersuchten Referenzputzmörtel findet sich gut gerundeter Sand und Feinkies als Zuschlag (Tabelle 6). Die am häufigsten vertretene Komponente ist oolithischer Doggerkalk, im Speziellen Hauptrogenstein; es finden sich auch losgelöste Einzel-Ooide oder Ooid-Bruchstücke und für Jurakalke typische biogene Bestandteile in den Putzschichten. Neben den oolithischen Kalken sind hauptsächlich Jurakalke anderer Lithologien, so u. a. hell- und dunkelgraue, mikritische Kalke vertreten. Sandkörner alpiner Herkunft, vor allem Quarzite, kommen nur vereinzelt vor.

Schamotte (Abb. 29,b)
Die Keramikbruchstücke sind meist schlecht gerundet und weisen unregelmässige Kanten auf; es handelt sich um künstlich gebrochenes Material. Die Fragmente zeigen ein charakteristisches Erscheinungsbild, geprägt durch ihren hohen Anteil an feinem, eckigem, siltigem Quarz. Neben Fragmenten mit Durchmessern von über einem Zentimeter findet sich in einigen Putzschichten auch Ziegelstaub; der Mörtel nimmt dann eine hellziegelrote Farbe an («Ziegelschrotmörtel»). Mörtel mit hohem Ziegelanteil sind: P4, P6, P7 und P14. In P14 wurde der Ziegelbruch rein, in den anderen drei Proben vermengt mit Hauptrogensteinhaltigem Sand verwendet.

Zerstossene Gesteine (Abb. 29,c)
In den Referenzputzproben P18 (PB23) und P8 (PB12) finden sich eckige Kalzitkristalle. Die meisten kleineren Körner (< ~0,5 mm) bestehen aus monokristallinem Kalzit, grössere hingegen aus mehreren Einzelindividuen; es wurden also nicht Kalzit-Einkristalle, sondern es wurde wohl lokaler Kalzit aus Klüften oder Marmor fein zerstossen und mit dem gelöschten Kalk vermischt. In beiden Putzproben folgt die Pigmentschicht direkt oberhalb dieser feinen Mörtelschicht. Es lässt sich am Anschliff und am Dünnschliff beobachten, dass an einigen Stellen die Kristalle von der obersten Mörtel- und Pigmentschicht nicht oder nur ganz dünn bedeckt sind. Beide Proben enthalten ausschliesslich die zerstossenen Gesteine als Zuschlag, dieser ist nicht mit natürlichem Sand vermengt.

Schlecht gerundeter Sand ohne Jurakalke (Abb. 29,d)
In einer einzigen Probe (P20/PB23) weist der als Zuschlag verwendete natürliche Sand eine klar andere Zusammensetzung auf als die Sande vom Typ «gut gerundeter Sand und Feinkies mit oolithischem Doggerkalk». Der Zuschlag enthält keine Jurakalke, sondern ausschliesslich alpines Material.

Speziell sind die Proben P3, P6 und P13. Das kalkige Bindemittel ist mit siltigen Mineralen, hauptsächlich Quarz, durchsetzt. Die anderen Proben weisen diesen feinkörnigen Anteil nicht oder nur in geringem Mass auf. Der Gehalt wurde für jede Putzreferenzschicht abgeschätzt (Tabelle 6). Als Beispiele sind die zwei Extreme mit Bildern gleichen Massstabs abgebildet (Abb. 30). Der Mörtel P13 von der Insula 30 unterscheidet sich auch durch die beigedunkelbraune Farbe klar von den restlichen untersuchten Putzen, das Material ist praktisch frei von grobem, sandigem Zuschlag. Auf einer angeschliffenen Putzfläche von ca. 15 cm² ist nur ein einzelnes, ca. 5 mm grosses Sandkorn sichtbar. Im Dünnschliff zeigt sich, dass die Matrix vor allem aus siltigem Quarz und tonigen Partikeln besteht, aber an einigen Stellen feinkörniges, poröses Karbonat angereichert ist. Die Durchmesser der Minerale bewegen sich in einem engen Bereich, es wurde am REM ein mittlerer Durchmesser von ca. 30 Mikrometer bestimmt. Zwischen den Mineralen finden sich plattige Tonminerale, an einzelnen Stellen ist aber deutlich Karbonat angereichert. Die weissen Einsprenglinge bestehen aus kleinen, bis ca. 2 µm grossen Kalzitkristallen. Auffallend sind hingegen die häufigen hellbeigen bis hellweissen, bis ca. 7 mm grossen Einsprenglinge.

Es konnten in den Mörtelproben auch *organische* Bestandteile nachgewiesen werden, allerdings meist nur in Resten am Rand von Poren. In Probe PB02 (Putzklasse P2) wurden hingegen intakte *Kohlestücke* vorgefunden. Selten konnten Abdrücke von *Halmen* an der Mörteloberfläche beobachtet werden (Putzklasse P2; P3; P7), diese wurden schon von der archäologischen Bearbeiterin, B. Janietz, erkannt und in der Augster Datenbank vermerkt.

216 Berner in Vorb. D.

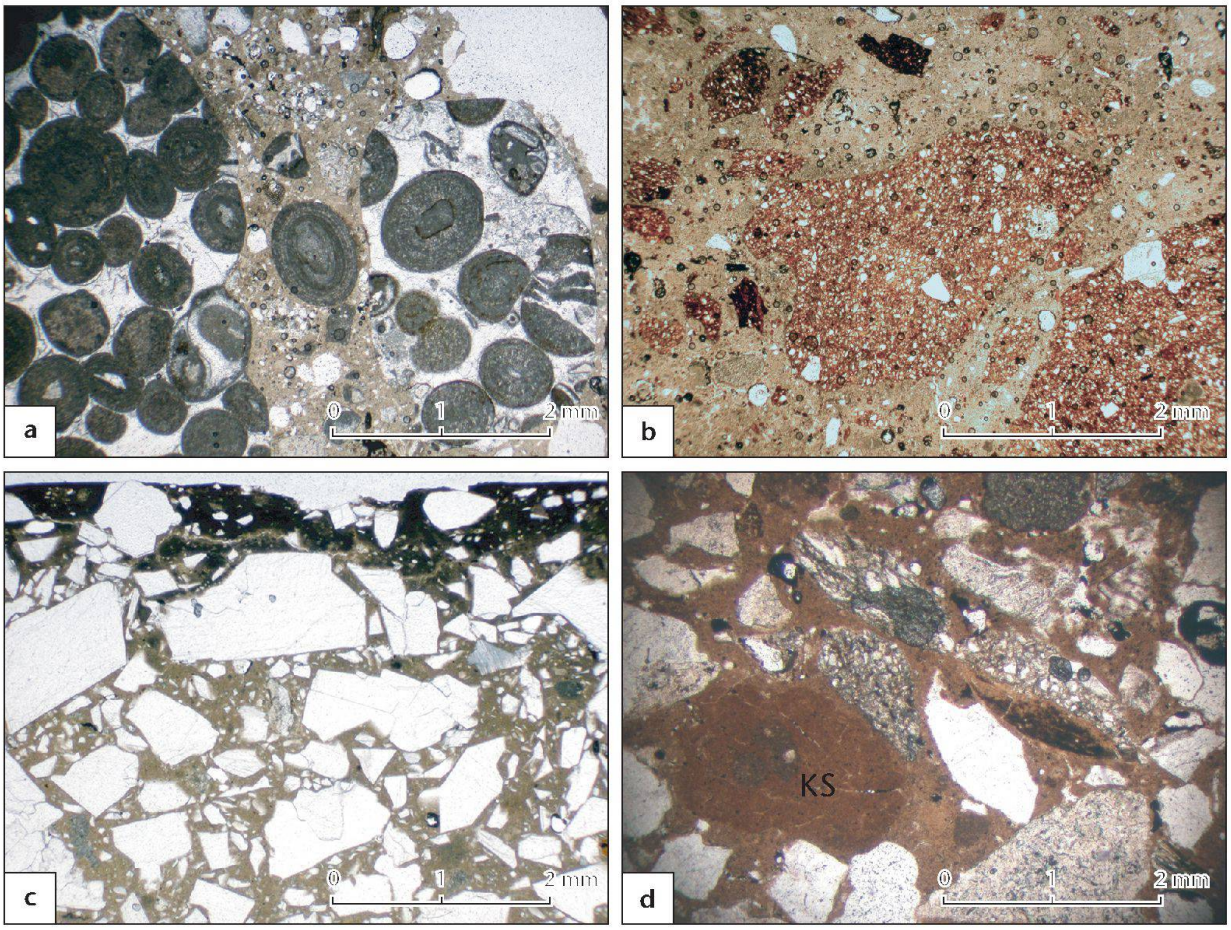


Abb. 29: Vier Typen von Zuschlag in untersuchten Putzmörteln im Dünnschliff: a) Natürlich gerundeter Sand, dominiert durch oolithischen Doggerkalk (P2/PB02). – b) Ziegelbruch (P14/PB25). – c) Eckiger Zuschlag (Kalzit/Marmor) (P18/PB23). – d) Sand, schlecht gerundet, dominiert durch alpines Material, ohne oolithischen Doggerkalk (P20/PB23). KS = Kalkspatz.

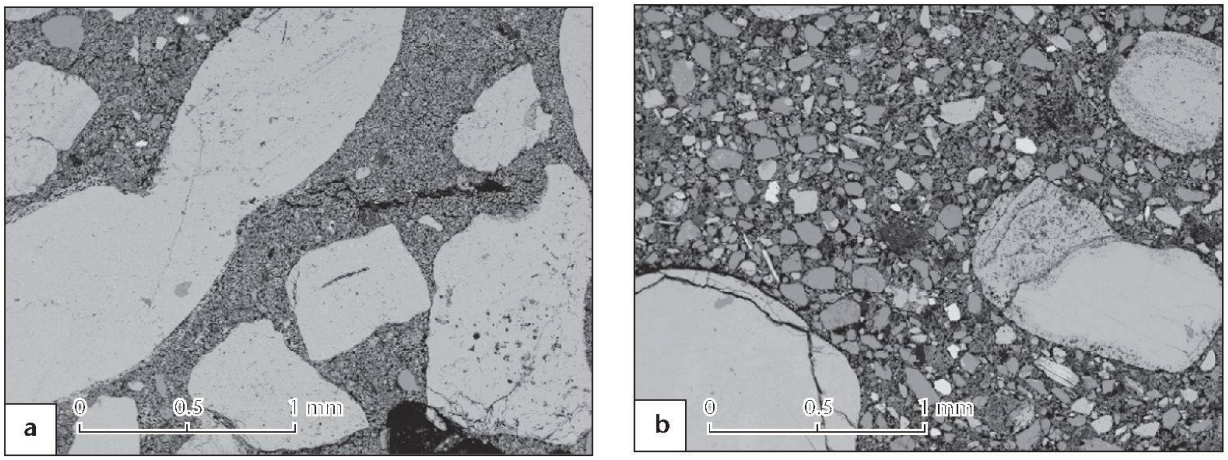


Abb. 30: Zwei Bindemitteltypen im Rasterelektronenmikroskop: a) Putzklasse P2: feinkörniges Bindemittel, praktisch frei von siltigem Zuschlag. Grosse Körner: hauptsächlich oolithischer Kalk. – b) Putzklasse P3: an siltigen Partikeln, vor allem Quarz, angereichertes Bindemittel. Grosse Körner: oolithischer Kalk.

Die Farbe der – unbemalten – Putzschichten wird durch den meist bräunlichbeigen Jurasandzuschlag bestimmt. Die oberste, aufgeraute Mörtelschicht wird in den meisten Fällen durch eine bis ca. 1 mm dicke, praktisch zuschlagslose Schicht überdeckt. Diese erscheint wegen des Fehlens des dunkleren Zuschlags im Anschliff oder an Bruchstücken deutlich heller als die unterliegende Mörtelschicht. So wurde nicht nur ein glatter Malgrund, sondern auch

eine helle, zur Bemalung besser geeignete Oberfläche geschaffen.

Zuschlag: Mikroskopie quantitativ: Die Resultate des Pointcounting sind in Tabelle 6 zusammengefasst. In den Referenzproben mit durch siltige Partikel durchsetztem Bindemittel (P3, P6 und P13) war die Unterscheidung zwischen Bindemittel und Zuschlag nicht immer möglich, daher wurde auf die Zählung verzichtet. Bei den anderen nicht ausgezählten Mörteln war die zur Analyse zur Verfügung stehende Probenoberfläche ungenügend.

Mauermörtel: Theater

Material und Probennahme

Das römische Theater von Augusta Raurica wurde in den Jahren 1992 bis 2007 umfassend saniert (Abb. 31). Diese Gelegenheit wurde genutzt, um die Baugeschichte des Theaters zu erforschen und das Bauwerk detailliert zu dokumentieren[217]. Dabei wurde durch Philippe Rentzel vom Institut für Prähistorische und Naturwissenschaftliche Archäologie (IPNA) der Universität Basel auch Mauermörtel gezielt beprobt. Es standen mir total 26 Mörtelproben, verteilt über alle Bauphasen, zur Untersuchung zur Verfügung (Anhang 5). Von jedem Mörtel lagen ein petrografischer Dünnschliff und Bruchstücke des Materials vor; es wurden zudem polierte REM-Proben hergestellt. Bei den meisten Mörteln lag genügend Material vor, um das Bindemittel anzureichern und es mit AAS zu untersuchen (s. o. S. 221).

Resultate

Bindemittel (chemische Analysen) und XRD: Die Resultate der chemischen Analysen sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Sowohl die Proben < 0,5 mm als auch die Proben < 0,05 mm bilden im Mg/Ca-Diagramm (Abb. 32) je eine relativ enge Punktwolke aus mit je einem oder zwei Ausreissern. In der gleichen Abbildung sind zudem die Resultate der Analyse der Rohmaterialproben aus dem Hauptrogenstein und Muschelkalk dargestellt. Die analysierten Proben aus dem Trigonodusdolomit und der Lettenkohle liegen auf der Gerade A, die Gerade B wurde so gezogen, dass alle analysierten Gesteine des Hauptrogensteins unterhalb der Linie zu liegen kommen.

Für alle AAS-Analysen wurde die gleiche Probenmenge in Säure gelöst. Je näher daher ein Punkt beim Ursprung der Grafik (Abb. 32) zu liegen kommt und damit einen geringeren Gehalt an Kalzium- und Magnesiumkarbonat aufweist, desto höher ist der säureunlösliche, detritische Anteil an der Probe. Der säureunlösliche Anteil ist bei den mit dem 0,05-mm-Sieb gesiebten Mörteln im Mittel deutlich höher als in den mit dem 0,5 mm gesiebten. Die Analysen liegen alle im Bereich zwischen A und B. Das Mörtelbindemittel weist damit ein tieferes Mg/Ca-Verhältnis auf als die Gesteine des Trigonodusdolomits, aber ein höheres Mg/Ca-Verhältnis als das potenzielle Rohmaterial Hauptrogenstein.

Abb. 31: Augst/BL. Theater während der Sanierung.

Das Verhältnis von Mg/Ca des Mörtelbindemittels liegt im Bereich der analysierten Gesteine des Hauptmuschelkalks. Die angereicherte Bindemittelprobe mit dem höchsten Verhältnis von Mg/Ca weist einen tieferen Mg-Gehalt auf als die am stärksten Mg-haltige Probe des Plattenkalks (A3_2).

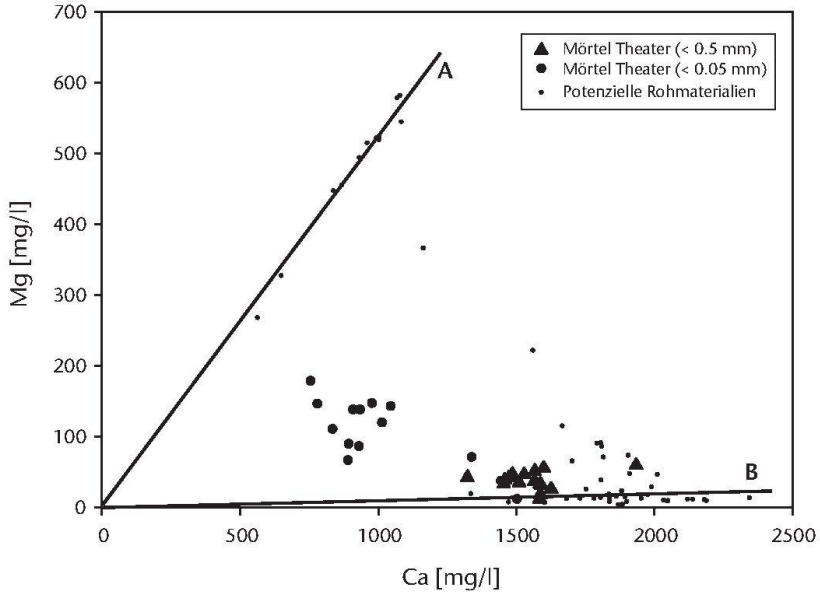
In allen analysierten Pulvern ist die hauptsächlich vertretene Phase Kalzit. Die Siebfraktion < 0,05 mm weist neben Kalzit in allen Fällen einen hohen Gehalt an Quarz auf.

Zuschlag: Mikroskopie qualitativ: Der Zuschlag aller Mörtel wird durch oolithischen Doggerkalk (Hauptrogenstein; Abb. 29,a) dominiert. Die Körner sind angerundet bis gut gerundet. Beim Mörtel T6 herrscht Ziegelbruch vor, dieser ist aber mit Hauptrogenstein-haltigem Sand vermischt.

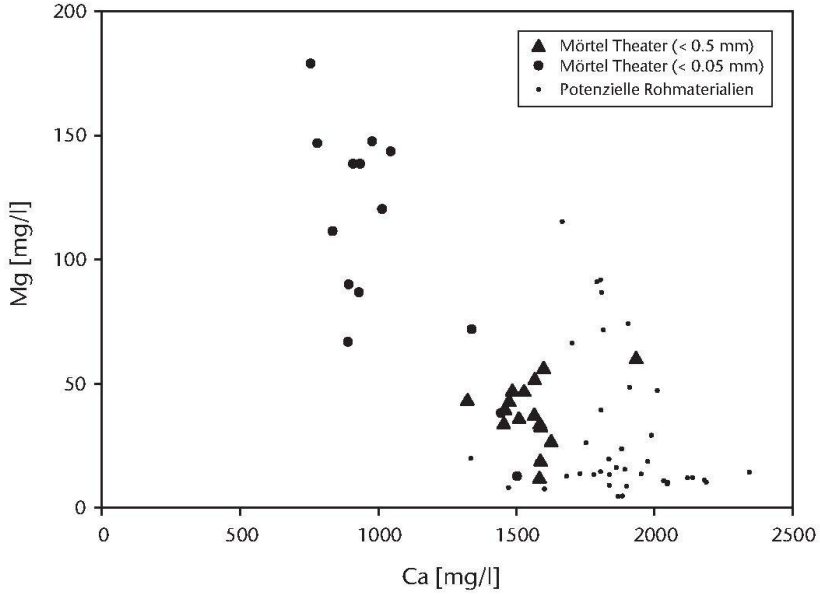
Zuschlag: Mikroskopie quantitativ: Die Resultate des Pointcounting sind in Tabelle 8 zusammengestellt. Nur in zwei Proben (T6, T19) macht der Hauptrogenstein am Zuschlag weniger als 50 % aus, in Probe T6 besteht der Zuschlag hauptsächlich aus Ziegelbruch, in Probe T19 sind andere Jurakalke häufiger als Hauptrogenstein.

REM-Element-Mapping: In Abbildung 33 sind der Anschliff und grossflächige Ca-, Mg- und Si-Maps für einen Theater-Mörtel (T8) dargestellt. Solche REM-Element-Maps lagen von sechs Mörtelproben vor. Es wurde eine Probe ausgewählt, die sowohl den typischen Zuschlag aus oolithischen Doggerkalken (z. B. Abb. 33,A) und einen kleinen «Kalkspatz» (Abb. 33,B) enthält. Die Zuschlagskörner zeichnen sich auf dem Ca-Element-Map des Mörtelfragments gegenüber dem Bindemittel ab. Der aus relativ reinem Kalzit bestehende oolithische Hauptrogenstein erscheint heller als das Binde-

217 Hufschmid/Horisberger-Matter 2008.



◄ *Abb. 32: Mg/Ca-Diagramm der in Säure gelösten «Theater-Mörtel». Es sind zudem Analysen der Gesteinsproben eingezeichnet (feine Punkte). Gerade A: Analysen des Dolomits des Muschelkalks. Gerade B: Die Analysen von Doggerkalken liegen unterhalb der Gerade B.*



mittel, dies wegen der deutlich höheren Porosität des Bindemittels im Vergleich zum Hauptrogenstein und der damit kleineren Konzentration von Kalzium pro Flächeneinheit[218]. Auf dem Mg-Element-Map erscheinen die Hauptrogenstein-Zuschlagskörner dunkel (Abb. 33), das Bindemittel heller. Magnesium ist im Bindemittel gegenüber dem Hauptrogensteinzuschlag also in höherer Konzentration vorhanden. Da im «Kalkspatz» (Abb. 33,B) das Bindemittel nicht mit Zuschlag oder allfällig vorhandenen Zusätzen vermischt ist, kann so gezeigt werden, dass das zu Branntkalk verarbeitete Gestein reicher an Magnesium ist als der Hauptrogenstein. Silizium ist sowohl im Bindemittel als auch im Kalkspatz gegenüber dem Zuschlag aus oolithischem Doggerkalk angereichert (Abb. 33). Deutlich zeichnen sich Quarzkörner (Abb. 33,C) und Zuschlagskörner aus Quarzsandstein ab.

In Abbildung 34 zeichnen sich auf dem polierten Anschliff der «Theater-Mörtel»-Probe T6 deutlich weisse «Kalkspatzen» (A, B), Hauptrogensteinzuschlag (C) und der orange Ziegelzuschlag (D) ab. Auf dem Ca-Element-Map tritt der Ca-reiche, oolithische Hauptrogensteinzuschlag klar hervor. Der Mörtel ist mit Rissen durchzogen, die teilweise mit rekristallisiertem Kalzit gefüllt sind und daher auf dem Ca-Element-Map hell erscheinen. Im Mg-Element-Map tritt der Mg-reiche «Kalkspatz» (A) hervor, schwarz erscheint der Zuschlag aus oolithischem Doggerkalk. Der andere «Kalkspatz»

218 Berner in Vorb. D.

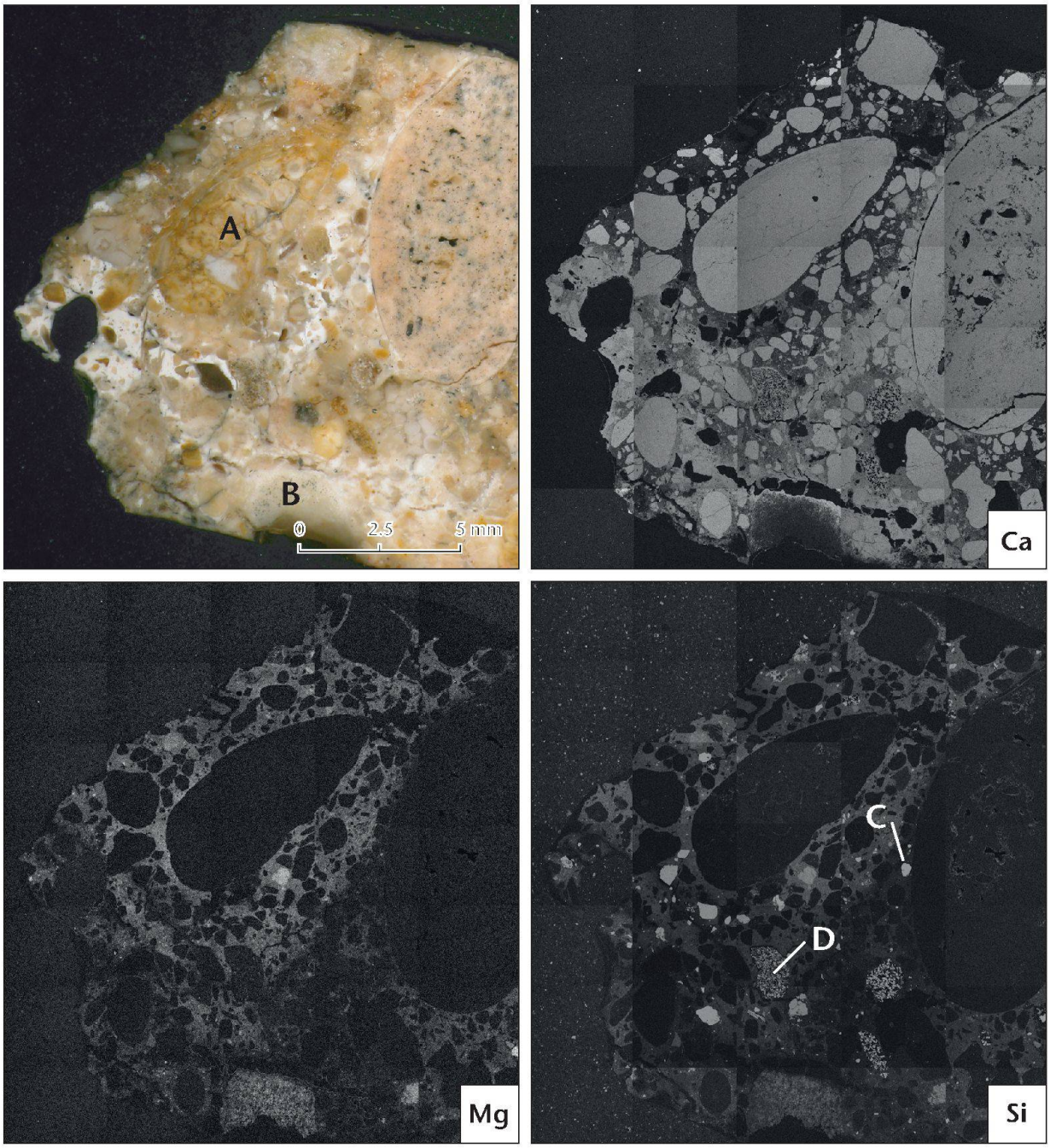


Abb. 33: Ca-Mg-Si-Mapping eines «Theater-Mörtels» (T8). A: Hauptrogenstein, B: Kalkspatz, C: Quarz, D: Quarzsandstein.

weist hingegen keine hohe Mg-Konzentration auf (Abb. 34,B). Das deutet darauf hin, dass im gebrannten Rohmaterial Mg-reiche, aber auch Mg-ärmere Kalke vorhanden waren. Im Si-Element-Map (Abb. 34) zeichnet sich der an siltigem Quarz durchsetzte Schamottzuschlag ab. Feine, eckige, aus den zerstossenen Ziegeln stammende Quarzkörner sind auch in der Bindemittelmatrix zu sehen. Der Hauptrogensteinzuschlag ist ärmer an Silizium als das Bindemittel und ist daher auf dem Si-Element-Map dunkler als das Bindemittel. Die «Kalkspatzen» (A) und (B) weisen hingegen einen ähnlichen Gehalt an Silizium auf wie das restliche Bindemittel.

Mauermörtel und Baureste: Insula 27 (Grabung 2005.054)

Material und Probennahme

In den Jahren 2004 und 2005 wurden im Rahmen einer Notgrabung in der Insula 27 (Abb. 35; 36) die Überreste einer herrschaftlichen Peristylvilla freigelegt[219]. Wegen der Aus-

219 Rychener u. a. 2006, 118–123.

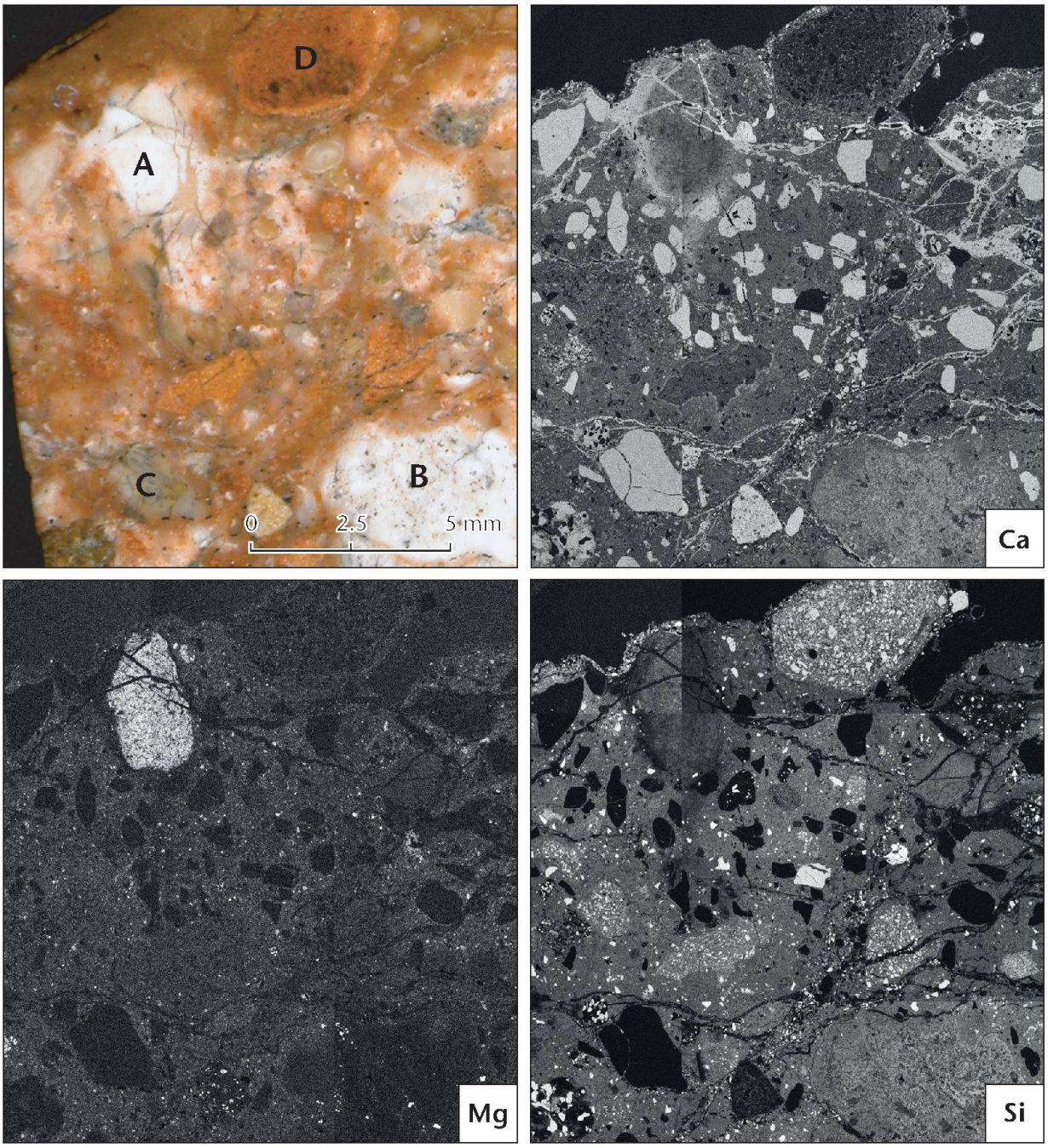


Abb. 34: Ca-Mg-Si-Mapping eines «Theater-Mörtels» (T6). A und B: Kalkspatz, C: Hauptrogenstein, D: Ziegel.

sergewöhnlichkeit der Funde wurde das Areal vom Kanton Basel-Landschaft erworben und kann vielleicht später einmal, wohl unter einem Schutzbau, dem Publikum zugänglich gemacht werden. Bis zur definitiven Konservierung wurde der Befund im August 2005 komplett mit Sand zugedeckt, um die Baureste vor Erosion und Pflanzenbewuchs zu schützen[220]. Die Beprobung erfolgte wenige Tage, bevor die Grabung zugeschüttet wurde.

Es wurden sechs Mörtelproben genommen und untersucht (Abb. 35). Im Innenhof der Villa kam ein gut erhaltenes Wasserbecken (Abb. 35; 36, rechts unten) zum Vorschein. Das Wasserbecken ist mit Ziegelsteinen und Ziegelschrotmörtel gemauert und auf der Innen- und Aussenseite mit Ziegelmörtel verputzt. Der Boden ist mit Ziegelmörtel ausgegossen. Die einst im Innenhof der Villa sichtbaren

220 Offers u. a. 2006.

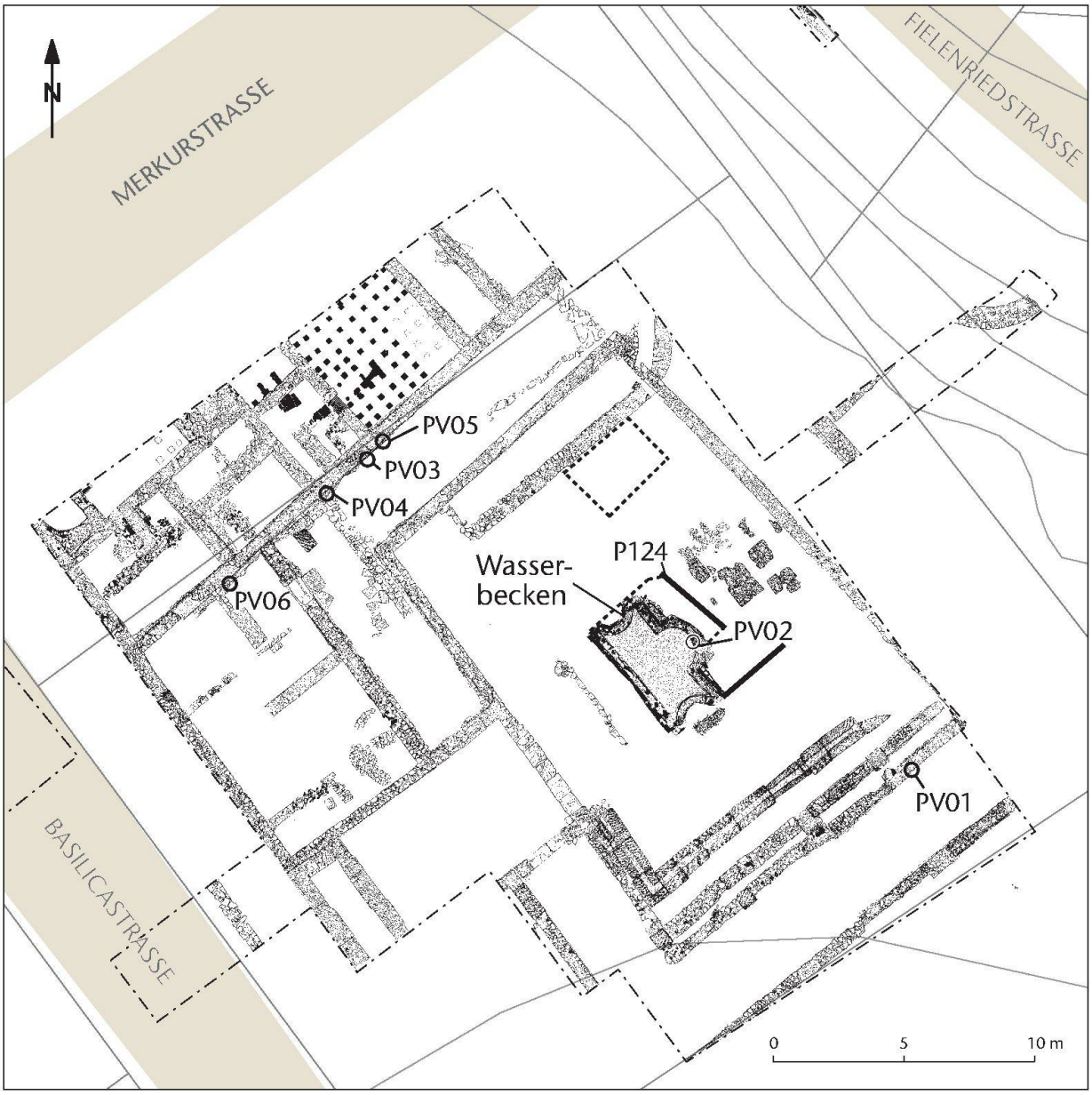


Abb. 35: Augst BL, Insula 27 (Grabung 2005.054). Plan der beprobten Stellen (Grabungsübersicht s. Abb. 36). Bei PV01–PV06 handelt es sich um Mauermörtelproben. Es ist die Lage des Detailprofils P124 (Abb. 37) eingezeichnet. M. 1:250.

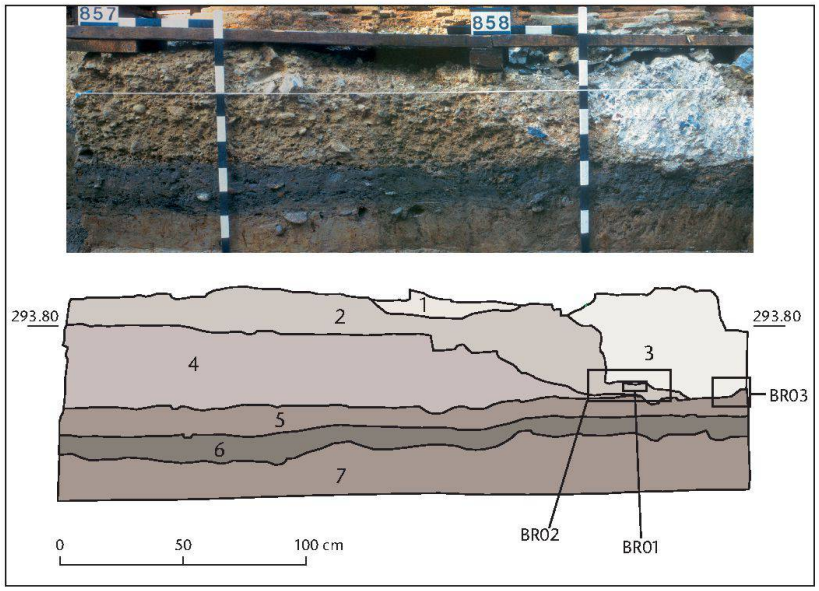
Mauern des Beckens ruhen auf einem Fundament aus Leistenziegeln im oberen Bereich und vor allem aus groben, gebrochenen Kalksteinen im unteren Bereich. Darunter fanden sich an weisslichbeigem Material angereicherte Bereiche, die sich von den umliegenden Schichten durch die helle Farbe gut abheben. Solche allenfalls mit der Mörtelherstellung in Zusammenhang stehende Überreste und wohl an gelöschtem Kalk reiche Schichten kamen auch an anderen Stellen im ehemaligen Innenhof der Villa zum Vorschein.

Es bot sich in dieser Grabung also die Gelegenheit, nicht nur die verarbeiteten Mörtel zu untersuchen, sondern auch Reste des Baugeschehens, im Speziellen der Mörtelbereitung. In einem Sondierschnitt an der vorderen Seite unterhalb des Beckens kam ein ca. 50 × 80 cm grosser, mit beigeweissem Material angereicherter Bereich zum Vorschein (Abb. 35, P124; Abb. 37, Schicht 3). Das helle Material wurde auf Platz als Kalziumkarbonat identifiziert, denn es brauste in verdünnter Salzsäure heftig. Es wurden drei Proben aus dem mit Kalk angereicherten Material entnommen (Abb. 37).

Resultate zum Mauermörtel

Bindemittel (chemische Analysen), XRD, FTIR und Mikroskopie: Die Resultate der Analysen an dem mit Säure gelösten Bindemittel der Mörtel und jene der beprobten Materialien von der Mörtelherstellung mit AAS sind in Tabelle 9 und Abbildung 38 zusammengefasst. Die Mörtel weisen in der

◄ *Abb. 36: Augst BL, Insula 27 (Grabung 2004–2005.054). Die grossflächige Ausgrabung in der Peristylvilla (vgl. den Plan Abb. 35). Blick nach Westen.*



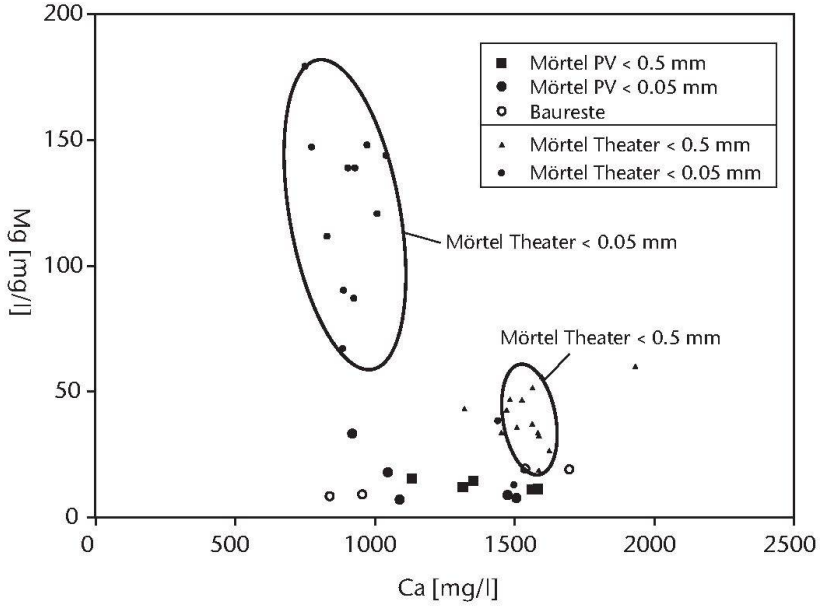
◄ *Abb. 37: Augst/BL, Insula 27 (Grabung 2005.054). Profil P124 (Foto oben mit weisser Kalkanhäufung rechts (Deponie von gelöschtem Mörtel?); unten die Probennahmestellen BR01–BR03. Lage: Abb. 35, P124. M. 1:25.*

Fraktion < 0,5 mm und auch der Fraktion < 0,05 mm nur geringe Magnesium-Gehalte auf. Mit XRD und FTIR konnte im Bindemittel der Mörtel und in den weissen Materialien nur Kalzit nachgewiesen werden.

Im Bindemittel der Mörtel PV01 und PV03–PV06 konnten keine Anzeichen für einen hydraulischen Anteil gefunden werden. Das Bindemittel des Mörtels PV02 ist mit feinen Ziegelbruchstücken und eckigem, siltigem Quarz des Ziegelzuschlags durchsetzt und daher ziegelrot gefärbt. In allen Mörteln wurden Kalkspatzen nachgewiesen. Speziell der Mörtel PV01 ist mit Rissen durchzogen, das Bindemittel ist teilweise stark angelöst und rekristallisiert. Die Risse sind oft mit Kalzit gefüllt.

Zuschlag: Mikroskopie qualitativ: Der Zuschlag der Mörtel wird durch oolithischen Doggerkalk (Hauptrogenstein) domi-

► *Abb. 38: Mg/Ca-Diagramm der in Säure gelösten Mörtelproben. PV: Peristyl-Villa.*



niert. Die Körner sind meist gut gerundet. Beim Mörtel PV01 herrscht Ziegelbruch vor, dieser ist aber mit wenig Hauptrogenstein-haltigem Sand vermischt.

Zuschlag: Mikroskopie quantitativ: Die Resultate des Pointcounting sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Resultate zu den Bauresten

Chemische Analysen: Die Analysen der beprobten kalkigen Materialien fallen mit den Bindemittelanalysen der Mörtel zusammen (Abb. 38), die Materialien sind arm an Magnesium.

Mikroskopie: Das an Kalk angereicherte Material (BR02, Abb. 39) besteht aus gut gerundetem Sand bis Grobkies und einer feinen, beigen bis weissen Matrix. Die Matrix ist mit hellen (Kalk-)Konkretionen durchsetzt. Beim Sand und Kies herrscht gut gerundeter, oolithischer Kalk klar vor (Abb. 39,A). Es fanden sich zudem einige bis ca. 2 cm grosse Kohlestücke und ganz vereinzelte Überreste von Halmen. Es wurden in der beprobten Schicht mehrere, teilweise rötliche, bis 10 cm grosse Fragmente beobachtet. Eines dieser Fragmente ist im Anschliff zu sehen, es hebt sich von den anderen Fragmenten durch die Farbe, aber auch durch die Form ab (Abb. 39,B). Die Oberfläche ist unregelmässig und das Fragment ist schlecht gerundet, es ist durch einen Saum von feinkristallinem, hellweissem Kalzit umgeben. Beim Fragment (Abb. 39,B) handelt es sich um ein unvollständig gebranntes Kalkfragment. Es lassen sich im Material Reste von Ooiden erkennen. Auch in einem Dünnschliff eines anderen unvollständig gebrannten Fragments ist die Morphologie von oolithischem Kalk noch erkennbar.

An einem senkrecht zum abgebildeten Schnitt ausgeführten Anschliff (nicht abgebildet) finden sich mehrere

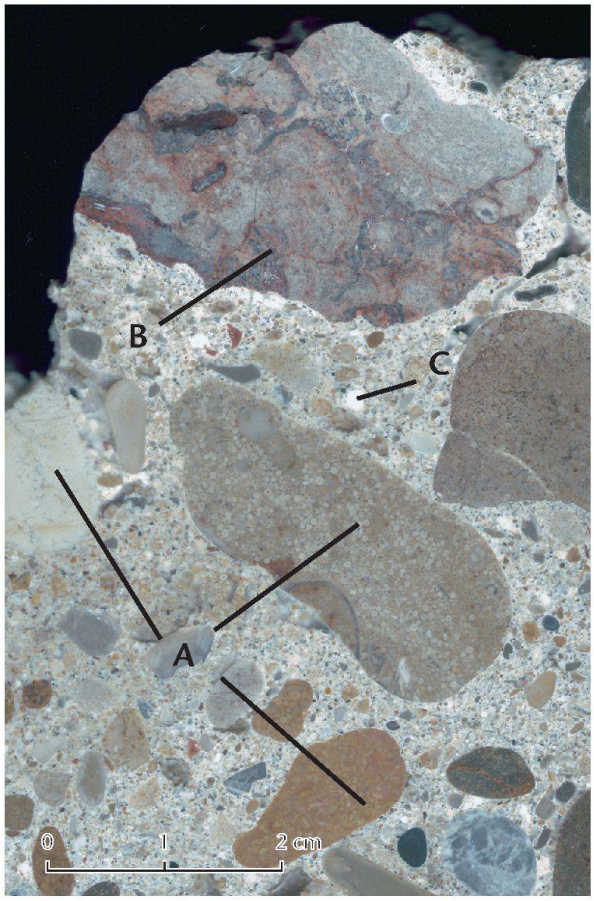
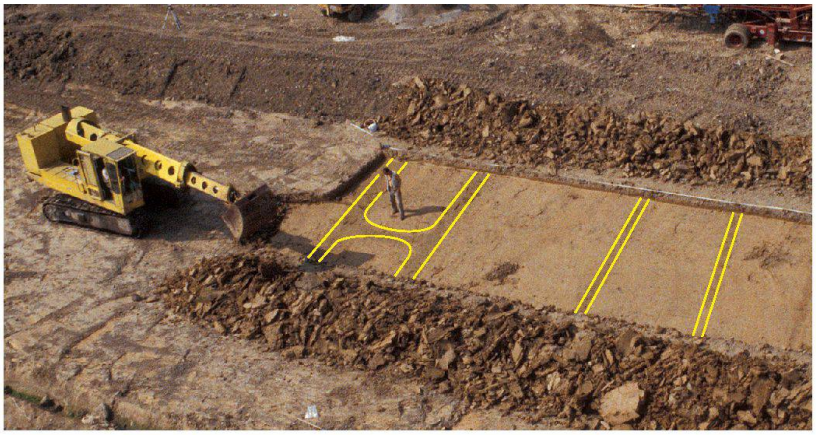


Abb. 39: Anschliff der Probe BR02 (Lage: Abb. 35, Profil P124, siehe auch Anhang 6). A) gut gerundete oolithische Kalkfragmente verschiedener Farbtöne. – B) unvollständig gebranntes Fragment. – C) Kalkspatz (zuschlagsfreies Bindemittel).



◄ *Abb. 40: Kaiseraugst AG, «Im Liner» (Grabung 2000.007). Nur noch als helle Verfärbungen zeichnen sich die Lehmabbaugruben zwischen den dunkleren, stehen gebliebenen Stegen ab. Hier wurde vom 1. bis 4. Jahrhundert sekundär verlagerter Lösslehm in grossem Stil abgebaut.*

grössere (> 1 cm) weisse Kalkkonkretionen, ein kleinerer «Kalkspatz» ist im Anschliff markiert (Abb. 39,C).

Diskussion und Ergebnisse

Putzmörtel

Um die Herkunft der als Zuschlag verwendeten Sande zu ermitteln, wurden die Resultate der Zuschlagsanalysen mit den Analysen der quartären Sedimente verglichen. Der hohe Anteil an oolithischem Kalk entspricht dem vieler der untersuchten lokalen Sedimente. Als Herkunftsgebiet scheiden die Deckenschotter und die Niederterrassenschotter des Rheins aus, da beide einen zu geringen Anteil an Hauptrogenstein aufweisen. Das Korngrössenspektrum des feinkörnigen Anteils des *Zuschlags* ist typisch für die in der Region verbreiteten *Löss*-(Lehm-)Ablagerungen. Der Lössanteil in den Mörteln, zusammen mit der Präsenz von sandigem oolithischem Kalk, deutet darauf hin, dass der verwendete Zuschlag aus einem *sekundär aufgearbeiteten Sediment* stammt. Als mögliches Herkunftsgebiet kommt die Bedeckung der Niederterrasse infrage (Tabelle 11). Das Material wurde wohl in Gruben abgebaut (Abb. 40) und teilweise nicht oder nur geringfügig gewaschen. Beim Zuschlag ohne den Feinanteil könnte es sich um gut gewaschene Sande aus den gleichen Quellen handeln. Der hohe Silt-Anteil in den Ziegelfragmenten der Ziegelmörtel ist typisch für die aus lokalem, Löss-haltigem Lehm hergestellten Augster Ziegel[221].

Die geringen Mg-Werte in den Putzen schliessen die Verwendung von Dolomitgesteinen zur Bindemittelproduktion aus, so auch den direkt in Augst anstehenden Trigonodusdolomit. Auf eine genauere Eingrenzung der Rohstoffquelle wurde bei den Putzmörteln verzichtet, da bei fast allen Putzmörteln zu wenig Material für Bindemittelanalysen mit AAS vorhanden war. Das Auftreten von Kalkspatzen in einigen Putzschichten deutet auf die Verwendung von *trockengelöschtem* Kalk hin. Es ist unklar, ob für Putzschichten, in denen keine Kalkspatzen nachgewiesen wurden, eingesumpfter Kalk verwendet worden ist, oder aber die analysierte Probenmenge zu klein war, um allfällig vorhandene Kalkspatzen feststellen zu können (Tabelle 11).

Es zeigte sich bei den mikroskopischen Analysen an Dünnschliffen und Anschliffen, dass bei den untersuchten Putzen zwei Haupttypen von Zuschlägen zur Anwendung kamen: *lokaler Sand oder zerstossenes, kantiges Material*. Diese zwei Typen lassen sich an den unbearbeiteten Putzmörtelproben auch ohne das Erstellen von Dünnschliffen anhand der Kornformen und der Kornfarben unterscheiden. Der oolithische Hauptrogenstein ist von Auge oder mit einer Lupe (10 ×) gut zu erkennen und kann als Leitgestein verwendet werden, um lokalen «Jurasand» von allfällig verwendetem alpin dominiertem Sand zu unterscheiden. Auch die eckigen, künstlich gebrochenen Materialien – Ziegelbruch und zerstossener Kalzit oder Marmor – lassen sich von Auge an Putzbruchstücken differenzieren.

Die Bindemittel mit verschiedenem Feinanteil unterscheiden sich auch makroskopisch. Erscheint der an siltigem Zuschlag freie Mörtel fast weiss, wird er mit zunehmendem Feinanteil dunkler. Der «Lösslehm»-Mörtel (P13) ist dunkelbraun, die zwei lössreichen Proben (P3 und P6) erscheinen deutlich dunkler als die anderen Mörtel. Es ist also möglich, verschiedene Zuschlagstypen ohne weiterführende Analyse direkt an Putzmörtelproben zu bestimmen und Proben so nach Zuschlagsarten zu klassieren. Für das Bindemittel könnten anstatt Mörtelreferenzproben direkt Farbreferenztabellen, so z. B. Pantone-Farbkarten, verwendet werden.

«Theater-Mörtel»

In den untersuchten «Theater-Mörteln» dominiert oolithischer Doggerkalk als Zuschlag, es handelt sich um ein lokales Sediment (Tabelle 11). Dies gilt für die untersuchten Mauermörtel aller Bauphasen.

221 Ewald u. a. 1997, 42 f.

In den Bindemittel-AAS-Analysen wurden deutlich höhere Mg-Werte gemessen als im potenziellen Rohmaterial Hauptrogenstein. Um abzusichern, dass das Magnesium im Bindemittel der Mörtel angereichert ist und nicht in allfällig bei den Säureaufschlüssen angelöstem dolomitischem Zuschlag, wurden die grossflächigen Ca/Mg-Element-Maps erstellt. Da das potenzielle Rohmaterial Hauptrogenstein in den Mörteln auch als grobkörniger Zuschlag vorliegt, konnten die Mg-Gehalte des Bindemittels direkt mit den Gehalten des Hauptrogensteins verglichen werden. Im Gegensatz zu den AAS-Analysen wird hier zudem auch der säureunlösliche Anteil erfasst. Es zeigt sich, dass die Mg-Gehalte des Bindemittels gegenüber dem Zuschlag, so auch dem Hauptrogenstein deutlich erhöht sind. Wenn man von der Annahme ausgeht, dass dem gebrannten Kalk keine Zusätze beigegeben wurden und das gebrannte Rohmaterial unbearbeitet nach dem Brennen und Löschen verwendet wurde, scheidet der Hauptrogenstein als Rohstoffquelle für die Bindemittelproduktion der «Theater-Mörtel» aus. Diese Hypothese wird dadurch gestützt, dass auch Kalkspatzen in den «Theater-Mörteln» reich an Magnesium sind.

Das Bindemittel aller untersuchten Proben weist hingegen zu wenig Magnesium auf, um aus lokalem Muschelkalkdolomit gebrannt zu sein, ausser wenn Kalzium künstlich bei der Bindemittelproduktion angereichert wurde. Als wahrscheinlichstes Rohmaterial kommt daher der um Augst anstehende *Platten- und Trochitenkalk* infrage (Tabelle 11). Dass die Ca- und Mg-Werte aller Analysen so nahe beieinander liegen, zeigt auf, dass über die verschiedenen Bauphasen ein ähnliches oder gar gleiches Gestein als Rohmaterial verwendet wurde. Die starke Präsenz von Kalkspatzen im Bindemittel deutet zudem darauf hin, dass für die Mörtelproduktion *trockengelöschter Kalk* verwendet wurde (Tabelle 11).

Mauermörtel und Baureste in der Insula 27 (Grabung 2005.054)

Das Bindemittel der Mauermörtel der Grabung 2005.054 unterscheidet sich von demjenigen der «Theater-Mörtel»: Die grobe und vor allem die feine Siebfraktion sind ärmer an Magnesium. Nur Probe PV01 zeigt eine leichte Anreicherung von Magnesium in der feinen Siebfraktion. Dolomit als Rohmaterial für die Bindemittelproduktion kann ausgeschlossen werden, auch die Verwendung des an Magnesium reichen oberen Plattenkalks für die Bindemittelherstellung ist unwahrscheinlich (Tabelle 11). Die starke Präsenz von Kalkspatzen im Bindemittel deutet zudem darauf hin, dass für die Mörtelproduktion trockengelöschter Kalk verwendet wurde.

Der durch Jurakalkkörner (hauptsächlich Hauptrogenstein) dominierte grobe Anteil der Proben ist lokalen Ursprungs. Die untersuchten hellen Materialien (Baureste) sind arm an Magnesium, daher kann die Verwendung von Dolomit ausgeschlossen werden. Da sowohl «Kalkspatzen», Kohle und unvollständig gebrannte Fragmente vorhanden sind, handelt es sich um *trockengelöschten Kalk*. Kalk aus einer Sumpfgrube ist mit grosser Wahrscheinlichkeit auszuschliessen. Unvollständig gebrannte Fragmente würden an den Grund der Sumpfgrube sinken und damit auf natürliche Weise aussortiert, zudem ist auch die Anwesenheit von Kohlefragmenten inmitten einer Sumpfgrube äusserst unwahrscheinlich. Es könnte sich um die Reste eines Mörtellösch- und/oder -mischplatzes handeln[222]. Die Präsenz von Resten von Ooiden in zwei unvollständig gebrannten Fragmenten legt die Verwendung eines aus oolithischem Kalk gebrannten Materials zur Mörtelproduktion nahe. Da die Proben zudem arm an Magnesium sind, kommt *Hauptrogenstein* als Rohmaterialquelle infrage (Tabelle 11).

Resultate und Empfehlungen zur Mörtelanwendung in der Denkmalpflege und Ruinenrestaurierung

Portlandzement oder Kalkmörtel?

Reparatur- und Restaurierungsarbeiten an Kalkmörtel-Mauerwerk historischer Bauwerke wurden in der Vergangenheit oft mit Portlandzementmörtel durchgeführt. Die Verwendung dieses harten, spröden und wenig porösen Materials in Verbindung mit dem relativ weichen und meist stark porösen alten Kalkmörtel trug manchmal eher zur Zerstörung der historischen Bausubstanz bei als zu deren Erhaltung. Heute besteht daher im Bereich der Denkmalpflege vermehrt der Wunsch, das altbewährte, mit der vorhandenen Bausubstanz kompatiblere Baumaterial *Kalkmörtel* zu verwenden.

Kalkmörtel setzt sich aus Bindemittel und Zuschlag, der oft aus natürlichem Sand und Kies besteht, zusammen. Zur Herstellung des Bindemittels wird Kalkstein bei mindestens 900° C gebrannt; dabei zersetzt sich Kalziumkarbonat ($CaCO_3$) in festen *Branntkalk* (CaO) und gasförmiges Kohlenstoffdioxid (CO_2). Der Branntkalk wird anschliessend mit Wasser versetzt, es bildet sich bei der stark exothermen Reaktion *gelöschter Kalk* ($Ca(OH)_2$). Der mit Zuschlag und allenfalls Wasser vermengte gelöschte Kalk wird in plastischem Zustand verarbeitet und härtet durch *Austrocknen* und später in einem langwierigen Prozess unter *Aufnahme von Kohlenstoffdioxid* aus der Umgebungsluft aus; es bildet sich dabei wieder Kalziumkarbonat.

Nicht nur die verwendeten Rohstoffe und deren Mischverhältnis, sondern auch die *Verarbeitung* der Materialien haben einen grossen Einfluss auf die *Qualität* und die *Dauerhaftigkeit* eines Kalkmörtels. So sind z. B. die beim Kalklöschen zugegebene Wassermenge, die Art und Geschwindigkeit der Wasserzugabe, aber auch die allenfalls anschliessende *Lagerungsdauer* des Produkts vor der Ver-

222 Vgl. Hufschmid 1998, 97.

arbeitung wichtige Parameter. In älterer Literatur wird empfohlen, Kalk nach dem Brennen und Löschen vor dem Gebrauch möglichst lange «einzusumpfen». Unter *Einsumpfen* versteht man die Lagerung des Kalkbreis unter Luftabschluss durch ständige Wasserbedeckung (Abb. 6).

Kalkspatzen und Trockenlöschen

Römischer Kalkmörtel ist für seine Widerstandsfähigkeit und Dauerhaftigkeit bekannt, schliesslich sind Mauer- und Putzmörtel von fast 2000 Jahre alten Bauwerken bis heute noch gut erhalten. Wurde in römischer Zeit der gelöschte Kalk also über sehr lange Zeit eingesumpft?

Resultate naturwissenschaftlicher Untersuchungen neueren Datums an römischen Mörteln, auch an Kalkmörtel aus Augusta Raurica in der vorliegenden Arbeit, deuten darauf hin, dass wohl vor allem zu Mauermörtel verarbeiteter gelöschter Kalk nicht eingesumpft, sondern *direkt* nach dem Löschen oder nach nur kurzer Liegezeit verwendet wurde. Als Beweis dafür werden weisse, kreideartige Einschlüsse hinzugezogen, die sich in historischen Kalkmörteln finden, so auch in römischen Mauer- und Putzmörteln an Bauwerken in Augusta Raurica. Es wird vermutet, dass diese sogenannten *Kalkspatzen* beim Löschen des Branntkalks nur mit wenig Löschwasser («Trockenlöschen») ohne anschliessendes Einsumpfen entstehen. Um die Bildung der Kalkspatzen besser zu verstehen und damit die These des «Nichteinsumpfens» zu sichern, wurden potenzielle historische Trockenlöschtechniken im Rahmen dieser Arbeit experimentell nachgestellt:

Methode 1: Stückiger Branntkalk wird in einen Korb gefüllt und dieser unter Wasser getaucht. Schnell saugt der poröse Branntkalk Wasser auf. Nach einigen Sekunden wird der Korb dann aus dem Wasser gezogen, der Branntkalk löscht anschliessend dank des in den Poren enthaltenen Wassers. Durch die frei werdende Energie bei der stark exothermen Reaktion erhitzt sich das Material. Bei den praktischen Experimenten wurde eine maximale Temperatur von 480° C im Zentrum des Korbs gemessen. Es resultierte ein vollständig trockener, grösstenteils feinkörniger, staubiger, gelöschter Kalk, durchsetzt aber mit bis ca. Zentimeter grossen weissen, kreidigen Konkretionen, den Kalkspatzen.

Methode 2: Branntkalk wird mit dem Zuschlagsmaterial (Sand) aufgeschichtet und mit Wasser besprengt. Auch bei den praktischen Experimenten mit diesem Verfahren erhitzte sich das Material stark, und ein gleiches Produkt, wie unter «Methode 1» beschrieben, resultierte.

Vorteile des trockengelöschten gegenüber dem eingesumpften Kalkmörtel

Die Produktion von grösseren Mengen an gelöschtem Kalk mit solchen oder ähnlichen Trockenlöschtechniken ist viel weniger aufwendig, als gelöschten Kalk Monate oder gar Jahre vor der Anwendung einzusumpfen. Das Kalklöschen kann zudem direkt auf dem Bauplatz, kurz vor der Verwendung durchgeführt werden. Es ist daher naheliegend, dass in römischer Zeit möglichst trockengelöschter Kalk verarbeitet wurde. Jahrelang unter Wasser gelagerter Kalk kam wohl nur für Spezialanwendungen zum Einsatz. Resultate neuerer Arbeiten zeigen zudem, dass trockengelöschter Kalk mit Kalkspatzen auch qualitative Vorteile bieten kann: Die resultierenden Mörtel sind unter anderem reicher an Bindemittel als aus eingesumpftem Kalk hergestellte Mörtel. Die Kalkspatzen wirken als Reservoir von leicht löslichem Karbonat. Kalkspatzenmörtel haben daher eine gewisse *«Selbstheilungseigenschaft»* – aus Kalkspatzen gelöstes Karbonat kann in im Mörtel entstandenen Rissen auskristallisieren und diese so füllen. Von der hohen Qualität solcher Mörtel zeugt aber nicht zuletzt auch die gute Erhaltung von alten Kalkspatzenmörteln. Das Baumaterial Kalkspatzenmörtel ist daher auch für dauerhafte Reparatur- und Restaurierungsarbeiten in der Denkmalpflege in Betracht zu ziehen.

Literatur

Abell u. a. 1999: A. B. Abell/K. L. Willis/D. A. Lange, Mercury Intrusion Porosimetry and Image Analysis of Cement-Based Materials. Journal of Colloid and Interface Science 211, 1999, 39–44.

Adam 1964: K. D. Adam, Die Grossgliederung des Pleistozäns in Mitteleuropa. Stuttgarter Beitr. Natkde. 132, 1964.

Adriano u. a. 2008: P. Adriano/A. Santos Silva/M. R. Veiga/J. Mirão/A. E. Candeias, The importance of SEM-EDS analysis in the study of old mortars. Microscopy and Microanalysis 14, 2008, 57–60.

Albrecht 1989: H. Albrecht, Die Brandschicht der Holzbauten des Forums von Augst: Spuren einer Feuerstelle oder einer Brandkatastrophe? Jahresber. Augst u. Kaiseraugst 10, 1989, 331–345.

Allenbach 2001: R. P. Allenbach, Synsedimentary tectonics in an epicontinental sea: A new interpretation of the Oxfordian basins of northern Switzerland (Basel 2001).

Althaus 1994: E. Althaus, Kalkbrennen, Baukalk und Kalkmörtel. In: G. Precht (Hrsg.), Xantener Berichte: Grabung – Forschung – Präsentation 5 (Köln 1994) 17–32.

Anastasiou u. a. 2006: M. Anastasiou/Th. Hasapis/T. Zorba/E. Pavlidou/K. Chrissafis/K. M. Paraskevopoulos, TG-DTA and FTIR analyses of plasters from Byzantine monuments in Balkan region. Comparative study. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 84/1, 2006, 27–32.

Arnold u. a. 1979: A. Arnold/O. Emmenegger/W. Fietz/A. Knoepfli/E. Witzig, Sumpfkalk-Grubenkalk/La chaux éteinte en fosse/Calce spenta. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Denkmalpflege, Merkblatt 2. Separatdruck aus: Schweizer Bauwirtschaft 60; 63, Dez. 1978 (Zürich 1979) 1–7.

Asal 2007: M. Asal (mit Beitr. v. S. Bujard/E. Broillet-Ramjoué/M. Fuchs [Pictoria]/G. Breuer), Insula 36. Die Entwicklung einer Häuserfront in Augusta Raurica. Forsch. Augst 38 (Augst 2007).

Ashurst 1990: J. Ashurst, Mortars for Stone Buildings. In: J. Ashurst/F. G. Dimes (Hrsg.), Conservation of Building and Decorative Arts 2 (London 1990) 78–96.

Bakolas u. a. 1995: A. Bakolas/G. Biscontin/A. Moropoulou/E. Zendri, Characterization of the lumps in the mortars of historic masonry. Thermochimica Acta 269/270, 1995, 809–816.

Baradez 1957: J. Baradez, Nouvelles fouilles à Tipasa: Les fours à chaux des constructeurs de l'enceinte. Libyca 5, 1957, 277–294.

Bauzeitung 1854: Untersuchungen über die Art und Weise, wie die Römer den Kalk zubereiteten, dessen sie sich bei ihren Bauten bedienten, und über die Komposizion und Anwendung ihrer Mörtel. Notizblatt der Allgemeinen Bauzeitung 3/4 (Wien 1854) 77–93.

Béarat u. a. 1997: H. Béarat/M. Fuchs/M. Maggetti/D. Paunier, Roman Wall Painting. Materials, Techniques, Analysis and Conservation. Proceedings of the International Workshop, Fribourg 7–9 March 1996 (Freiburg 1997).

Berner in Vorb. A: P. Berner, White lumps in artisan lime mortars: An experimental approach (in Vorbereitung).

Berner in Vorb. B: P. Berner, Artisan dry slaking: replication experiments of historical techniques (in Vorbereitung).

Berner in Vorb. C: P. Berner, Segmentation algorithm for pores, binder and aggregates of lime plaster containing carbonate aggregate (in Vorbereitung).

Berner in Vorb. D: P. Berner, SEM Image analysis and mercury intrusion porosimetry on lime plaster (in Vorbereitung).

Bitterli-Brunner u. a. 1984: P. Bitterli-Brunner/H. Fischer/H. Herzog, Geologischer Atlas der Schweiz, 1:25000, Blatt 1067 Arlesheim (1984).

Bitterli-Brunner 1987: P. Bitterli-Brunner, Geologischer Führer der Region Basel (Basel 1987).

Bitterli-Brunner/Fischer 1988: P. Bitterli-Brunner/H. Fischer, Geologischer Atlas der Schweiz, 1:25 000, Blatt 1067 Arlesheim, Erläuterungen (1988).

Bitterli-Waldvogel 1995: T. Bitterli-Waldvogel, Der Kalkofen. Bulletin IVS 95/2, 1995, 33–36.

Bläuer Böhm/Jägers 1997: Ch. Bläuer Böhm/E. Jägers, Analysis and recognition of dolomitic lime mortars. In: Béarat u. a. 1997, 223–235.

Bosch/Schmid 1952: R. Bosch/E. Schmid, Ein römischer Köhlerplatz bei Küttingen (Aargau). Die Naturwissenschaft hilft der Urgeschichte. Ur-Schweiz 16, 1952, 55–57.

Bossart u. a. 2006: J. Bossart/P. Koch/A. Lawrence/S. Straumann/I. Winet/P.-A. Schwarz (Schriftleitung), Zur Einwohnerzahl von Augusta Raurica. Jahresber. Augst u. Kaiseraugst 27, 2006, 67–108.

Bossert-Radtke 1992: C. Bossert-Radtke, Die figürlichen Rundskulpturen und Reliefs aus Augst und Kaiseraugst. Forsch. Augst 16 (Augst 1992).

Böttger 1997: K. G. Böttger, Mörtel für die Erhaltung historischer Kalkputze: Haftmörtel, Hinterfüllmörtel und Kalkputze (Berlin 1997).

Bruni u. a. 1997: S. Bruni/F. Cariati/P. Fermo/P. Cairati/G. Alessandrini/L. Toniolo, White lumps in fifth- to seventeenth-century AD mortars from northern Italy. Archaeometry 39/1, 1997, 1–7.

Burkhalter 1996: R. M. Burkhalter, Die Passwang-Alloformation (unteres Aalénien bis unteres Bajocien) im zentralen und nördlichen Schweizer Jura. Eclogae Geol. Helv. 89, 1996, 875–934.

Butenuth u. a. 1993: G. Butenuth/M. L. Frey/R. Gotthardt/W. Kasig, Branntkalkeigenschaften und Kalksteingenese. Zement – Kalk – Gips International 1993/7, 395.

Cazalla u. a. 2000: O. Cazalla/C. Rodriguez-Navarro/E. Sebastian/G. Cultrone/M. J. De la Torre, Aging of Lime Putty: Effects on Traditional Lime Mortar Carbonation. Journal American Ceramic Soc. 83/5, 2000, 1070–1076.

Carò/Di Giulio 2004: F. Carò/A. Di Giulio, Reliability of textural analysis of ancient plasters and mortars through automated image analysis. Materials Characterization 53/2–4, 2004, 243–257.

Carò u. a. 2006: F. Carò/A. Di Giulio/R. Marmo, Textural analysis of ancient plasters and mortars: Reliability of image analysis approaches. In: M. Magetti (Hrsg.), Geomaterials in cultural heritage. Geological Society Special Publications 257 (London 2006) 337–345.

Cato agr.: M. Porcius Cato, De agricultura/Vom Landbau. Herausgegeben von O. Schönberger (München 1980).

Clareboets 1994: C. Clareboets, Topochronologie von Augusta Raurica in antiker und nachantiker Zeit: Zum Verlauf der Ergolz und des Ruschenbächlis. Jahresber. Augst u. Kaiseraugst 15, 1994, 239–252.

Diamond 1998: S. Diamond, Concrete porosity revisited. In: M. Cohen u. a. (Hrsg.), Materials Science of Concrete. The Sidney Diamond Symposium (Westerville 1998) 3–23.

Diamond 2000: S: Diamond, Mercury porosimetry: An inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials. Cement and Concrete Research 30, 2000, 1517–1525.

DIN EN 459-1: Baukalk – Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien; Deutsche Fassung (2002-02).

Disler 1914: C. Disler, Stratigraphie und Tektonik des Rotliegenden und der Trias beiderseits des Rheines zwischen Rheinfelden und Augst. Verhand. Naturforsch. Ges. Basel 25, 1914, 1–96.

Disler 1931: C. Disler, Geologie des Bezirks Rheinfelden und der angrenzenden Gebiete. Vom Jura zum Schwarzwald, Sonderh. 6 (Rheinfelden 1931).

Dix 1973: B. Dix, The Production of Lime and its Applications in the Roman World (BA Diss., University of London 1973).

Dix 1979: B. Dix, Roman lime-burning. Britannia 10, 1979, 261–262.

Dix 1982: B. Dix, The manufacture of lime and its uses in the western Roman provinces. Oxford Journal Arch. 1/3, 1982, 331–345.

Drexler 1928: F. Drexler, Mörteluntersuchungen von Ausgrabungen eines Römerkastells in Altrip am Rhein. Tonindustrie-Zeitung 13, 1928, 227 f.

Elert u. a. 2002: K. Elert/O. Cazalla/C. Rodriguez/E. Hansen/E. Sebastian, Über das Einsumpfen von Kalk. Warum sind historische Kalkmörtel so unterschiedlich erhalten? Restauro 108/7, 2002, 502–508.

Elsen 2004: J. Elsen, Characterisation of Binder Related Particles (lime lumps) in Historic Lime Mortars. In: M. Pecchio (Hrsg.), Applied Mineralogy. 8th International Congress on Applied Mineralogy (Sao Paulo 2004) 347–349.

Ewald u. a. 1997: J. Ewald/M. Hartmann/Ph. Rentzel, Die Römische Wasserleitung von Liestal nach Augst. Arch. u. Mus. 36 (Liestal 1997).

Fäh u. a. 2006: D. Fäh/S. Steinem/I. Oprsal/J. Ripperger/J. Wässner/R. Schatzmann/P. Kästli/I. Spottke/P. Huggenberger, The earthquake of 250 A.D. in Augusta Raurica, A real event with a 3D site-effect? Journal of Seismology 10, 2006, 459–477 (DOI 10.1007/s10950-006-9031-1).

Flügel 2004: E. Flügel, Microfacies of carbonate rocks: Analysis, interpretation and application (Berlin 2004).

Folk 1968: R. L. Folk, Petrology of Sedimentary Rocks (Austin 1968).

Frank 1977: G. Frank, Einfluss der Löschbedingungen auf die Qualität des gebildeten Calciumhydroxids beim Nasslöschen von Kalk. Zement – Kalk – Gips International 1977/1, 34.

Frei 1912: R. Frei, Untersuchungen über den Schweizerischen Deckenschotter. Beitr. Geol. Karte Schweiz, N. F. 37 (Bern 1912).

Frey 1998: M. L. Frey, Zusammenhänge zwischen Branntkalk- und Kalkstein-Eigenschaften. Aachener Geowiss. Beitr. 29 (Aachen 1998).

Friedman 1958: G. M. Friedman, Determination of Sieve-Size Distribution from Thin-Section Data for Sedimentary Petrological Studies. Journal Geol. 66, 1958, 394–416.

Furger 1985: A. R. Furger, Augst, 6 v. Chr.: Dendrodaten und Fundhorizonte. Jahresber. Augst u. Kaiseraugst 5, 1985, 123–146.

Furger 1988: A. R. Furger, Die Grabungen von 1986/1987 an der Nordwestecke des Augster Theaters. Jahresber. Augst u. Kaiseraugst 9, 1988, 47–166.

Furlan/Bissegger 1975: V. Furlan/P. Bissegger, Les mortiers anciens. Histoire et essais d'analyse scientifique. Zeitschr. Schweizer. Arch. u. Kunstgesch. 32, 1975, 166–178.

Furlan/Houst 1980: V. Furlan/Y. Houst, Les matériaux pouzzolaniques et leur utilisation. Chantiers (Suisse) 11/7, 1980, 29–32.

Gadsden 1975: J. A. Gadsden, Infrared Spectra of Minerals and Related Inorganic Compounds (London 1975).

Gerster-Giambonini 1978: A. Gerster-Giambonini, Ein römischer Steinbruch bei Dittingen. Helv. Arch. 33, 1978, 67–69.

Gonzalez 1993: R. Gonzalez, Die Hauptrogenstein-Formation der Nordwestschweiz. Dissertationen aus dem Geologisch-Paläontologischen Institut der Universität Basel 2 (Basel 1993).

Gonzalez 1994: R. Gonzalez, Response of shallow-marine carbonate facies to third-order and high-frequency sea-level fluctuations: Hauptrogenstein Formation, northern Switzerland. Sedimentary Geol. 102, 1996, 111–130.

Gonzalez/Wetzel 1996: R. Gonzalez/A. Wetzel, Stratigraphy and paleogeography of the Hauptrogenstein and Klingnau Formations (middle Bajocian to late Bathonian), northern Switzerland. Eclogae Geol. Helv. 89, 1996, 695–720.

Graeser 1994: S. Graeser, Kalk- (resp. Dolomit-)Brennerei im Binntal oder: Wo ist das Magnesium geblieben? Minaria Helv. 14a, 1994, 46–52.

Graul 1962: H. Graul, Die Niederterrassenfelder im Umkreis von Basel. Eiszeitalter u. Gegenwart 13, 1962, 181–196.

Grezet u. a. 2010: C. Grezet/M. Spring/S. Waddington, Die Abnobastrasse/Silberschatzgasse – eine Industriestrasse? In: C. Grezet u. a., Ausgrabungen in Kaiseraugst im Jahre 2009. Jahresber. Augst u. Kaiseraugst 31, 2010, 141–183 bes. 150 (in diesem Band).

Gürler u. a. 1987: B. Gürler/L. Hauber/M. Schwander, Die Geologie der Umgebung von Basel mit Hinweisen über die Nutzungsmöglichkeiten der Erdwärme. Beitr. Geol. Karte Schweiz, N. F. 160 (Bern 1987).

Gutzwiller 1894: A. Gutzwiller, Die Diluvialbildungen der Umgebung von Basel. Verhand. Naturforsch. Ges. Basel 10, 1894, 576–587.

Gutzwiller 1912: A. Gutzwiller, Die Gliederung der diluvialen Schotter in der Umgebung von Basel. Verhand. Naturforsch. Ges. Basel 23, 1912, 57–75.

Hecht/Tauber 1998: Y. Hecht/J. Tauber, Das Hinterland von Augusta Raurica in römischer Zeit. In: J. Ewald/J. Tauber (Hrsg.), Tatort Vergangenheit. Ergebnisse aus der Archäologie heute (Basel 1998) 429–456.

Hjulström 1935: F. Hjulström, Studies of the Morphological Activities of Rivers as illustrated by the River Fyris. Bull. Geol. Inst. Univ. Uppsala 25 (Uppsala 1935) 221–527.

Hochleitner 2002: B. Hochleitner, Identifizierung und Charakterisierung von historischen Farbpigmenten mit Hilfe von Röntgendiffraktometrie (XRD), Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und Fouriertransformierter Infrarotspektroskopie (FTIR). Dissertation, Technische Universität Wien (Wien 2002).

Hufschmid 1998: Th. Hufschmid (mit einem Beitr. v. M. Horisberger), Das römische Theater von Augst. Sanierungs- und Forschungsarbeiten 1997. Jahresber. Augst u. Kaiseraugst 19, 1998, 93–110.

Hufschmid/Horisberger-Matter 2008: Th. Hufschmid/I. Horisberger-Matter, *«Ipsius autem theatri conformatio sic est facienda ...»*. 16 Jahre Forschung und Restaurierung im römischen Theater von Augst. Jahresber. Augst u. Kaiseraugst 29, 2008, 161–225.

Imesch 1989: B. Imesch, Der Kalkofen von Eischoll. Unpubl. Manuskript (1989).

Isler u. a. 1984: A. Isler/F. Pasquer/M. Huber, Geologische Karte der zentralen Nordschweiz, 1:100 000 (mit angrenzenden Gebieten von Baden-Württemberg). Geologische Spezialkarten 121 (1984).

Janietz 2003: B. Janietz, Bemalter Verputz aus der Augster Insula 3: Ein Altfund des Jahres 1917 aus der Grabung in der ehemaligen Kiesgrube auf Kastelen (1917.51). Zur Konstruktion von Rapportmustern in der römischen Wandmalerei. Jahresber. Augst u. Kaiseraugst 24, 2003, 225–258.

Jank u. a. 2006: M. Jank/Ch. A. Meyer/A. Wetzel, Late Oxfordian to Late Kimmeridgian carbonate deposits of NW Switzerland (Swiss Jura): Stratigraphical and palaeogeographical implications in the transition area between the Paris Basin and the Tethys. Sedimentary Geol. 186, 2006, 237–263.

Jedrzejewska 1960: H. Jedrzejewska, Old mortars in Poland: A new method of investigation. Stud. Conservation 5, 1960, 132–137.

Jenny 1995: G. Jenny, Kalkofen – Wiederinstandsetzung. Minaria Helv. 15b, 1995, 49 f.

Kantiranis u. a. 2005: N. Kantiranis/A. Filippidis/A. Tsirambides/B. Christaras, Thermal decomposition study of crystalline limestone using P-wave velocity. Construction and Building Materials 19/5, 2005, 359–365.

Kraus u. a. 1989: K. Kraus/S. Wisser/D. Knöfel, Über das Löschen von Kalk vor der Mitte des 18. Jahrhunderts – Literaturauswertung und Laborversuche. Arbeitsbl. Restauratoren 22/1, 1989, 206–221.

Kühn 1985: H. Kühn, Naturwissenschaftliche Untersuchung von Leonardos «Abendmahl» in Santa Maria delle Grazie in Mailand. Maltechnik Restauro 91/4, 1985, 24–51.

Lange u. a. 1994: D. A. Lange/H. M. Jennings/S. P. Shah, Image analysis techniques for characterization of pore structure of cement-based materials. Cement and Concrete Research 24, 1994, 841–853.

Laur-Belart 1965: R. Laur-Belart, Verwaltungsbericht für das Jahr 1964. Römerhaus u. Mus. Augst. Jahresber. 1964, 20–32.

Leeman 1995: S. Leeman, Pore size distributions in hardened cement paste by SEM image analysis. In: S. Diamond u. a. (Hrsg.), Microstructure of Cement Based Systems/Bonding and Interfaces in Cementitious Materials. Proc. Materials Research Soc. Symposium 370 (Pittsburgh 1995) 217–226.

Legodi u. a. 2001: A. Legodi/D. de Waal/J. H. Potgieter, Quantitative Determination of $CaCO_3$ in Cement Blends by FT-IR. Applied Spectroscopy 55, 2001, 361–365.

Leuthardt 1923: F. Leuthardt, Glazialablagerungen aus der Umgebung von Liestal. Mitt. Naturforsch. Ges. beider Basel 6, 1923, 92–117.

Malinowski/Garfinkel 1991: R. Malinowski/Y. Garfinkel, Prehistory of Concrete. Concrete International 13/3, 1991, 62–68.

Merki 1961: P. J. Merki, Der obere Muschelkalk im östlichen Schweizer Jura. Eclog. Geol. Helv. 54/1, 1961, 137–219.

Mett 2004: M. Mett, Trass – Seine Vorkommen und Eigenschaften. Unpublizierte Diplomarbeit (München 2004).

Meyer 2001: M. Meyer, Die Geologie des Adlertunnels. Bull. Angewandte Geol. 6/2, 2001, 199–208.

Moorehead 1986: D. R. Moorehead, Cementation by the Carbonation of Hydrated Lime. Cement and Concrete Research 16, 1986, 700–708.

Moropoulou u. a. 2001: A. Moropoulou/A. Bakolas/E. Aggelakopoulou, The effects of limestone characteristics and calcination temperature to the reactivity of the quicklime. Cement and Concrete Research 31, 2001, 633–639.

Müller 1983: U. Müller, Römische Abbauspuren im Muschelkalk von Kaiseraugst. Minaria Helv. 3, 1983, 49–61.

Müller/Rentzel 1994: U. Müller/Ph. Rentzel, Ein weiterer römischer Steinbruch in Kaiseraugst. Jahresber. Augst u. Kaiseraugst 15, 1994, 177–186.

Müller u. a. 1984: W. H. Müller/M. Huber/A. Isler/P. Kleboth, Erläuterungen zur Geologischen Karte der zentralen Nordschweiz. Geologische Spezialkarten 121 (Bern 1984).

Nagra 2002: Nagra, Technischer Bericht NTB 02-03. Projekt Opalinuston. Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse (Wettingen 2002).

Nenninger 2001: M. Nenninger, Die Römer und der Wald. Untersuchungen zum Umgang mit einem Naturraum am Beispiel der römischen Nordwestprovinzen. Geogr. Hist. 16 (Stuttgart 2001).

Ney 1986: P. Ney, Gesteinsaufbereitung im Labor (Stuttgart 1986).

Oates 1998: J. H. Oates, Lime and Limestone Chemistry and Technology, Production and Uses (Weinheim 1998).

Offers u. a. 2006: D. F. Offers/B. Pfäffli/A. R. Furger, Das «reburial» der Insula 27. Die Zuschüttung der Grabungsbefunde mit Sand als Erhaltungsmassnahme bis zur späteren Präsentation in einem Schutzbau. Jahresber. Augst u. Kaiseraugst 27, 2006, 189–194.

Ortega u. a. 2008: L. Ortega/M. C. Zuluaga/A. Alonso-Olazabal/M. Insausti/A. Ibanez, Geochemical characterization of archaeological lime mortars: Provenance Inputs. Archaeometry 50/3, 2008, 387–408.

Paama u. a. 1998: L. Paama/I. Pitkänen/H. Rönkkömäki/P. Perämäki, Thermal and infrared spectroscopic characterization of historical mortars. Thermochimica Acta 320, 1998, 127–133.

Penck/Brückner 1909: A. Penck/E. Brückner, Die Alpen im Eiszeitalter (Leipzig 1909).

Plinius nat.: C. Plinius Secundus d. Ä., Naturalis historia/Naturkunde. Herausgegeben und übersetzt von R. König (Darmstadt 2007).

Potgieter u. a. 2002: J. H. Potgieter/S. S. Potgieter/S. J. Moja/A. Mulaba-Bafubiandi, An empirical study of factors influencing lime slaking. Part I: production and storage conditions. Minerals Engineering 15/3, 2002, 201–203.

Potgieter u. a. 2003: J. H. Potgieter/S. S. Potgieter/D. de Waal, An empirical study of factors influencing lime slaking. Part II: lime constituents and water composition. Water SA 29/2, 2003, 157–160.

de Quervain 1969: F. de Quervain, Die nutzbaren Gesteine der Schweiz (Bern 1969[3]).

Reedy 1994: Ch. L. Reedy, Thin-section petrography in studies of cultural materials. Journal Am. Inst. Conservation 33, 1994, 115–129.

Rentzel 1994: Ph. Rentzel, Bemerkungen zu einem römischen Steinbruch beim Kastell Kaiseraugst. Minaria Helv. 14a, 1994, 39–45.

Rentzel 1997: Ph. Rentzel, Geologisch-bodenkundliche Untersuchungen an den Niederterrassenfeldern bei Basel unter besonderer Berücksichtigung der spätlatènezeitlichen Fundstelle Basel-Gasfabrik. Jahresber. Arch. Bodenforsch. Kanton Basel-Stadt 1994, 1997, 31–52.

Rentzel 1998: Ph. Rentzel, Antike Steingewinnung im Hochrheintal. In: R. Ebersbach u. a. (Hrsg.), MILLE FIORI. Festschr. L. Berger. Forsch. Augst 25 (Augst 1998) 185–191.

Ritter/Drake 1945: H. L. Ritter/L. C. Drake, Pore-Size Distribution in Porous Materials. Pressure porosimeter and determination of complete macropore size distributions. Industrial and Engineering Chemistry, Analytical Edition 17, 1945, 782–787.

Rodriguez-Navarro u. a. 2002: C. Rodriguez-Navarro/O. Cazalla/K. Elert/E. Sebastian, Liesegang pattern development in carbonating traditional lime mortars. Proc. Royal Soc. A 458, 2002, 2261–2273.

Rollefson 1990: G.O. Rollefson, The Uses of Plaster at Neolithic 'Ain Ghazal, Jordan. Archaeomaterials 4, 1990, 33–54.

Rübner/Hoffmann 2006: K. Rübner/D. Hoffmann, Characterization of Mineral Building Materials by Mercury-Intrusion Porosimetry. Particle & Particle Systems Characterization 23/1, 2006, 20–28.

Rübner u. a. 2001: K. Rübner/Th. Fritz/F. Jacobs, Ringversuch zur Quecksilberporosimetrie an Zementmörtel (Bremerhaven 2001).

Rychener u. a. 2006: J. Rychener/B. Pfäffli/M. Schaub, Ausgrabungen in Augst im Jahre 2005. Jahresber. Augst u. Kaiseraugst 27, 2006, 109–134.

Scheidegger 1994: F. Scheidegger, Aus der Geschichte der Bautechnik. Band 1: Grundlagen (Basel 1994).

Schlütter u. a. 2001: F. Schlütter/H. Juling/G. Hilbert, Mikroskopische Untersuchungsmethoden in der Analytik historischer Putze und Mörtel. In: A. Boué, Historische Fassadenputze. Erhaltung und Rekonstruktion (Stuttgart 2001) 45–87.

Schmassmann 1945: H. Schmassmann, Stratigraphie des mittleren Doggers der Nordschweiz (Liestal 1945).

Schmassmann 1970: H. Schmassmann, Geologie, Klima und Gewässer von Liestal. In: F. Klaus u. a., Heimatkunde von Liestal (Liestal 1970) 15–37.

Silva u. a. 2005: D. A. Silva/H. R. Wenk/P. J. M. Monteiro, Comparative investigation of mortars from Roman Colosseum and cistern. Thermochimica Acta 438, 2005, 35–40.

Sölter 1970: W. Sölter, Römische Kalkbrenner im Rheinland. Kunst und Altertum am Rhein 31 (Düsseldorf 1970).

Strübin 1901: K. Strübin, Beiträge zur Kenntnis der Stratigraphie des Basler Tafeljura. Speziell des Gebietes von Kartenblatt 28, Kaiseraugst (Siegfriedatlas) (Basel 1901).

Suter 1971: P. Suter, Beiträge zur Landschaftskunde des Ergolzgebietes. Quell. u. Forsch. Gesch. u. Landeskde. Baselland 12 (Liestal 1971[2]).

Trümpy 1980: R. Trümpy, Geology of Switzerland. A guide-book (Basel 1980).

Tucker 1985: M. E. Tucker, Einführung in die Sedimentpetrologie (Stuttgart 1985).

Uschmann 1992: K. U. Uschmann, Die trichterförmig eingetieften Brenngruben im Raum zwischen Weser und Oder in der Zeit vom 3. Jh. v. Chr. bis zum 4. Jh. n. Chr. Ethnogr.-Arch. Zeitschr. 33/3, 1992, 317–326.

Uschmann 2006: K. U. Uschmann, Kalkbrennöfen der Eisen- und römischen Kaiserzeit zwischen Weser und Weichsel. Befunde – Analysen – Experimente. Berliner Arch. Forsch. 3 (Rahden/Westf. 2006).

Verderber 1992: R. Verderber, Quartärgeologische Untersuchungen im Hochrheingebiet zwischen Schaffhausen und Basel (Freiburg i. Br. 1992).

Vitruv: M. Vitruvius Pollio: De Architectura Libri Decem/Zehn Bücher über Architektur. Übersetzt und mit Anmerkungen versehen von C. Fensterbusch (Darmstadt 2008[6]).

Vosseler 1947: P. Vosseler, Einführung in die Geologie der Umgebung von Basel in 12 Exkursionen (Basel 1947).

Wang 1995: Y. Wang, Microstructural study of hardened cement paste by backscatter electron microscopy and image analysis. PhD thesis Purdue University (West Lafayette 1995).

Washburn 1921: E. W. Washburn, The Dynamics of Capillary Flow. Physical Rev. 17, 1921, 273–283.

Webb 2001: P. A. Webb, An introduction to the physical characterization of materials by mercury intrusion porosimetry with emphasis on reduction and presentation of experimental data. Micromeritics Instrument Corp. (Norcross, Georgia 2001).

Wedepohl 1970: K. H. Wedepohl, Geochemische Daten von sedimentären Karbonaten und Karbonatgesteinen in ihrem faziellen und petrogenetischen Aussagewert. Verhand. Geol. Bundesanstalt 4 (Wien 1970) 692–705.

Werner/Lange 1999: A. M. Werner/D. A. Lange, Quantitative image analysis of masonry mortar microstructure. Journal of Computing in Civil Engineering 13, 1999, 110–115.

Winnefeld u. a. 2001: F. Winnefeld/K. G. Böttger/D. Knöfel, Historische Kalkmörtel. Restaurierungsmörtel für die Torhalle Lorsch. Restauro 107/1, 2001, 40–45.

Wisser/Knöfel 1988: S. Wisser/D. Knöfel, Untersuchungen an historischen Putz- und Mauermörteln. Teil 2: Untersuchungen und Ergebnisse. Bautenschutz + Bausanierung 11, 1988, 163–171.

Wittmann 1961: O. Wittmann, Die Niederterrassenfelder im Umkreis von Basel und ihre kartographische Darstellung. Basler Beitr. Geogr. u. Ethn. 3 (Basel 1961).

Wittmann 1973: O. Wittmann, Römerbad und Burg in Badenweiler im Vergleich mit Augusta Raurica (Landschaft-Baugrund-Baustoffe). Basler Geogr. H. 4, 1973, 30–68.

Wuhrer 1953: J. Wuhrer, Physikalisch-chemische Untersuchungen über den Zustand des Branntkalkes und die Vorgänge und Einflüsse beim Brennen. Zement-Kalk-Gips International 1953/10, 354–368.

Yang/Buenfeld 2001: R. Yang/N. R. Buenfeld, Binary segmentation of aggregate in SEM image analysis of concrete. Cement and Concrete Research 31, 2001, 437–441.

Abbildungsnachweis

Abb. 1; 13; 15; 16; 20–23; 25; 32; 38:
Grafiken Peter Berner.

Abb. 2; 12; 14; 19:
Karten Peter Berner.

Abb. 3:
Plan Michael Vock nach Vorlage Peter Berner.

Abb. 4:
A; C; D: Fotos Ausgrabungen Augst/Kaiseraugst, Grabung 1965.005; B: Profil-Zeichnung 1965.005; Zusammenstellung und Ergänzungen Michael Vock.

Abb. 5:
Foto Peter Berner.

Abb. 6:
Foto Ausgrabungen Augst/Kaiseraugst (1964.053-2482).

Abb. 7; 11; 24; 26–30; 33; 34; 39:
Aufnahmen Peter Berner.

Abb. 8:
Nach Bitterli-Brunner 1987, Abb. 5; 14; Ergänzungen Peter Berner.

Abb. 9:
Nach Isler u. a. 1984; Bitterli-Brunner u. a. 1984; Zusammenstellung Peter Berner.

Abb. 10:
Foto Ausgrabungen Augst/Kaiseraugst, Grabung Kaiseraugst-Mühlegasse 2008.003.

Abb. 17:
Nach Verderber 1992, Tabelle 1.

Abb. 18a:
Nach Disler 1931; Rentzel 1997; Verderber 1992; Wittmann 1961; Zusammenstellung Peter Berner.

Abb. 18b:
Nach Verderber 1992, Abb. 10.
Abb. 31:
Luftaufnahme Peter Berner (16.06.2004).
Abb. 35:
Plan Ausgrabungen Augst/Kaiseraugst, Grabung 2005.054; Ergänzungen Michael Vock.
Abb. 36:
Luftaufnahme Augusta Raurica, Beat Zimmermann (2004).
Abb. 37:
Foto oben: Ausgrabungen Augst/Kaiseraugst, Grabung 2005.054; unten: Profilumzeichnung Peter Berner; Zusammenstellung und Ergänzungen Michael Vock.

Abb. 40:
Foto Lukas Grolimund, Ausgrabungen Augst/Kaiseraugst, Grabung 2000.007; Ergänzungen Michael Vock.

Tabellen 1–11:
Peter Berner.

Anhang 1:
Nach Merki 1961, Tafel 5.
Anhang 2–5:
Peter Berner.

Tabelle 1: Einteilung von Weisskalk und Dolomitkalk gemäss DIN EN 459-1. [% M.] = Massenprozent.

Bezeichnung nach DIN EN 459-1: 2002-02	Kurzzeichen	CaO + MgO [% M.]	MgO [% M.]	CO_2 [% M.]	SO_3 [% M.]
Weisskalk 90	CL 90	≥ 90	≤ 5	≤ 4	≤ 2
Weisskalk 80	CL 80	≥ 80	≤ 5	≤ 7	≤ 2
Weisskalk 70	CL 70	≥ 70	≤ 5	≤ 12	≤ 2
Dolomitkalk 85	DL 85	≥ 85	≥ 30	≤ 7	≤ 2
Dolomitkalk 80	DL 80	≥ 30	> 5	≤ 7	≤ 2

Tabelle 2: Einteilung der hydraulischen Mörtel gemäss DIN EN 459-1. [% M.] = Massenprozent.

Bezeichnung nach DIN EN 459-1: 2002-02	Kurzzeichen	SO_3 [% M.]	Freier Kalk [% M.]	Druckfestigkeit 7 Tage $ß_D$ (7d) [MPa]	Druckfestigkeit 28 Tage $ß_D$ (28d) [MPa]
Hydraulischer Kalk 2	HL 2	≤ 3	≥ 8	-	2 – 7
Hydraulischer Kalk 3,5	HL 3,5	≤ 3	≥ 6	-	3,5 – 10
Hydraulischer Kalk 5	HL 5	≤ 3	≥ 3	≥ 2	5 – 15
Natürlicher hydraulischer Kalk 2	NHL 2	≤ 3	≥ 15	-	2 – 7
Natürlicher hydraulischer Kalk 3,5	NHL 3,5	≤ 3	≥ 9	-	3,5 – 10
Natürlicher hydraulischer Kalk 5	NHL 5	≤ 3	≥ 3	≥ 2	5 – 15

Tabelle 3: Beprobte Aufschlüsse und zugehörige Literatur. N° = Name des Aufschlusses.

N°	Lokalität	Anzahl Proben	Schweizer Koordinaten	Literatur
A1	Ergolzufer bei «Tempelhof»	6	620940 / 264690	Strübin 1901, 23 Profil 5; Disler 1914, 74 Profil XIV; Merki 1961, 110 Profil 54
A2	Ergolzschlaufe	8	621150 / 264580	Strübin 1901, 15 Profil 2; Disler 1914, 68 Profil XIII; Merki 1961, 110 Profil 53
A3	Talhof, E-Giebenach	8	623960 / 264020	Merki 1961, 100 Profil 56
A4	Wyhlen	5	619350 / 266590	Merki 1961, 110 Profil 51
A5	Wyhlen	8	619550 / 266580	Merki 1961, 110 Profil 51
A6	Lausen	5	624630 / 257480	Schmassmann 1945, 94 Profil 29; s. a. S. 107 Profile 36 und 37
A7	Liestal	9	622210 / 258050	Schmassmann 1945, 98 Profil 32
A8	Lausen	5	624820 / 257620	Gonzalez 1993, Anhang A Profil 40; s. a. Bitterli-Brunner 1987, 204
A9	Dittingen	2	603940 / 253010	

Tabelle 4: Analysen der Gesteinsproben mit AAS. Die Analysennummer (An.-Nr.) setzt sich aus dem Aufschlussnamen und der Probennummer zusammen.

An.-Nr.	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Fe [mg/l]	Sr [mg/l]
A1_1	nicht analysiert				
A1_2	834.7	447.2	1.794	20.39	0.141
A1_3	558.1	268.5	1.8	10.2	0.120
A1_4	644.7	327.4	1.119	9.397	0.247
A1_5	1988	29.17	0.496	1.75	0.591
A1_6	1001	523.2	2.102	10.13	0.179
A2_0	991.1	521.7	0.885	7.354	0.322
A2_1	1064	578.1	1.119	8.373	0.281
A2_2	1080	544.7	0.885	5.53	0.348
A2_3	864.6	455.4	0.489	4.59	0.203
A2_4	927.5	494.5	1.482	5.901	0.172
A2_5	1074	581.7	0.517	6.292	0.256
A2_6	956.6	515	0.522	5.399	0.253
A2_7	998.1	519.1	0.566	5.914	0.294
A3_1	1903	74.02	0.475	2.457	0.549
A3_2	1160	366.4	0.649	5.131	0.289
A3_3	1975	18.6	0.446	2.598	0.939
A3_4	1909	48.46	0.398	1.138	0.871
A3_5	1891	15.41	0.32	1.139	1.143
A3_6	1951	13.52	0.372	1.171	1.263
A3_7	2009	47.1	0.51	2.014	0.422
A3_8	1558	222.4	0.69	3.621	0.202
A4_1	1805	39.19	0.709	2.043	0.598
A4_2	1879	23.66	0.374	1.518	0.753
A4_3	1469	8.047	0.278	1.286	0.256
A4_4	1665	115.3	0.538	3.008	0.849
A4_5	1803	91.76	0.463	2.396	0.610
A5_1	1814	71.54	0.506	1.975	0.947
A5_2	1807	86.79	0.705	2.311	0.934
A5_3	1835	8.881	0.398	1.933	0.507
A5_4	1789	90.95	0.283	2.135	0.775
A5_5	1750	26.16	0.229	1.495	1.033
A5_6	1860	16.05	0.328	1.605	0.597
A5_7	1834	19.43	0.234	1.47	0.672
A5_8	1700	66.37	0.449	1.749	0.493
A6_1	1836	13.21	1.153	5.894	1.605
A6_2	2119	11.93	1.36	7.176	1.040
A6_3	2137	12.06	1.391	9.123	1.711
A6_4	2187	10.2	1.387	9.229	1.108
A6_5	2180	11.12	1.375	8.225	1.614
A7_1	2343	14.19	0.715	2.757	1.215
A7_2	1600	7.419	0.671	2.989	1.163
A7_3	2032	10.75	0.65	3.746	1.522
A7_4	1899	8.568	0.634	3.846	1.354
A7_5	nicht analysiert				
A7_6	2045	9.47	0.649	4.209	1.010
A7_7	nicht analysiert				
A7_8	1680	12.63	0.68	3.398	1.504
A7_9	2048	10.06	0.551	3.274	1.306
A8_1	1804	14.42	0.423	3.756	1.595
A8_2	1729	13.63	0.387	3.123	1.387
A8_3	1780	13.23	0.323	2.599	1.405
A8_4	1575	18.68	0.518	3.588	1.890
A8_5	1333	19.81	0.533	5.744	1.457
A9_1	1867	4.449	0.216	0.783	0.276
A9_2	1883	4.646	0.16	0.876	0.267

Tabelle 5 siehe S. 256.
Tabelle 6 siehe S. 257.

Tabelle 7: Analysen der Theaterproben mit AAS. Das Bindemittel wurde mit einem Separationsverfahren angereichert und in zwei Korngrössenfraktionen (< 0.05 mm und < 0.5 mm) separiert (siehe Kapitel Methodik) und getrennt analysiert.

Nummer	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Fe [mg/l]	Sr [mg/l]
T1 < 0.05	993.2	101.5	1.856	26.55	0.608
T3 < 0.05	830.7	111.4	1.634	28.12	0.469
T4 < 0.05	886.8	66.86	1.082	17.49	0.232
T7 < 0.05	890.2	90.2	1.055	19.08	0.463
T8 < 0.05	905.7	138.6	1.335	26.85	0.362
T9 < 0.05	974.3	147.7	1.439	25	0.311
T10 < 0.05	1336	71.88	1.247	14.51	0.496
T12 < 0.05	1042	143.6	1.347	28.66	0.263
T13 < 0.05	930.8	138.6	1.361	24.16	0.330
T14 < 0.05	1500	12.61	0.841	6.783	0.450
T16 < 0.05	1442	38.11	0.788	10.91	0.317
T17 < 0.05	751.7	179	1.317	25.56	0.359
T18 < 0.05	775.8	146.9	1.489	31.25	0.236
T22 < 0.05	1010	120.4	1.083	27.33	0.337
T23 < 0.05	926.8	86.77	1.598	30.6	0.371
T1 < 0.5	1624	26.27	1.047	8.107	0.856
T3 < 0.5	1508	35.54	1.049	9.953	0.801
T4 < 0.5	1320	42.91	0.99	12.01	0.536
T7 < 0.5	1456	39.26	0.924	10.23	0.730
T8 < 0.5	1587	32.24	0.949	7.811	0.778
T9 < 0.5	1563	36.93	1.048	9.004	0.701
T10 < 0.5	1583	33.33	0.982	7.954	0.703
T12 < 0.5	1564	51.29	1.101	12.91	0.698
T13 < 0.5	1483	46.63	0.973	10.26	0.627
T14 < 0.5	1582	11.46	0.9	5.105	0.673
T16 < 0.5	1586	18.41	0.855	6.061	0.600
T17 < 0.5	1932	59.77	0.932	8.627	0.750
T18 < 0.5	1471	42.41	0.98	10.85	0.600
T21 < 0.5	1597	55.72	0.854	6.131	0.711
T22 < 0.5	1526	46.5	0.914	11.23	0.634
T23 < 0.5	1452	33.52	1.145	12.28	0.671

Tabelle 8 siehe S. 257.

Tabelle 9: Analysen der Proben der Grabung 2005.054, Insula 27 mit AAS.

Nummer	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Fe [mg/l]	Sr [mg/l]
PV01 < 0.5mm	1131	15.53	1.087	17.99	0.505
PV02 < 0.5mm	1314	11.99	0.994	5.74	0.585
PV03 < 0.5mm	1582	11.3	1.308	14.48	0.560
PV04 < 0.5mm	1560	11.16	1.053	8.793	0.599
PV05 < 0.5mm	1351	14.61	1.108	5.61	0.568
PV01 < 0.05mm	921.4	33.02	1.56	48.28	0.341
PV02 < 0.05mm	1091	6.729	0.837	15.06	0.477
PV03 < 0.05mm	1509	7.347	1.066	22.76	0.382
PV04 < 0.05mm	1477	8.578	0.881	14.77	0.400
PV05 < 0.05mm	1049	17.65	1.222	7.497	0.382
Helle Materialien (Baureste)					
BR01	956.7	9.856	0.859	7.273	0.600
BR02	1698	18.78	0.725	29.75	1.384
BR03a «hell»	1540	19.03	0.976	25.2	0.545
BR03b «dunkel»	840.5	8.128	0.908	6.606	0.511

Tabelle 5: Analysen von ausgewählten Quartärproben. Kornzählung (H. R. = Hauptrogenstein) und AAS. Von der Probe Q31 wurden ein unverwitterter Anteil (unverw.) und ein stark verwitterter Anteil (verw.) separat untersucht.

						AAS an Filtraten						
			Nach HCl-Behandlung und Filtration			FAAS					GFAAS	
Nummer	**Korngrösse**	**Gehalt H. R.**	**Einwaage Probe**	**Filter belegt**	**Filter-rückstand**	**Ca**	**Mg**	**Fe**	**Mn**	**Sr**	**Al**	**Si**
	[mm]	[%]	[mg]	[mg]	[%]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Q01	0.63–6.3	48.1	502.3	234.4	6.1	1721	9.94	4.499	0.836	1.1805	1.087	3.467
Q01	0.063–0.63	–	500.6	313.2	20.8	1404	7.977	4.358	1.009	1.1189	1.1945	2.347
Q01	< 0.063	–	500.5	586.3	76.0	439.4	9.609	6.693	1.603	0.3625	3.471	2.7645
Q03	0.63–6.3	28.8	499.2	355.3	30.7	1313	29.66	8.34	1.971	1.2393	1.73	2.3385
Q03	0.063–0.63	–	501.7	443.5	48.4	880.3	11.55	4.373	0.98	1.3028	0.6105	1.468
Q03	< 0.063	–	499.6	503.6	58.9	675	13.14	3.735	0.81	1.3749	1.5605	1.5615
Q18	0.63–6.3	49.0	500.8	245.7	7.5	1824	11.27	4.113	0.873	1.2972	0.5285	0.948
Q18	0.063–0.63	–	499.5	303	18.8	1553	9.584	4.937	1.004	1.1687	2.032	1.3675
Q18	< 0.063	–	499.6	509.1	61.1	641.8	10.39	6.348	1.355	0.4848	3.342	2.345
Q21	0.63–6.3	31.7	500.3	283.9	15.8	1648	13.84	6.681	1.026	1.1954	1.1575	2.6935
Q21	0.063–0.63	–	501.5	276.6	15.2	1551	10.9	5.185	0.913	1.2303	6.315	2.2175
Q21	< 0.063	–	501.9	479.4	55.5	861.1	17.77	6.995	1.473	0.7121	2.3605	4.024
Q23	0.63–6.3	39.2	501.5	298	19.9	1516	14.98	6.749	1.172	1.1381	0.924	4.024
Q23	0.063–0.63	–	501.8	294.8	18.2	1616	12.73	5.521	1.059	1.2628	0.676	3.7525
Q23	< 0.063	–	499.5	437.9	47.6	971.5	21.32	7.475	1.239	0.9635	2.7145	5.18
Q30	0.63–6.3	0	501.2	534	67.0	667	1.552	3.475	1.529	0.7458	0.924	1.873
Q30	0.063–0.63	–	501.6	545.6	69.0	489.9	0.487	2.471	1.046	0.6189	1.194	1.585
Q30	< 0.063	–	499.8	499.2	59.9	621.9	1.447	2.385	1.284	0.6489	2.0085	2.1
Q31 unverw.	0.63–6.3	51.4	501	276.4	14.1	1598	7.959	4.915	1.369	1.0279	0.7965	1.4435
Q31 unverw.	0.063–0.63	–	501.1	279.3	16.8	1551	9.351	4.956	1.364	1.1241	0.891	1.7485
Q31 unverw.	< 0.063	–	500	472.8	54.1	885.3	5.199	5.557	2.032	0.6697	2.3955	4.093
Q31 verw.	0.63–6.3	50.0	500.7	250.6	9.8	1719	9.215	4.673	1.239	1.1437	0.64	3.204
Q31 verw.	0.063–0.63	–	499.7	284	16.1	1567	8.548	4.986	1.274	1.1161	0.9425	4.135
Q31 verw.	< 0.063	–	500	450.6	49.2	960.4	4.78	6.594	1.856	0.6975	2.7185	9.23
Q38	0.63–6.3	0	501.5	512.6	61.1	682.3	15.24	4.337	1.47	1.0774	0.9335	3.467
Q38	0.063–0.63	–	501.8	573	72.5	423.8	28.95	2.822	0.752	0.6337	0.8995	2.347
Q38	< 0.063	–	499.4	477.3	55.2	535.2	207.9	1.567	1.16	0.3161	0.8595	2.7645

*Tabelle 6: Polarisationsmikroskopie an Referenzputzmörteln. Zuschlagstyp a,b,c,d: siehe Abb. 24. Anteil an siltigem Quarz im Bindemittel: * = kein/wenig, ** = wenig, ***** = sehr viel. 1 = Zuschlag: Hauptrogenstein, 2 = Bindemittel, 3 = Ziegel, 4 = Pore, 5 = Jura-Karbonat (ohne Hauptrogenstein), 6 = anderer Zuschlag.*

Nummer	Zu-schlags-Typ	Siltiger Quarz	Poincounting: Anzahl Punkte							Bindemittel + Poren [vol.%]	Zuschlag [vol.%]	Haupt-rogenstein [vol.%]	Hauptrogenstein [%-Anteil am Zuschlag]
			1	2	3	4	5	6	Total				
P1/PB01	a	*	138	230	0	22	129	99	618	40.8	59.2	13.1	37.7
P2/PB02	a	*	154	239	2	27	143	120	685	38.8	61.2	14.7	36.8
P2/PB03	a	*	187	203	2	47	103	72	614	40.7	59.3	17.8	51.4
P3/PB04	a	*****											
P3/PB05	a	*****											
P4/PB06	a, b	**											
P4/PB07	a, b	**	128	188	122	23	51	24	536	39.4	60.6	12.2	39.4
P5/PB08	a, (b)	*	199	228	13	35	93	82	650	40.5	59.5	18.9	51.4
P5/PB09	a	*	136	330	0	38	122	71	697	52.8	47.2	12.9	41.3
P6/PB10	b, (a)	*****											
P7/PB11	b. a	**	91	282	119	12	56	29	589	49.9	50.1	8.7	30.8
P8/PB12	c	*	0	231	1	30	0	328	590	44.2	55.8	0.0	0.0
P9/PB13	a, b	*											
P10/PB14	a, (b)	**											
P10/PB15	a, (b)	**											
P11/PB16	a, (b)	**	103	338	11	7	79	43	581	59.4	40.6	9.8	43.6
P12/PB17	a, (b)	**											
P13/PB18	(a)	*****											
P14/PB25	b	**	4	230	299	11	7	7	558	43.2	56.8	0.4	1.3
P14/PB19	b, (a)	*											
P15/PB20	a, (b)	**	134	403	8	10	20	28	603	68.5	31.5	12.7	70.5
P16/PB21	a	*											
P17/PB22	a	**	165	406	1	17	22	48	659	64.2	35.8	15.7	69.9
P18/PB23	c	*	0	212	1	2	1	368	584	36.6	63.4	0.0	0.0
P19/PB24	a, (b)	**	198	281	24	35	24	27	589	53.7	46.3	18.8	72.5
P20/PB23	d	*	0	261	1	20	0	302	584	48.1	51.9	0.0	0.0

Tabelle 7 siehe S. 255.

Tabelle 8: Pointcounting an Theatermörteln. 1 = Zuschlag: Hauptrogenstein, 2 = Bindemittel, 3 = Ziegel, 4 = Pore, 5 = Jura-Karbonat (ohne Hauptrogenstein), 6 = anderer Zuschlag. ? = Zuordnung unsicher.

Nummer	Bauphase	Anzahl Punkte							Bindemittel + Poren [vol.%]	Zuschlag [vol.%]	Haupt-rogenstein [vol.%]	Hauptrogenstein [% - Anteil am Zuschlag]
		1	2	3	4	5	6	Total				
T2	?I	250	452	1	189	26	133	1051	61.0	39.0	23.8	61.0
T3	I	408	195	2	230	84	113	1032	41.2	58.8	39.5	67.2
T4	III,1	290	399	0	66	216	40	1011	46.0	54.0	28.7	53.1
T5	III,1	407	411	6	25	67	89	1005	43.4	56.6	40.5	71.5
T6	III	135	515	270	73	77	0	1070	55.0	45.0	12.6	28.0
T7	III	398	303	8	59	109	125	1002	36.1	63.9	39.7	62.2
T8	III,1	301	330	2	215	42	158	1048	52.0	48.0	28.7	59.8
T10	IV	403	379	2	98	41	126	1049	45.5	54.5	38.4	70.5
T11	III	404	419	0	58	34	122	1037	46.0	54.0	39.0	72.1
T14	II	275	405	27	186	46	65	1004	58.9	41.1	27.4	66.6
T15	II	308	330	27	107	139	99	1010	43.3	56.7	30.5	53.8
T16	II	295	341	0	145	65	157	1003	48.5	51.5	29.4	57.1
T17	I	325	371	3	88	122	147	1056	43.5	56.5	30.8	54.4
T18	III	496	314	1	83	59	101	1054	37.7	62.3	47.1	75.5
T19	III	217	348	0	90	326	73	1054	41.6	58.4	20.6	35.2
T20	?	512	217	0	189	27	86	1031	39.4	60.6	49.7	81.9
T24	?II	404	388	0	148	27	88	1055	50.8	49.2	38.3	77.8
T25	?II	328	352	49	100	28	152	1009	44.8	55.2	32.5	58.9

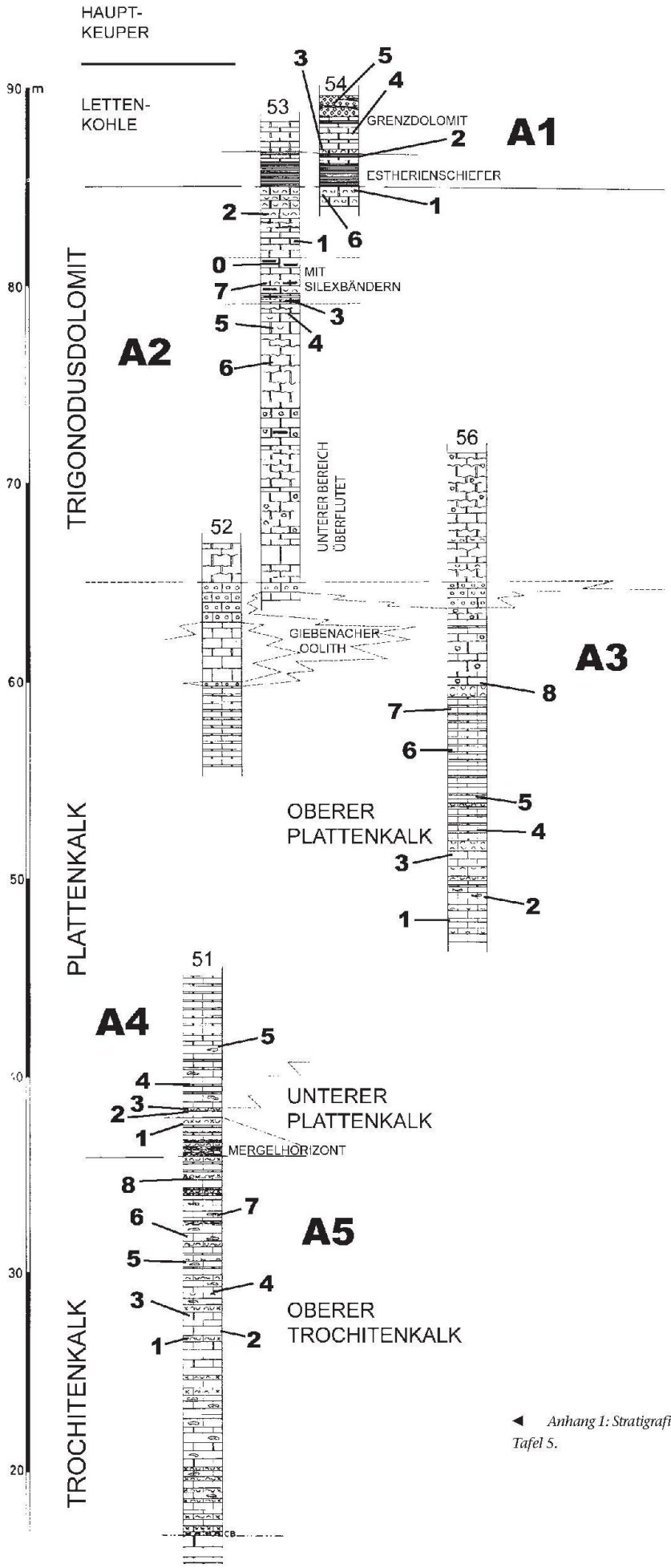
Tabelle 9 siehe S. 255.

Tabelle 10: Pointcounting an Mörteln der Grabung 2005.054, Insula 27: 1 = Zuschlag: Hauptrogenstein, 2 = Bindemittel, 3 = Ziegel, 4 = Pore, 5 = Jura-Karbonat (ohne Hauptrogenstein), 6 = anderer Zuschlag.

Nummer	Anzahl Punkte							Bindemittel + Poren [vol.%]	Zuschlag [vol.%]	Haupt-rogenstein [vol.%]	Hauptrogenstein [%-Anteil am Zuschlag]
	1	2	3	4	5	6	Total				
PV01	247	301	7	46	5	24	630	55.1	44.9	39.2	87.3
PV02	14	349	233	15	5	9	625	58.2	41.8	2.2	5.4
PV05	145	346	5	26	16	49	587	63.4	36.6	24.7	67.4
PV06	179	353	1	24	8	26	591	63.8	36.2	30.3	83.6

Tabelle 11: Zusammenfassung der Resultate der Mörtel-Analysen.

	Putzmörtel	**Theater-Mörtel**	**Mörtel der Grabung 2005.054 Insula 27**
Branntkalk *(Rohstoff: Mögliche Herkunft)*	*(Herkunft nicht bestimmt)*	Mg-reicher Kalk, aber nicht Dolomit. *Oberer Muschelkalk (Plattenkalk/Trochitenkalk)*	Oolithischer, Mg-armer Kalk. *(?) Hauptrogenstein*
Zuschlag *(Rohstoff: Mögliche Herkunft)*	Sand mit hohen Gehalten von oolithischem Kalk, mit siltigem Qz. *Bedeckung der Niederterrasse, Ergolzschotter.* P20/PB23: Sand mit hohen Gehalten von alpinem Material. *Niederterrassenschotter des Rheins.*	Sand und Kies mit hohen Gehalten von oolithischem Kalk. *Ergolzschotter, Bedeckung der Niederterrasse.*	Sand und Kies mit hohen Gehalten von oolithischem Kalk. *Ergolzschotter, Bedeckung der Niederterrasse.*
Löschtechnik	Trocken/Nass	Trocken	Trocken



◄ *Anhang 1: Stratigrafische Herkunft der Karbonat-Proben nach Merki 1961, Tafel 5.*

Anhang 2: Liste der Quartärproben.

Nummer	Schweizer Koordinaten		Schottertyp
	x-koord	y-koord	
Q01	621542	265032	Verwitterungsdecke über Niederterrassenschottern
Q02	621571	264989	Bachschotter, Violenbach
Q03	621646	264930	Bachschotter, Violenbach
Q04	621639	264805	Bachschotter, Violenbach
Q05	621648	264799	Niederterrassenschotter
Q06	621648	264799	Niederterrassenschotter
Q07	621648	264799	Niederterrassenschotter
Q08	621648	264799	Niederterrasssenschotter
Q09	621679	264789	Bachschotter, Violenbach
Q10	621985	264706	Bachschotter, Violenbach
Q11	622053	264725	Bachschotter, Violenbach
Q12	622054	264730	Verwitterungsdecke über Niederterrassenschottern
Q13	623057	263875	Bachschotter, Violenbach
Q14	623571	263442	Bachschotter, Violenbach
Q15	624307	262586	Bachschotter, Violenbach
Q16	621140	264924	Bachschotter, Ergolz
Q17	620994	264950	Bachschotter, Ergolz
Q18	620976	264917	Verwitterungsdecke über Niederterrassenschottern
Q19	620906	264883	Bachschotter, Ergolz
Q20	620885	264844	Bachschotter, Ergolz
Q21	620944	264693	Bachschotter, Ergolz
Q22	620918	264301	Bachschotter, Ergolz
Q23	621050	264122	Bachschotter, Ergolz
Q24	621199	263372	Bachschotter, Ergolz
Q25	621477	262563	Bachschotter, Ergolz
Q26	619965	262915	Lössdecke
Q27	620525	262885	Deckenschotter
Q28	620525	262885	Deckenschotter
Q29	620525	262885	Deckenschotter
Q30	620525	262885	Deckenschotter, rezent verwittert
Q31	620965	262375	Hochterrassenschotter
Q32	620945	262915	Hochterrassenschotter
Q33	620024	262816	Bachschotter
Q34	622705	263405	Deckenschotter, mittlerer («Dinggraben» in Verderber 1992)
Q35	626525	265680	Deckenschotter, mittlerer («Chänzeli» in Verderber 1992)
Q36	623750	265195	Deckenschotter, jüngerer («Tannenchopf» in Verderber 1992)
Q37	624450	264100	Deckenschotter, älterer («Chrüzgraben» in Verderber 1992)
Q38	622179	266178	Niederterrassenschotter
Q39	621508	265864	Niederterrassenschotter
Q40	616994	263711	Niederterrasse, verwittert

Anhang 3: Siebanalysen der Quartärproben.

	Fraktion [Mikrometer]											
	32–45	45–63	63–90	90–125	125–250	250–400	400–500	500–800	800–1000	1000–2000	2000–4000	> 4000
Q01 – S-1												
Material [%]	1.95	2.06	2.00	1.90	7.48	4.08	2.64	3.32	0.85	3.64	9.35	60.73
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	4.96	5.25	5.08	4.83	19.04	10.40	6.73	8.46	2.17	9.26	23.81	
Q01 – S-2												
Material [%]	1.28	1.48	1.36	1.59	4.93	2.25	1.42	1.81	0.50	2.24	6.24	74.91
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	5.10	5.90	5.44	6.32	19.65	8.96	5.68	7.20	1.97	8.91	24.86	
Q01a (ohne Karbonatanteil)												
Material [%]	11.65	12.98	15.55	11.50	26.65	11.25	3.26	3.65	0.94	2.57	0.00	0.00
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	11.65	12.98	15.55	11.50	26.65	11.25	3.26	3.65	0.94	2.57	0.00	0.00
Q01b (ohne Karbonatanteil)												
Material [%]	6.32	26.86	1.14	10.65	30.65	12.11	4.32	4.27	1.19	2.49	0.00	0.00
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	6.32	26.86	1.14	10.65	30.65	12.11	4.32	4.27	1.19	2.49	0.00	0.00
Q02 – S-1												
Material [%]	0.36	0.28	0.34	0.31	1.65	1.92	1.90	6.43	3.02	12.97	14.52	56.29
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.82	0.64	0.77	0.71	3.78	4.40	4.35	14.72	6.91	29.67	33.23	
Q03- S-1												
Material [%]	1.13	1.12	0.94	1.13	3.45	1.98	0.91	1.40	0.40	2.36	18.14	67.01
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	3.44	3.40	2.85	3.43	10.47	6.01	2.77	4.25	1.22	7.16	54.99	
Q03 – S-2												
Material [%]	0.36	0.28	0.34	0.31	1.65	1.92	1.90	6.43	3.02	12.97	14.52	56.29
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.82	0.64	0.77	0.71	3.78	4.40	4.35	14.72	6.91	29.67	33.23	
Q04 – S-1												
Material [%]	0.42	0.39	0.47	0.43	3.65	8.07	6.84	14.76	5.16	17.87	13.40	28.55
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.58	0.54	0.65	0.60	5.11	11.29	9.58	20.66	7.23	25.01	18.76	
Q04 – S-2												
Material [%]	0.43	0.53	0.52	0.70	5.53	8.80	6.48	12.93	4.60	15.54	13.78	30.15
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.61	0.76	0.74	1.01	7.91	12.60	9.28	18.51	6.59	22.25	19.73	
Q05a												
Material [%]	0.23	0.32	0.81	2.38	53.76	37.00	2.98	0.47	0.23	0.08	0.11	1.64
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.23	0.32	0.82	2.42	54.65	37.62	3.03	0.47	0.23	0.09	0.11	
Q05a-1 (ohne Karbonatanteil)												
Material [%]	0.43	0.76	0.64	2.47	50.92	40.28	3.75	0.56	0.07	0.12	0.00	0.00
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.43	0.76	0.64	2.47	50.92	40.28	3.75	0.56	0.07	0.12	0.00	
Q05a – 2 (ohne Karbonatanteil)												
Material [%]	0.46	1.30	0.80	3.51	61.00	39.10	2.80	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.42	1.18	0.73	3.20	55.65	35.68	2.56	0.58	0.00	0.00	0.00	
Q06b												
Material [%]	0.26	0.23	0.55	1.03	7.73	6.47	2.68	1.58	0.33	1.80	5.50	71.83
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.93	0.83	1.94	3.64	27.45	22.98	9.51	5.59	1.19	6.40	19.54	
Q07c												
Material [%]	0.36	0.34	0.85	1.65	26.94	33.45	11.77	7.81	1.11	1.52	0.74	13.46
Material [%]	0.42	0.40	0.99	1.91	31.13	38.65	13.60	9.02	1.28	1.76	0.86	
Q07c – 1 (ohne Karbonatanteil)												
Material [%]	0.29	0.98	0.09	1.30	29.31	41.11	14.60	10.00	1.24	1.09	0.00	0.00
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.29	0.98	0.09	1.30	29.31	41.11	14.60	10.00	1.24	1.09	0.00	
Q07c – 2 (ohne Karbonatanteil)												
Material [%]	0.28	0.56	0.74	1.19	39.05	49.08	17.28	11.86	0.00	0.00	0.00	0.00
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.23	0.46	0.62	0.99	32.53	40.89	14.39	9.88	0.00	0.00	0.00	
Q09												
Material [%]	0.23	0.21	0.32	0.31	1.31	1.63	1.51	5.00	2.20	11.85	17.21	58.22
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.56	0.51	0.77	0.73	3.12	3.90	3.60	11.97	5.26	28.36	41.20	
Q12												
Material [%]	12.20	9.71	9.89	6.58	15.62	10.12	2.99	5.40	1.74	7.91	17.85	0.00
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	12.20	9.71	9.89	6.58	15.62	10.12	2.99	5.40	1.74	7.91		
Q13a												
Material [%]	0.28	0.29	0.37	0.38	1.78	1.82	1.94	6.53	2.98	19.26	24.98	39.39
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.46	0.49	0.60	0.63	2.94	3.00	3.21	10.77	4.92	31.78	41.21	
Q13b												
Material [%]	0.90	0.85	0.88	0.75	4.11	2.49	1.15	1.16	0.33	1.75	7.01	78.64
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	4.22	4.00	4.10	3.52	19.22	11.64	5.36	5.42	1.54	8.17	32.81	

Anhang 3 (Fortsetzung): Siebanalysen der Quartärproben.

	Fraktion [Mikrometer]											
	32–45	45–63	63–90	90–125	125–250	250–400	400–500	500–800	800–1000	1000–2000	2000–4000	> 4000
Q14												
Material [%]	0.65	0.56	0.73	0.69	2.79	3.01	2.66	6.65	2.67	10.89	12.70	56.00
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	1.49	1.26	1.66	1.57	6.35	6.84	6.04	15.11	6.06	24.76	28.87	
Q15												
Material [%]	0.47	0.34	0.34	0.26	0.84	0.61	0.56	1.90	1.04	5.05	11.26	77.33
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	2.08	1.48	1.52	1.15	3.72	2.70	2.47	8.39	4.58	22.26	49.65	
Q17 – S-1												
Material [%]	0.06	0.05	0.07	0.07	0.62	1.50	1.84	5.82	2.15	7.11	10.15	70.56
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.21	0.17	0.23	0.22	2.09	5.10	6.26	19.78	7.32	24.15	34.47	
Q18 – S-1												
Material [%]	0.73	0.65	0.47	0.35	1.25	1.07	0.77	2.12	1.04	8.13	15.07	68.34
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	2.31	2.05	1.49	1.11	3.94	3.39	2.43	6.71	3.29	25.68	47.60	
Q18 – S-2												
Material [%]	0.50	0.45	0.68	0.36	1.47	1.10	0.92	2.30	1.08	8.49	15.77	66.87
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	1.51	1.36	2.06	1.08	4.45	3.32	2.78	6.95	3.25	25.63	47.61	
Q19 – S-1												
Material [%]	6.19	7.69	13.61	13.50	41.15	13.50	2.96	1.33	0.02	0.06	0.00	0.00
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	6.19	7.69	13.61	13.50	41.15	13.50	2.96	1.33	0.02	0.06	0.00	
Q20 – S-1												
Material [%]	0.03	0.00	0.05	0.03	0.17	0.21	0.35	1.68	0.94	6.11	10.14	80.28
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.16	0.00	0.27	0.13	0.88	1.04	1.77	8.53	4.79	31.00	51.42	
Q20 – S-2												
Material [%]	0.03	0.05	0.06	0.07	0.31	0.55	0.87	4.60	2.51	12.12	14.01	64.82
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.10	0.13	0.16	0.20	0.89	1.56	2.48	13.08	7.13	34.45	39.82	
Q21 – S-1												
Material [%]	0.22	0.00	0.45	0.27	1.15	1.69	2.16	8.77	3.73	16.07	15.56	49.93
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.43	0.00	0.90	0.55	2.30	3.37	4.32	17.51	7.46	32.10	31.07	
Q21 – S-2												
Material [%]	0.20	0.20	0.27	0.32	1.64	2.34	2.86	10.29	3.65	11.53	11.09	55.61
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.46	0.46	0.60	0.71	3.70	5.28	6.43	23.19	8.22	25.98	24.97	
Q22 – S-1												
Material [%]	0.03	0.03	0.04	0.04	0.14	0.06	0.07	0.24	0.11	1.14	4.72	93.40
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.41	0.41	0.56	0.59	2.06	0.91	1.06	3.62	1.68	17.26	71.44	
Q22 – S-2												
Material [%]	0.05	0.04	0.04	0.07	0.48	0.44	0.61	2.61	1.40	5.66	6.68	81.92
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.28	0.21	0.23	0.40	2.67	2.45	3.36	14.42	7.72	31.29	36.97	
Q23 – S-1												
Material [%]	0.22	0.25	0.38	0.47	3.56	3.57	2.64	4.33	1.30	5.37	8.29	69.61
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.73	0.83	1.24	1.55	11.70	11.75	8.69	14.26	4.26	17.69	27.29	
Q24 – S-1												
Material [%]	0.15	0.23	0.37	0.46	2.64	4.04	5.19	11.81	2.62	5.60	7.06	59.84
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.38	0.57	0.91	1.15	6.56	10.05	12.93	29.41	6.53	13.93	17.59	
Q24 – S-2												
Material [%]	0.22	0.27	0.39	0.44	2.95	4.57	6.82	13.98	3.28	6.09	6.83	54.15
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.47	0.60	0.86	0.97	6.44	9.97	14.87	30.48	7.16	13.28	14.90	
Q25 – S-1												
Material [%]	0.05	0.06	0.06	0.05	0.11	0.08	0.09	0.27	0.19	4.29	23.45	71.30
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.17	0.20	0.20	0.17	0.39	0.30	0.32	0.95	0.66	14.95	81.70	
Q25 – S-2												
Material [%]	0.09	0.08	0.07	0.07	0.23	0.15	0.20	0.53	0.29	3.94	16.43	77.92
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	0.41	0.35	0.31	0.31	1.04	0.69	0.92	2.39	1.31	17.85	74.41	
Material [%]	1.12	1.77	2.46	2.17	25.59	25.87	7.76	4.87	0.67	2.25	6.71	18.75
Material [%] ohne Fraktion > 4 mm	1.38	2.18	3.03	2.68	31.49	31.84	9.56	6.00	0.82	2.76	8.26	

Anhang 4: Liste der Putzproben.

	Augster Klassifikation				
Nummer		**Putzschicht**	**Katalognummer**	**Inventarnummer**	**Fundkomplex**
PB01	P 1	2 von 3	2	1984.11325	C00867
PB02	P 2	2/3 von 4	1	1984.7470	C00629
PB03	P 2	2 von 3	10	1984.5817	C00564
PB04	P 3	1 von 3	15	1984.6777	C00597
PB05	P 3		16	1984.3563	C00528
PB06	P 4	1 von 3	14	1984.1087	C00510
PB07	P 4		14	1984.5818	C00564
PB08	P 5	1 von 3	13	1984.1096	C00511
PB09	P 5		20	1984.7979	C00645
PB10	P 6	1 von 4	17	1984.7979	C00645
PB11	P 7	1 von 3	19	1984.8988	C00697
PB12	P 8	2 von 3	0	1984.9052	C00709
PB13	P 9	2 von 3	0	1984.5817	C00564
PB14	P 10	2 von 3	8	1984.5817	C00564
PB15	P 11	2 von 3	12	1984.4717	C00543
PB16	P 11	1 von 2	12	1984.4717	C00543
PB17	P 12	1 von 2	6	1984.5816	C00564
PB18	P 13	1 von 3	4	1961.13562	X01186
PB25	P 14	1 von 4	6	1984.5817	C00564
PB19	P 14	1 von 3	6	1984.6632	C00586
PB20	P 15	1 von 2	3	1984.5817	C00564
PB21	P 16	1 von 2	7	1984.5816	C00564
PB22	P 17	1 von 2	21	1984.8258	C00658
PB23	P 18	2 von 3	0	1985.58536	C01700
PB24	P 19	1 von 3	2	1984.11326	C00868
PB23	P 20	1 von3	0	1985.58536	C01700
PB04b	–	2 von 3	15	1984.6777	C00597
PB25b	–	2 von 4	6	1984.5817	C00564
PB30	–				

Anhang 5: Liste der Theaterproben. ? = Zuweisung unsicher.

		Augst, nach Rentzel unpubl.		
Nummer	**Präparat**	**Bauphase**	**Bezeichnung**	**Inventarnummer**
T1	PB110	I	M1168.2	1992.055.D01168.2
T2	PB111	?I	M1168.4	1992.055.D01168.4
T3	PB112	I	M1168.5	1992.055.D01168.5
T4	PB113	III,1	D366.5	1992.055.D00366.5
T5	PB114	III,1	D366.7	1992.055.D00366.7
T6	PB115	III	D1177.1	1993.055.D01177.1
T7	PB116	III	D1177.3	1993.055.D01177.3
T8	PB117	III,1	D1177.4	1993.055.D01177.4
T9	PB118	IV	D1177.5	1993.055.D01177.5
T10	PB119	IV	D1177.6	1993.055.D01177.6
T11	PB120	III.	D1177.7	1993.055.D01177.7
T12	PB121	II	D1177.8	1993.055.D01177.8
T13	PB122	III	D1178.1	1993.055.D01178.1
T14	PB123	II	D1178.2	1993.055.D01178.2
T15	PB124	II	D1178.3	1993.055.D01178.3
T16	PB125	II	D1178.4	1993.055.D01178.4
T17	PB126	I	D1178.5	1993.055.D01178.5
T18	PB127	III	D1179.1	1993.055.D01179.1
T19	PB128	III	D1179.2	1993.055.D01179.2
T20	PB129			1993.055.D01181.2
T21	PB130	?II	D1181.3	1993.055.D01181.3
T22	PB131	III	D1181.6	1993.055.D01181.6
T23	PB132	?II	D1182.1	1993.055.D01182.1
T24	PB133	?II	D1182.2	1993.055.D01182.2
T25	PB134	?II	D1182.3	1993.055.D01182.3