Zeitschrift: Cahiers d'archéologie romande

Herausgeber: Bibliothèque Historique Vaudoise

Band: 187 (2020)

Artikel: "Moenia lata vide" : die römische Stadtmauer von Aventicum/Avenches (Kanton Waadt, Schweiz). Band 2, Grundlagen

Autor: Flück, Matthias

Kapitel: 28: Römischer Beton der Stadtmauer von Aventicum/Avenches

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-917238

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: 03.07.2025

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

28 RÖMISCHER BETON DER STADTMAUER VON AVENTICUM/AVENCHES

FRANK JACOBS[3752]

28.1 AUFTRAG

Der Autor des Berichtes wurde am 3.4.2017 beauftragt, Untersuchungen an Kalkmörtelproben aus dem Kontext der römischen Stadtmauer von Aventicum/Avenches durchzuführen. Vom Auftraggeber, M. Flück, wurden folgende Fragstellungen zu den Untersuchungen formuliert:
- Zusammensetzung der Mörtel
- Technologische Einschätzung der Mörtel
- Vergleich der Mörtel von unterschiedlichen Komponenten der Stadtmauer (Proben liegen von folgenden Komponenten vor: Osttor, Nordosttor, Westtor, verschiedene Kurtinenabschnitte ■ **501**)
- Vergleich der Mörtel nach Herkunft am Bauwerk (Fundament; aufgehendes Mauerwerk; Mauerschale, Mauerkern etc.).

Um Hinweise auf die Antworten für diese Fragen zu erhalten, wurden folgende Untersuchungen vorgenommen:
- makroskopische, visuelle Untersuchung
- mikroskopische Untersuchung
- Dichtebestimmung
- Korngrössenverteilung
- rasterelektronenmikroskopische Untersuchung (REM)
- röntgendiffraktometrische Untersuchung (XRD)
- thermogravimetrische Untersuchung (TG).

Die Proben waren teilweise deutlich unter und teilweise deutlich über 1 kg. Die Korngrösse war auch sehr variabel ■ **983**. Deshalb wurden die Untersuchungen so angepasst, dass bei grösseren Mengen an zerkleinertem Material auf eine weitere Zerkleinerung verzichtet wurde, um die Korngrössenverteilung an der Probe, d. h. der vorhandenen Gesteinskörnung, zu bestimmen. Bei Proben mit sehr kleiner Korngrösse wurde angenommen, dass diese mehrheitlich aus Bindemittel bestehen; folglich wurden daran XRD- und TG-Untersuchungen vorgenommen, um das Bindemittel zu charakterisieren. REM-Analysen wurden auch durchgeführt, um genauere Hinweise auf das Bindemittel erhalten.

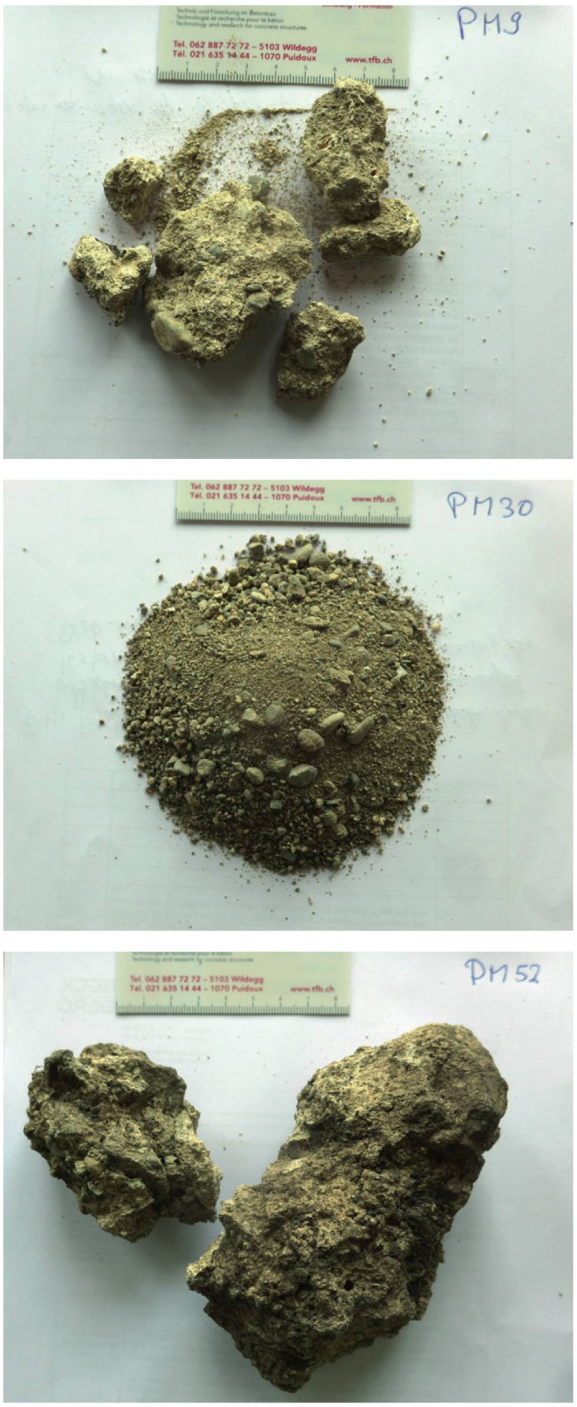
28.2 KURZE GESCHICHTE DER BINDEMITTEL

ENTWICKLUNG DER BAUSTOFFE

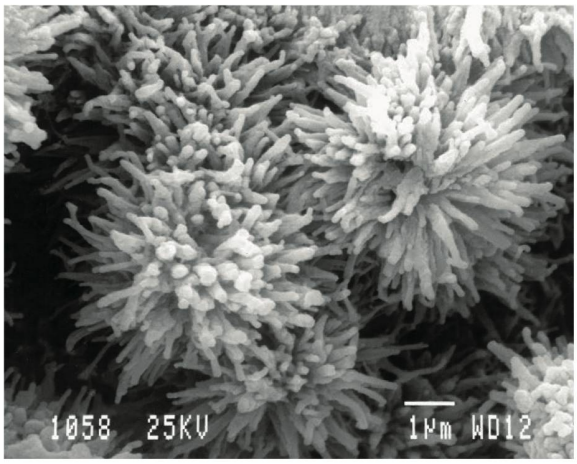
Die Verwendung von Gips als Bindemittel für Baustoffe ist seit mehr als 6000 Jahren, beispielsweise aus Babylon (heutiges Irak) und Ägypten, bekannt. Kalk als Bindemittel für Baustoffe wurde erst später verwendet, da dieser wegen der benötigten höheren Temperaturen (> 800 °C) schwieriger als Gips (150–200 °C) herzustellen ist. Hinweise zur Verwendung von Kalk als Baustoff (Putz, Mauermörtel) liegen bereits von den Phöniziern (ca. 1000–300 v. Chr.) aus dem heutigen Libanon und Syrien vor.

Kalk oder auch Kalkstein genannt ($CaCO_3$) wird durch Brennen (Abspaltung von CO2) bei etwa 800–1000 °C zu Branntkalk (= ungelöschter Kalk; CaO). Anschliessend wird dem Branntkalk Wasser (H2O) zugesetzt, wodurch gelöschter Kalk [$Ca(OH)_2$] entsteht. Gelöschter Kalk [$Ca(OH)_2$] wird auf Grund von zwei Mechanismen hart:
- Abgabe von für die Verarbeitung zugesetztem Wasser infolge Trocknung
- Aufnahme von Kohlendioxid (CO_2) aus der Luft und Bildung von Kalzit ($CaCO_3$) (Karbonatisierung).

3752 TFB Technik und Forschung im Betonbau AG, Wildegg. Der Autor bedankt sich bei Dr. Claude Pilloud, Jura Cement AG, für die kostenfreie Durchführung von XRD- und TG-Analysen.



983 Fotos der Proben PM9 (oben), PM30 (Mitte) und PM52 (unten).



984 Calciumsilikathydrate (CSH) in modernem Beton; 1 µm = 1 Millionstel Meter.

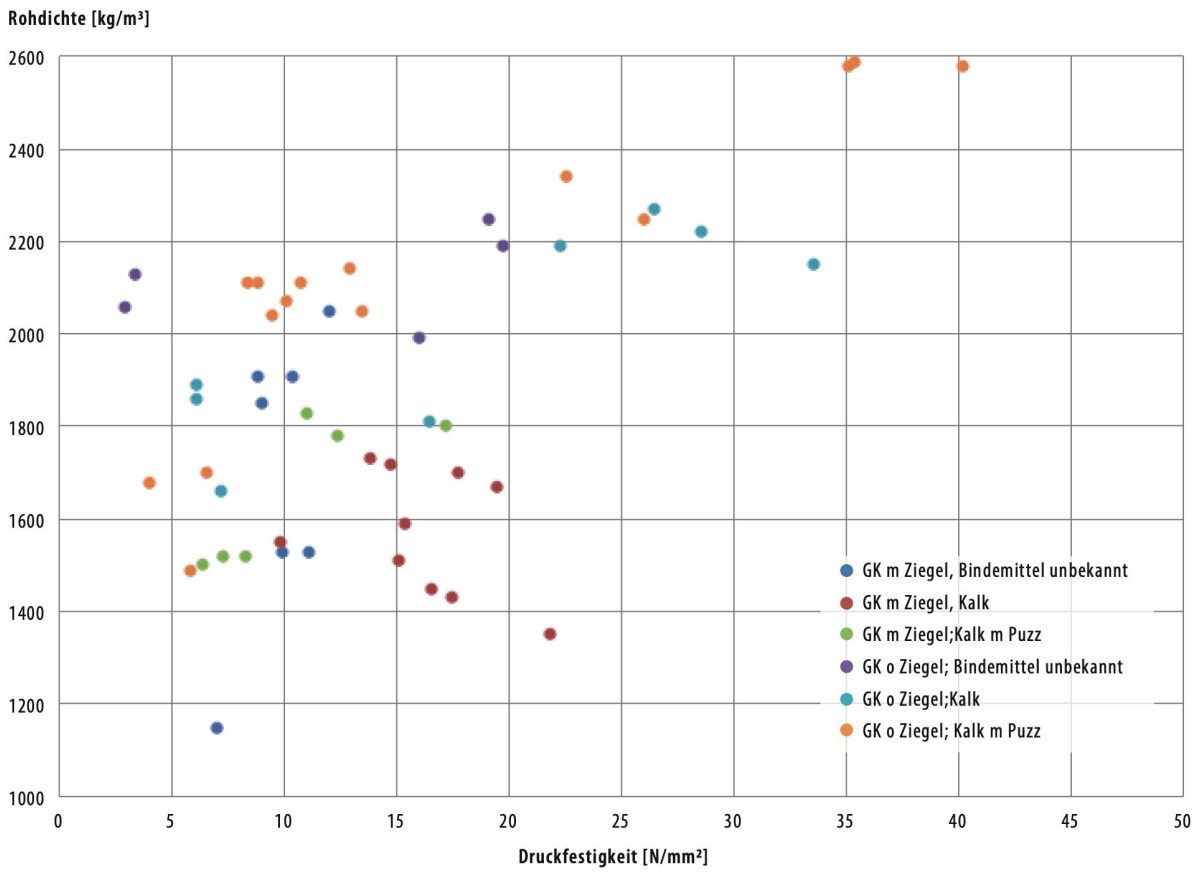
Der gebildete Kalzit entspricht chemisch dem in der Natur vorkommenden Kalkstein. D.h. es handelt sich um einen festen Baustoff, der gering wasserlöslich ist, wie es auch an Karstformen im Jura sichtbar wird. Der gebrannte Kalk wird auch als Luftkalk oder nur als Kalk bezeichnet, da er, im Gegensatz zu Zement, nur an der Luft (Abgabe von Wasser) aushärten kann.

Die Phönizier erkannten bereits, dass die Beständigkeit des Luftkalkes gegenüber einem Wasserangriff verbessert werden kann, wenn natürliche Puzzolane wie manche vulkanischen Gesteine (beispielsweise von der griechischen Insel Santorin) oder künstliche Puzzolane wie gebrannter Ton (gemahlene Ziegel) zugesetzt werden. Die Mischung aus Luftkalk und Puzzolan kann zu ähnlichen Reaktionsprodukten führen (Calciumsilikathydrate = CSH-Phase) ■ **984**, wie sie beim heutigen Zement beim Mischen mit Wasser entstehen. Diese filigranen CSH-Phasen sindfür die Festigkeit von heutigem Beton verantwortlich. Die heutigen Zemente, die seit etwa 150 Jahren in Gebrauch sind, sind so konzipiert, dass der Beton innerhalb von Stunden bis wenigen Tagen eine relativ hohe Festigkeit erreicht; bei den Römer wird es dagegen wohl eine bis mehrere Wochen gedauert haben.

Über die Griechen, die in Puteoli bei Neapel eine Kolonie gegründet hatten, gelangten die phönizischen Kenntnisse zu den Römern. Beim Hafenbau in Puteoli (2. Jh. v. Chr.) erkannten die Bewohner, dass manche der lokal vorkommenden, roten vulkanischen Erden die Dauerhaftigkeit der Kalkmörtel beimdauernden Kontakt mit Wasserstark verbesserten. Dieser Stoff wurde in römischer Zeit *«pulvis puteolanus»* und später dann Puzzolan (nach dem Ort Puteoli bei Neapel) genannt.

Bis in caesarische Zeit wurde von den Römern vor allem Kalk als Bindemittel verwendet. Unter Caesar wurden erstmals rote Puzzolane, mit Kalk vermischt, in grösseren Umfang verwendet. Seit augusteischer Zeit war die Verwendung roter Puzzolane so verbreitet, dass u.a. in Rom die Bauwerke nicht mehr aus grauen, sondern roten Mörtel gebaut wurden. Waren bei Baumassnahmen wie beim claudischen Hafenbau in Ostia lokal keine roten Puzzolane vorhanden, wurden diese auch aus Puteoli herantransportiert. Mit der Zeit wurde jedoch erkannt, dass nicht nur rote, sondern auch andersfarbige Puzzolane (beispielsweise schwarze oder gelbe) die gleichen Eigenschaften wie die roten haben können.

In römischen Beton sind teilweise rundliche, mmgrosse, weissliche Kalkspatzen vorhanden. Diese ent-



985 Druckfestigkeit und Rohdichte von römischem Beton, unterteilt nach Gesteinskörnung (GK) mit und ohne Ziegelsteine sowie der Bindemittelart (unbekannt, Kalk, Kalk, mit Puzzolanen) (aus Lamprecht 1996).

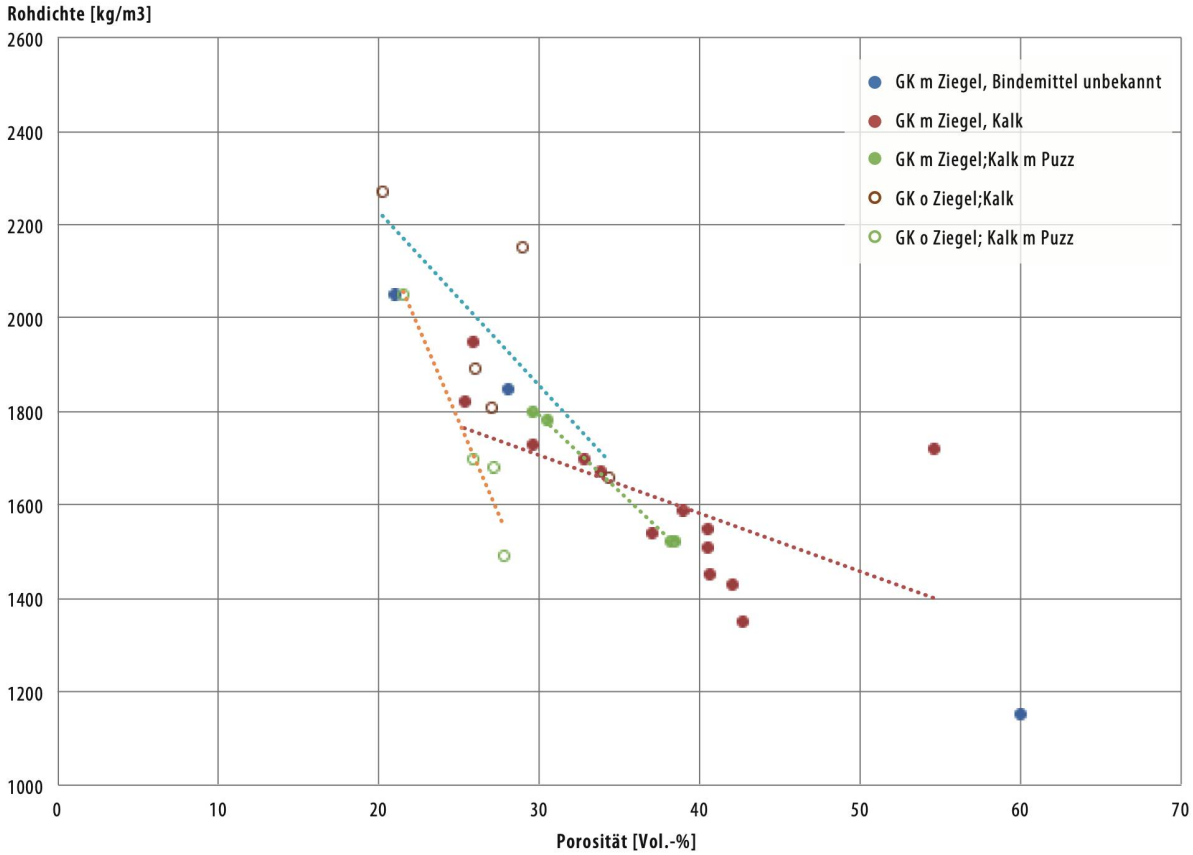
stehen einerseits bei einem Schwachbrand (zu geringe Brenntemperatur), d. h. sie sind Relikte von ungebranntem Kalk, und andererseits durch eine Verklumpung eines ungenügend gelöschten Kalkes.

H.-O. Lamprecht untersuchte viele gut erhaltene, jeweils zumeist mehrere dm-grosse, römische Betonproben auf deren Bindemittel und Betoneigenschaften[3753]. Er konnte zeigen, dass puzzolane Bindemittel zu CSH-Mineralien reagierten. An den Proben bestimmte er verschiedene Betoneigenschaften. Die Druckfestigkeit variiert zwischen etwa 4 und 40 N/mm² ■ **985**, wobei die Druckfestigkeit, wie üblich, zumeist mit zunehmender Rohdichte[3754] zunimmt und Proben ohne Ziegel in der Gesteinskörnung die höchsten Druckfestigkeiten aufweisen. Es zeigt sich kein klarer Einfluss der Gesteinskörnungsart (mit/ohne Ziegel) oder des Bindemittels (Kalk/ Kalk mit Puzzolan) auf die Druckfestigkeit. Betonproben mit Gesteinskörnung ohne Ziegel weisen bei vergleichbarer Druckfestigkeit zumeist höhere Rohdichten als solche mit Gesteinskörnung mit Ziegel.

Die Rohdichte variierte bei Proben ohne Ziegel als Gesteinskörnung zwischen 1800 und 2400 kg/m³ und bei Proben mit Ziegel in der Gesteinskörnung zumeist zwischen 1400 und 1900 kg/m³ ■ **986**. Auch zeigen die Proben mit Ziegel in der Gesteinskörnung höhere Porositäten als solche ohne Ziegel (20–30 Vol.-%). Dies ist üblich, da Ziegel zumeist poröser als natürliche Gesteinskörnung sind.

Für heute übliche Betonbauwerke mit einer Lebensdauer von etwa 50 und auch deutlich mehr Jahren ■ **987** wird ein Mischungsverhältnis von Zement zu Wasser von etwa 4 bis 6 Teilen Wasser auf 10 Teile Zement verwendet. Dadurch entsteht ein dichter und dauerhafter Beton. Umso höher der Wasseranteil ist, desto besser lässt sich der Beton auf der Baustelle verarbeiten, jedoch wird er auch weniger dauerhaft. Auf den römischen Kalkmörtel übertragen, würde dies bedeuten, dass maximal 6 Teile Wasser auf etwa 3 Teile gelöschten Kalk und etwa 7 Teile Puzzolan kommen sollten. Der römische Architekturtheoretiker Vitruv[3755] gibt ähnliche Empfehlungen zu den Mischungsverhältnissen von gelöschtem Kalk und Puzzolan. Welche Wassergehalte die Römer tatsächlich verwendet haben, ist nicht bekannt. Es kann vermutet werden, dass aus Gründen der Verarbeitbarkeit für den römischen Beton höhere als die heute genannten Wassermengen verwendet wurden. Umso mehr Wasser dem Beton bei der Herstellung zugegeben wird, umso poröser wird der Beton und umso mehr Schadstoffe können

3753 Lamprecht 1996. **3754** Rohdichte teilweise nach Lufttrocknung und teilweise nach 105 °C-Trocknung bestimmt; bei wenigen Proben wurden beide Rohdichten bestimmt; dort lag die Rohdichte nach Lufttrocknung um 200–300 kg/m³ höher als die nach 105 °C-Trocknung. **3755** Vitr. 7, 1–3.



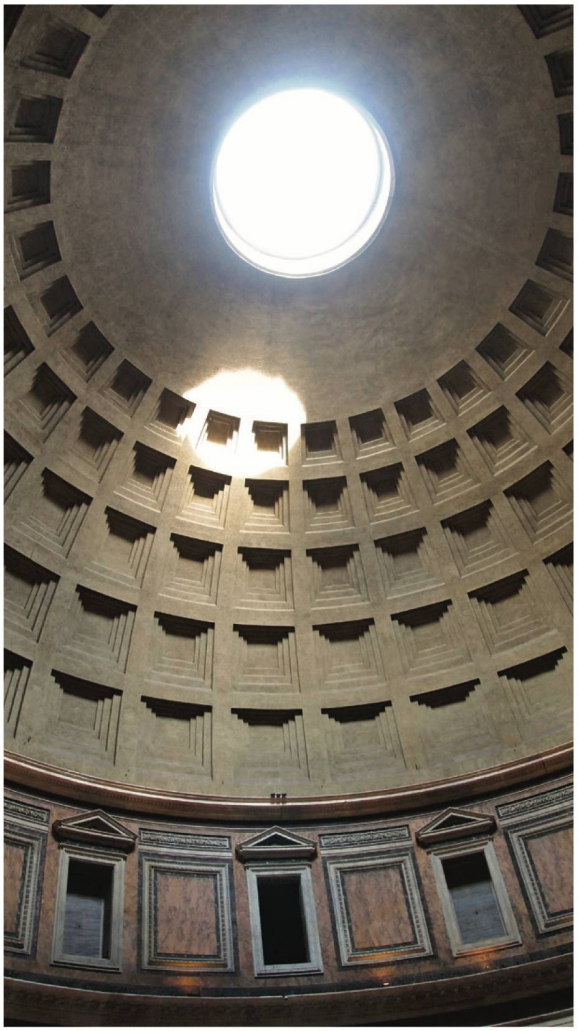
986 Porosität und Rohdichte von römischem Beton, unterteilt nach Gesteinskörnung (GK) mit und ohne Ziegelsteine sowie der Bindemittelart (unbekannt, Kalk, Kalk, mit Puzzolanen) (aus Lamprecht 1996).

987 Ca. 1890 erstellte 60 cm dicke Kellerwand aus Beton in Winterthur.

eindringen und den Beton schädigen. So wurde auch bis vor wenigen Jahrzehnten vorgegangen, als noch keine betonverflüssigenden Zusatzmittel erhältlich bzw. verbreitet waren.

28.3 MÖRTEL UND BETON

In vorrömischer Zeit wurden Mauern nur aus ungebundenen Mauersteinen erstellt. Hierzu mussten Mauersteine in einem aufwendigen Schritt aus in Steinbrüchen gewonnenen Steinen auf Mass gehauen und zur Baustelle transportiert werden. Über die Griechen erfuhren die Römer ebenfalls von einer neuen Art der Mauerkonstruktion, wie sie von den Phöniziern entwickelt wurde: Zwischen zwei Schalen aus Mauersteinen wurde grosse und kleine Bruchsteine gefüllt und die Hohlräume mit Kalkmörtel verfüllt. D.h. der Beton war nicht sichtbar. Mit der Zeit wurden dann auch Mauern oder Gewölbe ausschliesslich aus Beton und ohne vorgesetzte Mauersteinschalen gebaut. Paradebeispiele hierfür sind die Kuppel des Pantheons ■ **988** oder der grossen Kaiserthermen in Rom. Daneben wurde Mörtel und Beton je nach Anforderung mit und ohne Zusatz von Puzzolanen als Wandverputz, Mauermörtel, Bodenbelag



988 Kuppel des Pantheons in Rom.

(Estrich), Auskleidung und Abdichtung von Becken und Rinnen verwendet.

Die Erfindung von Beton, einem Gemisch aus lokal vorkommendem Sand und Kies sowie einem «Klebstoff»(Gips, Kalk, Zement) brachte eine grosse Vereinfachung beim Bauen. Nun war es sehr viel einfacher als mit Mauersteinen möglich, beliebige Formen herzustellen. Der in Gruben gewonnene Sand und Kies wurde bereits bei den Römern, zumindest teilweise[3756], durch Siebung in verschiedene Fraktionen aufgeteilt (wie es heute üblich ist), da Mörtel und Beton abgestimmte Mengen von verschieden grossen Sanden und Kiesen benötigten. Der Unterschied zwischen Mörtel und Beton besteht vor allem darin, dass der Mörtel kein Kies (Gesteinskörner grösser 4 mm) enthält.

28.4 UNTERSUCHUNGEN

VORBEMERKUNG

Nachfolgend wird eine Zusammenfassung des TFB-Berichtes für den Auftraggeber gegeben[3757], der mehr als 60 Seiten Prüfberichte mit Detailangaben enthält.

Unabhängig davon, ob es sich um Mörtel oder Beton handelt, wird der einfachheithalber immer von Beton gesprochen, für den «Klebstoff» der Fachbegriff Bindemittelmatrix verwendet und für Sand und Kies der Fachbegriff Gesteinskörnung (GK) benutzt. In ■ **989** sind die untersuchten Proben mit Hinweisen zur Ausgrabung und in ■ **990** die durchgeführten Analysen angegeben.

VISUELLE, MAKROSKOPISCHE UNTERSUCHUNG

Die Ergebnisse der visuellen, makroskopischen Beschreibung befinden sich in ■ **991**. Die Proben bestehen vor allem aus mm- bis wenigen cm-grossen Bruchstücken. Die Gesteinskörner sind in der Regel gut bis kantengerundet und bis zu wenige cm gross. Diverse Proben (PM2, PM3, PM5, PM13, PM14, PM16, PM18, PM21, PM50, PM51, PM52, PM60) enthalten wenige mm-grosse, rötliche Gesteinskörner, die natürliche Gesteinskörner und zumindest teilweise Ziegelbruchstücke sein könnten.

In vielen Proben zeigen sich weisse, ca. 1 mm grosse «Körner», die aus sehr feinkörnigem Material bestehen, die nachfolgend als Kalkspatzen bezeichnet werden.

Nicht selten finden sich auch Poren und Hohlräume in den Proben. Aufgrund der zumeist geringen Grösse der Probenstücke ist davon auszugehen, dass der ursprüngliche Beton/Mörtel wahrscheinlich noch mehr Poren bzw. Hohlräume aufwies. Das Brechen (Zerkleinern) findet üblicherweise entlang von Poren bzw. Hohlräumen statt, wodurch diese dann nicht mehr erkennbar sind, da diese sich auf der Oberfläche der Probenstücke (und nicht im Inneren) befinden.

Wurzeln in wenigen Proben und bräunliche Verfärbungen (durch Humus?) in vielen Proben sowie Kalksinterschichten in Probe PM50 weisen auf eine mehr oder weniger intensive Durchfeuchtung der Proben hin.

Die Proben lassen sich nur teilweise von Hand zerbrechen, was auf Druckfestigkeiten von deutlich unter 1 N/mm² hinweist. Die nicht von Hand brechbaren Proben werden eine etwas höhere Druckfestigkeit von evtl. maximal wenigen N/mm² aufweisen[3758].

MIKROSKOPISCHE UND REM-ERGEBNISSE

Es zeigen sich zwei unterschiedlich alte Betone. Der ältere Beton (Typ I) ist in Form von mm-grossen Bruchstücken im neueren Typ II enthalten.

Die meisten Proben bestehen aus :

- 25–55 %, im Mittel ca. 40 %, Bindemittel aus Kalk
- gemäss REM-Untersuchungen enthält das kalkige Bindemittel Silizium- und Aluminiumverbindungen, was auf Puzzolane hinweist

3756 Vitr. 2, 4. **3757** Jacobs 2017. **3758** Vgl. Jacobs 1990.

Proben-Nr.	Komplex-Nr.	Ausgrabung	Kontext
PM1	K AV15/16898	2015.03 (PE)	PE_M3: antikes Fundament
PM2	K AV15/16899	2015.03 (PE)	PE_M3: antikes Fundament, UK
PM3	K AV15/16900	2015.03 (PE)	PE_M6: antikes Fundament
PM5	K AV15/16902	2015.03 (PE)	PE_M6: antikes Fundament, UK
PM6	K AV15/16918	2015.03 (T73-PE_M1)	T73-PE_M1: antikes Fundament, nachträglicher Eingriff, antike Reparatur?
PM8	K AV15/16920	2015.03 (T73-PE_M1)	T73-PE_M1: antikes Fundament, UK
PM9	K AV15/16949	2015.03 (PNE)	St 45, Mauerkern Kurtine, nordwestlich der Fuge
PM11	K AV15/16951	2015.03 (PNE)	St 40, Mauerkern Kurtine, südöstlich der Fuge
PM13	K AV15/16953	2015.03 (PNE)	St 49, Fundament Turm T8, westliche Mauerschale
PM14	K AV15/16954	2015.03 (PNE)	St 50, Fundament PNE_M1, westliche Mauerschale
PM16	K AV15/16956	2015.03 (PNE)	St 34, Mauerkern PNE_M1, aufgehendes Mauerwerk
PM18	K AV15/16958	2015.03 (PNE)	St 67, Fundament PNE_M1, südöstliche Seite
PM21	K AV15/16961	2015.03 (PNE)	St 73, Fundament T8_M1, unterhalb PNE_M2
PM22	K AV16/17400	2016.06 (T20–T21_M1)	Sondage 37, Fundament Kurtine, nördliche Mauerschale
PM30	K AV15/16962	2015.03 (PNE)	C 122, Steinschutt, Nordostprofil
PM 40	K AV 16 / 17402	2016.17 PM 40	Fundament T54_M1
PM 50		PO	PO_M1, Fundament Torturm
PM 51		PO	PO_M3, Fundament Mauer Torgebäude
PM 52		PO 19.4.2017	PO_M5, Fundament Mauer Torgebäude
PM 60	K AV04/13136-05	2004.01 (GDD 2004, M1)	Gegenprobe (Tempel von La Grange des Dîmes)

989 Tabellarische Zusammenstellung der untersuchten Proben.

990 Untersuchte Proben und Untersuchungsmethoden; REM: rasterelektronenmikroskopische Untersuchung; XRD: röntgendiffraktometrische Untersuchung; TG: thermogravimetrische Untersuchung; KGV: Korngrössenverteilung; RD: Rohdichte.

Proben-Nr.	Mikroskopie	REM	XRD	TGA	KGV	RD
PM1	ja				nein	
PM2	ja	ja			nein	ja
PM3	ja				nein	ja
PM5	ja	ja	ja	ja	ja	
PM6	ja				nein	ja
PM8	ja				nein	ja
PM9	ja				nein	ja
PM11	ja		ja	ja	ja	
PM13	ja		ja	ja	ja	
PM14	ja		ja	ja	ja	
PM16	ja	ja			nein	ja
PM18	ja				nein	ja
PM21	ja		ja	ja	ja	
PM22	ja				ja	
PM30	ja		ja	ja	nein	ja
PM 40	ja				nein	ja
PM 50	ja				nein	ja
PM 51	ja		ja	ja	ja	
PM 52	ja				nein	ja
PM 60	ja				nein	ja

– die Proben PM 9, 11, 16 enthalten Spuren von Ziegeln im neueren Beton (Typ II)
– mit 2–30%, im Mittel 10 % Kalkspatzen im neueren Beton (Typ II)
– in den Kalkspatzen hat es SiO_2
– mit 5–25%, im Mittel 5–10 % Poren von bis zu ca. 3 mm Grösse
– 45–75%, im Mittel ca. 60% aus gebrochenen und gerundeten Gesteinskörnern identischer Petrographie (Kalkstein, Sandstein, Granit, etc.) von zumeist 0.1–10 mm Grösse
– bis auf die Proben PM50, PM52, PM 60 sind bis ca. 1 mm grosse Bruchstücke eines älteren Betons (ca. 1–5%) im jüngeren Beton enthalten. Der ältere Beton (Typ I) weist ein ähnliches Bindemittel wie der jüngere Beton (Typ II) auf, ist aber dichter. Die stark zerkleinerte Probe PM30 besteht vor allem aus Körnern aus dem älteren Beton.
– bei PM1 befindet sich eine Kalkschicht zwischen dem alten und jungen Beton, was auf einen längeren Zeitabstand (Monate, Jahre) zwischen der Herstellung des alten Mörtels und des neuen Betons schliessen lässt.

Die meisten Proben enthalten jedoch wenige bis sehr wenige Risse. Wenige Proben (PM5, PM8, PM9, PM11) enthalten viele Risse, die vor allem durch ein Austrocknen oder mechanische Einwirkungen auf den noch weichen Beton, d. h. in römischer Zeit, entstanden sind. Die meisten Proben zeigen deutliche Spuren von Kalkablagerungen in den Poren und auf Oberflächen, was auf intensiveren Kontakt mit Regen- und/oder Grundwasser hinweist.

Proben	Grösse [cm]	Beschreibung
PM1	0 - 3	1 – 3 cm grosseBruchstücke, weisslicherMörtel, teilweisebräunlichverfärbt, mit gut gerundeten bis ca. 3 mm grossen Gesteinskörnern und einemkantengerundeten 2 cm grossen Gesteinskorn, mitvielen ca. 1 – 2 mm grossen Kalkspatzen und vielen bis ca. 1 mm grossen Hohlräumen
PM2	0 – 4	2 – 4 cm grosse Bruchstücke, weisslicher Mörtel, teilweise bräunlich verfärbt, mit kantigen bis gut gerundeten bis ca. 5 mm grossen Gesteinskörnern und einem kantengerundeten 2 cm grossen Gesteinskorn, mit zwei ca. 2 – 3 mm grossen, rötlichen Bruchstücken (Ziegel?), mit vielen ca. 1 – 2 mm grossen Kalkspatzen und diversen bis ca. 1 mm grossen Hohlräumen
PM3	0 – 6	1 – 6 cm grosse Bruchstücke, weisslicher Mörtel, teilweise bräunlich verfärbt, mit gut gerundeten bis ca. 10 mm grossen Gesteinskörnern, mit einem ca. 5 × 15 mm grossen, teils rötlichen, teils gelblichen Bruchstück (Ziegel), mit vielen ca. 1 – 2 mm (z. T. 5 mm) grossen Kalkspatzen
PM5	0 – 5	2 – 5 cm grosse Bruchstücke, hellgrauer Mörtel, teilweise bräunlich verfärbt, mit kantigen bis gut gerundeten bis ca. 10 mm grossen Gesteinskörnern, mit vereinzelt ca. 1 mm grossen rötlichen Bruchstücken (Ziegel), mit diversen ca. 1 – 2 mm grossen Kalkspatzen
PM6	0 – 6	1 – 5 cm grosse Bruchstücke, hellgrauer Mörtel, teilweise bräunlich verfärbt, mit kantigen bis gut gerundeten bis ca. 10 mm grossen Gesteinskörnern, mit diversen ca. 1 – 2 mm grossen Kalkspatzen und wenigen wenige mm-grossen Poren
PM8	0 – 5	1 – 5 cm grosse Bruchstücke, hellgrauer Mörtel, teilweise bräunlich verfärbt, mit kantigen bis gut gerundeten bis ca. 5 mm grossen Gesteinskörnern (2 Gesteinskörner sind 10 und 20 mm lang), mit wenigen ca. 1 – 2 mm grossen Kalkspatzen und wenigen wenige mm-grossen Poren
PM9	0 – 5	1 – 5 cm grosse Bruchstücke, hellgrauer Mörtel, teilweise bräunlich verfärbt, mit gut gerundeten bis ca. 20 mm grossen Gesteinskörnern, mit wenigen ca. 1 – 2 mm grossen Kalkspatzen und wenigen wenige mm-grossen Poren
PM11	0 – 5	1 – 5 cm grosse Bruchstücke, hellgrauer Mörtel, teilweise bräunlich verfärbt, mit kantigen bis gut gerundeten bis ca. 20 mm grossen Gesteinskörnern, mit wenigen ca. 1 – 2 mm grossen Kalkspatzen, mit vereinzelt ca. 1 – 2 mm grossen rötlichen Bruchstücken (Ziegel), und wenigen wenige mm-grossen Poren
PM13	0 – 4	diverse 1 – 5 cm grosse Bruchstücke, hellgrauer Mörtel, teilweise bräunlich verfärbt, mit kantigen bis gut gerundeten bis ca. 20 mm grossen Gesteinskörnern, mit diversen ca. 1 – 2 mm grossen Kalkspatzen, mit vereinzelt bis ca. 20 mm grossen rötlichen Bruchstücken (Ziegel), und wenigen wenige mm-grossen Poren, sehr viele Körner < 1 mm
PM14	0 – 4	diverse 1 – 5 cm grosse Bruchstücke, hellgrauer Mörtel, teilweise bräunlich verfärbt, mit kantigen bis gut gerundeten bis ca. 20 mm grossen Gesteinskörnern, mit vielen ca. 1 – 2 mm grossen Kalkspatzen, mit vereinzelt bis ca. 2 mm grossen rötlichen Bruchstücken (Ziegel) und vielen wenige mm-grossen Poren, viele Körner < 1 mm
PM16	0 – 4	1 – 5 cm grosse Bruchstücke, hellgrauer Mörtel, teilweise bräunlich verfärbt, mit kantigen bis gut gerundeten bis ca. 20 mm grossen Gesteinskörnern, mit diversen ca. 1 – 2 mm grossen Kalkspatzen, mit vereinzelt bis ca. 2 mm grossen rötlichen Bruchstücken (Ziegel), und wenigen wenige mm-grossen Poren
PM18	0 – 6	1 – 6 cm grosse Bruchstücke, hellgrauer Mörtel, teilweise bräunlich verfärbt, mit kantigen bis gut gerundeten bis ca. 20 mm grossen Gesteinskörnern, mit diversen bis ca. 5 mm grossen Kalkspatzen, mit vereinzelt bis ca. 2 mm grossen rötlichen Bruchstücken (Ziegel), und wenigen wenige mm-grossen Poren, viele Körner < 1 mm
PM21	0 – 4	diverse 1 – 4 cm grosse Bruchstücke, hellgrauerMörtel, teilweise bräunlich verfärbt, mit kantigen bis gut gerundeten bis ca. 20 mm grossen Gesteinskörnern, mit vielen bis ca. 5 mm grossen Kalkspatzen, mit vereinzelt bis ca. 1 mm grossen rötlichen Bruchstücken (Ziegel?) und vielen wenige mm-grossen Poren, viele Körner < 1 mm
PM22	0 – 4	1 – 4 cm grosseBruchstücke, hellgrauer bis weisslicher Mörtel, teilweise bräunlich verfärbt, mit kantigen bis gut gerundeten bis ca. 10 mm grossen Gesteinskörnern, mit vielen ca. 1 – 2 mm grossen Kalkspatzen, mit vereinzelt bis ca. 2 mm grossen rötlichen, bröseligen Körnern (Ziegel?) und wenigen wenige mm-grossen Poren
PM30	0 – 4	bräunlicher Sand mit kantigen bis gut gerundeten bis 4 cm grossen Gesteinskörnern und wenigen bis ca. 5 mm grossen hellgrauverkitteten Gesteinskörnern (Mörtel?) mit ca. 1mm grossen Hohlräumen
PM40	0 – 6	1 – 6 cm grosse Bruchstücke, hellgrau bis weisslicher Mörtel, teilweise bräunlich verfärbt, mit kantigen bis gut gerundeten bis ca. 10 mm grossen Gesteinskörnern, mit vielen ca. 1 – 2 mm grossen Kalkspatzen und diversen ca. 1 mm grossen Poren, anhaftende Wurzeln
PM50	0 – 6	1 – 6 cm grosse Bruchstücke, hellgrauer Mörtel, teilweise bräunlich verfärbt, mit kantigen bis gut gerundeten bis ca. 10 mm grossen Gesteinskörnern, mit vielen ca. 1 mm grossen Kalkspatzen und diversen ca. 1 mm grossen Poren, mit vereinzelt bis ca. 1 mm grossen rötlichen Bruchstücken (Ziegel?), anhaftende Wurzeln, Kalksinterschicht auf manchen Bruchstücken
PM51	0 – 5	1 – 5 cm grosse Bruchstücke, hellgrauer Mörtel, teilweise bräunlich verfärbt, mit kantigen bis gut gerundeten bis ca. 10 mm grossen Gesteinskörnern, mit vielen ca. 1 mm grossen Kalkspatzen, und diversen ca. 1 mm grossen Poren, mit diversen bis ca. 1 mm grossen rötlichen Bruchstücken (Ziegel?), viele Körner < 1 mm
PM52	0 – 10	Vier 4 – 10 cm grosse Bruchstücke, hellgrauer Mörtel, teilweise bräunlich verfärbt, mit kantigen bis gut gerundeten bis ca. 10 mm grossen Gesteinskörnern, mit diversen ca. 1 mm grossen Kalkspatzen und diversen ca. 1 mm grossen Poren, mit einigen bis ca. 5 mm grossen rötlichen Bruchstücken (Ziegel?), anhaftende Wurzeln
PM60	0 – 6	Fünf 3 – 6 cm grosse Bruchstücke, hellgrauer Mörtel mit kantigen bis gut gerundeten bis ca. 10 mm grossen Gesteinskörnern, mit diversen bis ca. 5 mm grossen Kalkspatzen und diversen ca. 1 mm grossen Poren, mit vereinzelt bis ca. 2 mm grossen rötlichen Bruchstücken (Ziegel?)

991 Ergebnisse der visuellen, makroskopischen Untersuchungen.

Probe	Quarz	Kalzit	Dolomit	Albit	Muskovit	Mikroklin	Chlorit	Gips	Glühverlust gem/ber
PM5	30.1	42.7	0.0	8.4	8.2	8.0	2.5	Spuren	22.1/19.9
PM11	24.8	54.3	0.5	6.0	5.7	6.0	1.6	Spuren	26.0/24.9
PM13	25.6	54.1	0.8	6.8	6.5	4.5	1.7		24.0/25.0
PM14	29.3	43.6	0.5	10.2	7.3	5.7	3.4	Spuren	20.9/20.2
PM21	27.8	48.7	0.3	9.3	5.9	5.0	3.1		24.2/22.2
PM30	27.6	45.4	1.1	11.3	8.4	3.5	2.7		23.4/21.6
PM51	14.2	67.7	0.4	5.2	6.4	4.0	2.2		30.7/30.8

992 Ergebnisse der XRD und TGA-Bestimmungen [Massen-%] von juracement; gem: mit TG bestimmt; ber: berechnet gemäss Rietveldanalyse.

XRD- UND TG-ERGEBNISSE

Von ausgewählten Probenwurde der Anteil < 125 µm der Jura CementAG zugestellt, um daran die mineralogische Zusammensetzung zu bestimmen. Dieses feinkörnige Material besteht erfahrungsgemäss zumeist aus dem Bindemittel und kaum aus Feinstsand der Gesteinskörnung. Noch besser wäre es gewesen, wenn nur die Korngruppe < 63 µm verwendet worden wäre; da jedoch die Menge dieser Korngruppe jeweils sehr gering war (max. ca. 1–2 g), wurde dies nicht vorgenommen. An den Proben wurden röntgendiffraktometrisch (XRD) mit Rietveldauswertung die mineralogische Zusammensetzung ermittelt. Zur Kontrolle wurde noch der Glühverlust bei 950 °C bestimmt, um die XRD-Ergebnisse zu überprüfen. Ein Überblick der Ergebnisse befindet sich in ■ **992**.

Die Proben bestehen zu etwa 45–65% aus Kalk und Dolomit, zu ca. 15–30% aus Quarz und zu etwa 10–15% aus Feldspäten (Albit, Mikroklin) und ca. 10% Schichtsilikaten (Chlorit, Muskovit). Der gemessene und berechnete Glühverlust stimmt in etwa überein, was auf eine zuverlässige XRD-Bestimmung hinweist. Die Probe PM51 fällt im Vergleich zu den anderen Proben durch einen hohen Gehalt an Karbonat (Kalzit, Dolomit) und einen niedrigen an Quarz auf. Die Analysenergebnisse können so verstanden werden, dass bei der Herstellung der untersuchten Betone ein kalkiges Bindemittel (gebrannter Kalk) verwendet wurde. Dabei handelte es sich wahrscheinlich um einen fast reinen Kalk, der nur sehr geringe Gehalte an Dolomit aufwies. Es kann aber nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass der Dolomit auch aus der Gesteinskörnung stammt. Bei den Feldspäten und den Schichtsilikaten handelt es sich wahrscheinlich um Bestandteile der Gesteinskörnung. Der Quarz wird wohl nur oder zumeist aus der Gesteinskörnung stammen. Würde der Quarz in grösseren Mengen aus Puzzolanen stammen, läge dieser nicht in so einer kristallinen Struktur vor, wie diese bei der XRD-Analyse bestimmt wurde. Bei manchen Proben (PM5, PM21, PM30) sind die Unterschiede zwischen dem bestimmten und berechneten Glühverlust grösser als bei den anderen Proben. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass das kalkige Bindemittel in geringen Mengen mit Puzzolanen reagierte. Die Spuren von Gips deuten auf einen Kontakt von sulfathaltigem Grundwasser mit dem römischen Beton hin.

Im Vergleich zu Proben aus *Vindonissa*[3759] weisen die Proben ähnliche bis leicht tiefere Kalk-, Dolomit- und Quarzgehalte und tendenziell höhere Albit- und Chloritgehalte auf, was vor allem auf der Verwendung unterschiedlicher Gesteinskörnung beruht.

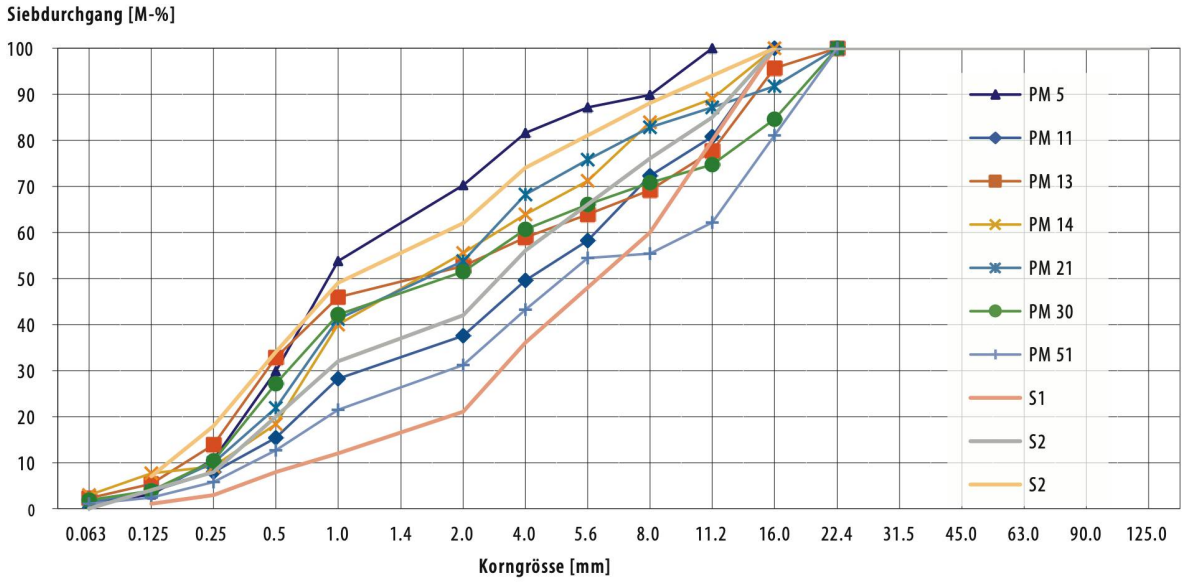
ROHDICHTE UND KORNGRÖSSENVERTEILUNG

Die Rohdichte wurde in Anlehnung an die heute gültige Gesteinskörnungsnorm SN EN 1067-6 bestimmt. Dabei werden die Proben über und unter Wasser und bei verschiedenen Feuchtegehalten gewogen und daraus die Dichte und Porosität bestimmt ■ **993**. Die Rohdichte nach 105 °C Trocknung, d. h. die Dichte bei der die Poren

993 Ergebnisse der Dichtebestimmungen.

Probe	Rohdichte nach 105 °C Trocknung [kg/m3]	Reindichte [kg/m3]	Porosität [Vol.-%]
PM2	1798	2516	47
PM3	1790	2489	30
PM6	1501	2467	37
PM8	1719	2373	15
PM9	1871	2525	29
PM16	1931	2519	32
PM18	2259	2547	32
PM22	1971	2378	32
PM40	1643	2460	26
PM50	2100	2519	12
PM52	2145	2493	18
PM60	1761	2341	17
Mittelwert	1874	2469	27
Standard-abweichung	219	68	10

3759 Jacobs 1990. | Jacobs 2013.



994 Ergebnisse der Trockensiebung.

dem Feststoffvolumen zugerechnet werden, liegt im Mittel bei ca. 1900 kg/m³ und die Reindichte (nur Feststoffvolumen, ohne Poren) bei ca. 2450 kg/m³. Die Rohdichte der Proben mit dem angelieferten Feuchtegehalt war etwa 30 kg/m3 höher als die nach 105 °C-Trocknung bestimmte. D.h. die Proben war nur mässig feucht bei der Übergabe. Die Proben könnten aber auch zwischen der Ausgrabung und der Übergabe getrocknet sein. Aus den Unterschieden zwischen der Roh- und Reindichte wurde die Porosität mit im Mittel 27 Vol.-% berechnet. Alle drei Eigenschaften variieren erheblich. Die Proben PM 9, PM22, PM52 fallen durch eine niedrige Reindichte (< 2400 kg/m³) und die Proben PM2, PM3, PM6, PM16, PM18, PM22 durch eine hohe Porosität (≥ 30%) auf. Beton weist heute üblicherweise eine Rohdichte von ca. 2300 bis 2400 kg/m3, eine Reindichte von 2700 kg/m³ und eine Porosität zwischen ca. 10 und 15 % auf.

Die Porositäten und Rohdichten sind ähnlich wie diejenigen von Lamprecht **vgl. ■993.** Im Vergleich zu Proben aus *Vindonissa*[3760] weisen die Proben zumeist deutlich höhere Porositäten (und folglich eine geringere Rohdichte auf). Da die mikroskopisch bestimmte Porosität in Avenches und *Vindonissa* ähnlich ist, könnte die höhere Porosität wohl überwiegend auf der Verwendung von unterschiedlich poröser Gesteinskörnung beruhen. Die Reindichte der Proben aus Avenches ist nur etwas geringer als diejenige der Proben aus *Vindonoissa*, was mit Gesteinskörnung unterschiedlicher Dichte erklärt werden könnte. Möglicherweise hat aber auch bei der Reindichtebestimmung die Kleinheit der Probenstücke insofern eine Rolle gespielt, dass die Ergebnisse dadurch ungenauer sind.

Die Korngrössenverteilung wurde bei Proben mit der heute gültigen Gesteinskörnungsnorm nach SN EN 933-1 bestimmt. Es fand keine weitere Zerkleinerung durch Zerreiben oder Ähnliches statt. Eventuell fand eine gewisse Zerkleinerung beim Trockensieben statt. Die Kornverteilung der verschiedenen Proben ist relativ ähnlich **■994**. Der Anteil < 125 µm liegt bei ca. 3–8% und der Anteil > 8 mm bei 10–45%. Die Linien S1 bis S3 stellen heute übliche Kornverteilungen bei einem Grösstkorn von 16 mm dar. Der Bereich zwischen den Linien S1 und S2 wird für eine Betonherstellung angestrebt; der Bereich zwischen den Linien S2 und S3 ist wegen des hohen Feinanteils noch akzeptabel, aber nicht mehr ideal. Somit fällt die Probe PM5 durch einen sehr hohen Anteil an feinen Bestandteilen auf, die Proben PM11 und PM51 haben eine Kornverteilung wie sie heute noch bei der Betonherstellung angestrebt wird.

28.5 DISKUSSION

Die REM- und XRD-Analysen deuten darauf hin, dass das Bindemittel überwiegend aus Kalk und wahrscheinlich geringen Anteilen eines puzzolanen Stoffs besteht. Denkbar ist ein künstliches Puzzolan wie Ziegelmehl oder ein natürliches wie z. B. gebrannter Ton oder vulkanische Asche. In den Proben wurden nur geringe Mengen an Ziegelmehl oder Ziegelschrot gefunden. Wahrscheinlich wurden Tone beim Kalkbrennen mitgebrannt. Diese bestätigen auch die untersuchten Kalkspatzen, in denen bei der REM-Untersuchung im Inneren SiO_2 gefunden wurde. Aufgrund des schlechten Erhaltungszustandes der Proben konnten keine Reaktionsprodukte von Kalk mit Puzzolanen nachgewiesen werden. Um

3760 Jacobs 1990. | Jacobs 2013. **3761** Jacobs 1990. | Jacobs 2013. **3762** Böttger et al. 2002. **3763** Vitr. 2, 5.

Kalk, gegebenenfalls mit zugesetzten Puzzolanen, oder Mergel (tonhaltiger Kalk) zu brennen (Abspaltung von CO_2), werden Temperaturen von ca. 900–1000 °C während etwa 3–4 Tagen benötigt. Mit Holz als Brennstoff können solche Temperaturen erreicht werden. Zum Kalkbrennen werden somit grosse Mengen an Holz als Brennstoff benötigt.

Auch hier, wie auch in früheren Untersuchungen von z. B. *Vindonissa*[3761] oder vom Magdalensberg[3762] sind relativ viele Kalkspatzen im neueren römischen Beton (Typ II) vorhanden. Den Römern war die Problematik dieser Kalkspatzen bekannt und Vitruv gibt auch Hinweise, wie diese bei der Kalkherstellung zu vermeiden sind[3763]. Somit wurde wahrscheinlich ein Kalk minderer Qualität bei der Betonherstellung verwendet. Es bestehen allerdings keine Hinweise, dass dadurch die Qualität des römischen Betons wesentlich beeinträchtigt wurde.

Die römischen Betone bestehen zumeist aus etwa mm-grossen Bruchstücken eines älteren Betons (Typ I) im neueren Beton (Typ II). Es kann nicht beurteilt werden, wieviel älter der ältere Beton ist. Sicher ist der ältere Beton ca. ½–1 Jahr oder mehr älter als der jüngere Beton. Der ältere Beton weist eine ähnliche Zusammensetzung wie der jüngere auf, ist aber dichter (weniger porös). In älteren Betonbruchstücken (Typ I) wurden weder Kalkspatzen noch Ziegelmehl gesehen. Nach heutiger Lesart würde man beim jüngeren Beton (Typ II) von einer Art von «Recyclingbeton» sprechen, da dieser vereinzelt Ziegelbruchstücke und mm-grosse Bruchstücke eines älteren Betons aufweist. Interessant ist die Frage, ob bzw. wie die Römer «alten» Beton zerkleinerten. Das Brechen von Beton ist grundsätzlich mühsamer als die Gewinnung von Sand und Kies aus entsprechenden Gruben. Nur falls sich keine solchen Gruben in der Nähe der Baustelle befinden würden, käme der Transport (über grössere Strecken) als Erschwernis hinzu, weshalb dann gewisse Aufbereitungsmassnahmen (Brechen von Beton) akzeptabel sein könnten. Da aber im Umfeld von *Aventicum* Sand- und Kiesgruben vorhanden sind, kann vermutet werden, dass die Bruchstücke des älteren Betons z. B. von Beschädigungen von Beton durch die Umwelt (Verwitterung) oder Menschen (Abbruch) stammen und zufällig oder absichtlich bei der Herstellung des neuen Betons verwendet werden. Bei anderen Bauwerken (z. B. *Vindonissa*) werden bei der Betonherstellung Ziegelbruchstücke verwendet. D.h. Aufbereitungsverfahren für Ziegel sollten den Römern bekannt gewesen sein, wobei anzumerken ist, dass Ziegel, die nicht bei hohen Temperaturen gebrannt werden, einfacher als Beton zu brechen sind. Möglicherweise handelt es sich bei den Ziegelbruchstücken auch um Ziegelbruch von der Ziegelherstellung.

Die Proben weisen alle eine mikroskopisch ähnliche Zusammensetzung auf. Im Gegensatz dazu zeigen die an den Bruchstücken bestimmten Dichten und Porositäten grössere Unterschiede. Dies könnte aber vor allem auf der Gewinnung der Proben (Bruchstücke) beruhen.

Insgesamt lassen die vorhandenen Untersuchungsergebnisse auf keine grossen Unterschiede bei der Qualität der verschiedenen Betonproben schliessen. Dies kann auch dadurch bedingt sein, dass immer Material in ausreichend Qualität für die Betonherstellung und auch ausreichende Kenntnisse zur Herstellung der Betone vorhanden waren. Die Zusammensetzung der Betone entspricht, soweit aufgrund des nicht sehr guten Erhaltungszustandes beurteilbar, der heute noch bei der Betonherstellung verwendeten Zusammensetzung. Die Betoneigenschaften haben eventuell denen heutigen Beton mit nicht sehr hohen Anforderungen entsprochen.

Für weitergehende Aussagen zur Zusammensetzung und den Eigenschaften wären Untersuchungen an weniger verwitterten Proben notwendig. Dies wäre bei Probengrössen von wenigstens mehreren Dezimetern jeweils in Länge, Breite und Höhe zu erwarten. Günstig wäre es zudem, wenn die Proben im Boden konserviert und nicht zu grosser Feuchtigkeit oder Frosteinwirkungen ausgesetzt wären.

SÉRIE AVENTICUM

I Gilbert KAENEL: Céramiques gallo-romaines décorées. 1974. ISBN 2-88028-001-X. épuisé (CAR 1)

II Monika VERZÀR: Un temple du culte impérial. 1977. ISBN 2-88028-012-5. épuisé (CAR 12)

III Philippe BRIDEL: Le sanctuaire du Cigognier. 1982. ISBN 2-88028-022-2. Fr. 100.– (CAR 22)

IV Daniel CASTELLA: La nécropole du Port d'Avenches. 1987. ISBN 2-88028-041-9. épuisé (CAR 41)

V Hans BÖGLI, Michel FUCHS (dir.): Pictores per provincias. (Actes du 3e colloque international sur la peinture murale romaine, Avenches, 28–31 août 1986). 1987. ISBN 2-88028-043-5. épuisé (CAR 43)

VI Daniel CASTELLA: Le moulin hydraulique gallo-romain d'Avenches « En Chaplix ». 1994. ISBN 2-88028-062. Fr. 60.– (CAR 62)

VII Martin BOSSERT: Die figürlichen Reliefs von Aventicum. Mit einem Nachtrag zu «Die Rundskulpturen von Aventicum». 1998. ISBN 2-88028-069-9. Fr. 85.– (CAR 69)

VIII Martin BOSSERT: Die figürlichen Baureliefs des Cigognier-Heiligtums in Avenches. Kunsthistorische und ikonologische Einordnung. 1998. ISBN 2-88028-070-2. Fr. 75.– (CAR 70)

IX–X Daniel CASTELLA (dir.): La nécropole gallo-romaine d'Avenches «En Chaplix». Fouilles 1987–1992
Daniel CASTELLA. Vol. 1: Étude des sépultures.
Daniel CASTELLA, Chantal MARTIN PRUVOT, Heidi AMREIN, Anika DUVAUCHELLE, Franz E. KOENIG. Vol. 2: Étude du mobilier. 1999.
ISBN 2-88028-077-X et ISBN 2-88028-078-8. Fr. 115.– les 2 vol. (CAR 77–78)

XI Heidi AMREIN: L'atelier de verriers d'Avenches: l'artisanat du verre au milieu du 1er siècle après J.-C. 2001. ISBN 2-88028-087-7. épuisé (CAR 87)

XII Martin BOSSERT: Die figürlichen Skulpturen der Nekropole von Avenches-En Chaplix (VD): nördlicher und südlicher Grabbezirk. 2002. ISBN 2-88028-091-5. Fr. 50.– (CAR 91)

XIII Philippe BRIDEL: L'amphithéâtre d'Avenches. 2004. ISBN 2-88028-096-6. Fr. 100.– (CAR 96)

XIV Chantal MARTIN PRUVOT: L'insula 19 à Avenches. De l'édifice tibérien aux thermes du IIe siècle. 2006. ISBN 2-88028-103-2. Fr. 75.– (CAR 103)

XV Georg MATTER: Das römische Theater von Avenches/Aventicum. Architektur, Baugeschichte, kulturhistorische Aspekte. 2009. ISBN 978-2-88028-114-4. Fr. 85.– (CAR 114)

XVI–XVII Jacques MOREL: Le palais de Derrière la Tour à Avenches. Vol. 1: Bilan de trois siècles de recherches. Chronologie, évolution architecturale, synthèse.
Daniel CASTELLA, Anne DE PURY-GYSEL (dir.). Vol. 2: Étude des éléments de construction, de décor et du mobilier. 2010.
ISBN 978-2-88028-117-2 et ISBN 978-2-88028-118-0. Fr. 110.– les 2 vol. (CAR 117–118)

XVIII–XIX Laurent FLUTSCH, Pierre HAUSER: Le mausolée nouveau est arrivé. Les monuments funéraires d'Avenches-En Chaplix, Canton de Vaud, Suisse. Vol. I. ISBN 978-2-88028-137-7.
Vol. II. Catalogue des fragments architecturaux. 2012. ISBN 978-2-88028-138-5.
Fr. 120.– les 2 vol. (CAR 137–138)

XX Philippe BRIDEL: Le sanctuaire de la Grange des Dîmes à Avenches. Les temples et le péribole – Étude des architectures. Avec portefeuille des plans en 18 dépliants. 2015. ISBN 978-2-88028-156-4.
Fr. 98.– (CAR 156)

XXI Emmanuelle SAUTEUR (dir.): À la Montagne. Une nécropole du Ier siècle après J.-C. à Avenches. 2017. ISBN 978-2-88028-167-0. Fr. 70.– (CAR 167)