

Römischer Beton

Autor(en): **Jacobs, Frank**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Jahresbericht / Gesellschaft Pro Vindonissa**

Band (Jahr): - **(1990)**

PDF erstellt am: **27.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-280154>

Nutzungsbedingungen

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

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

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

Haftungsausschluss

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

Römischer Beton

Frank Jacobs

1. Einleitung

Im Gegensatz zu den Griechen, bei welchen nur Vermutungen vorliegen, ist von den Römern bekannt, dass sie bei ihren Bauwerken Bindemittel einsetzten, welche dem heutigen Zement ähneln. Neben den schon länger bekannten Bindemitteln Kalk und Gips setzten sie Puzzolane und Ziegelmehl zur Festigkeitssteigerung und zur Erhöhung der Beständigkeit ein. Puzzolane haben im Gegensatz zu Kalk und Gips hydraulische Eigenschaften, d.h. sie können unter Wasser erhärten und sind anschliessend wasserbeständig. Das Wort Puzzolane ist eine lokale Bezeichnung für Tuffvorkommen bei der Ortschaft Pozzuoli in Italien. Einerseits wurde diese Bezeichnung auch für geographisch entfernte Tuffvorkommen benützt, und andererseits führen Vorkommen mit ähnlicher Zusammensetzung abweichende lokale Bezeichnungen, wie z.B. der Trass in der Eifel/Deutschland. Dieses Vorkommen war den Römern schon bekannt (Röder 1960), aber ob der Trass nur als Werkstein oder auch als hydraulisches Bindemittel diente, ist noch nicht geklärt. Der Einsatz von Ziegelmehl ist jedoch bei einer Vielzahl von Bauwerken, bei welchen keine Puzzolan- oder Trassvorkommen in der Nähe waren, nachgewiesen.

Bei den Puzzolanen handelt es sich um verwitterte Reste von vulkanischen Auswurfprodukten (Pyroklastika). Durch die chemische Verwitterung entstehen Zeolithe, Tonminerale und Karbonate. Diese verfestigen einerseits die vormals lockeren Auswurfprodukte und führen andererseits zu der von den Römern erkannten hydraulischen Abbindefähigkeit. Künstliche Puzzolane, wie z.B. Ziegel, bestehen aus gebranntem Ton(-mineralen) mit zum Teil Feinsand.

Die Verwandtschaft beider zu den modernen Zementen ist in Abb. 1 wiedergegeben. Diese Abbildung stellt das Rankine-Diagramm dar, in welchem der für die hydraulischen Eigenschaften verantwortliche Chemismus (SiO_2 , $\text{CaO}+\text{MgO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$) aufgetragen ist. Vergleicht man die Zusammensetzung von Puzzolanen mit Portlandzementen, so zeigt sich, dass die Zusammensetzung differierte. Puzzolane und Trass unterscheiden sich von einem «modernen» Zement, indem sie zulasten der Calcium- und Magnesiumkarbonate SiO_2 -reicher sind. Die hier aufgetragenen Ziegeleitone sind im Vergleich zu den «modernen» Zementen reicher an Aluminium- und Eisenoxiden. Längere Erhärungszeiten und Ausschalfzeiten – heute liegen sie im Bereich von mehreren Stunden bis zu wenigen Tagen, damals wahrscheinlich im Bereich von Tagen bis Wochen – waren die Konsequenz. Diese langsame Reaktionsfähigkeit des Bindemittels wird latent (versteckt) hydraulisch genannt. Bei weit fortgeschrittener Reaktion war dadurch die Dauerhaftigkeit aber nicht beeinträchtigt.

Gleichzeitig muss man sich trotzdem vor Augen halten, welchen Fortschritt die Verwendung von wasserbeständigen und unter Wasser erhärteten Bindemitteln brachte.

In der Schweiz sind Tuffvorkommen nicht bekannt. Die Bentonithorizonte im Raum Zürich (wahrscheinlich Zeu-

gen des Hegau-Vulkanismus vor 11 000 Jahren) stellen nur sehr geringe Verwitterungsrelikte von ehemaligen vulkanischen Auswurfmassen dar. Um ein hydraulisches Bindemittel zu erhalten, war deshalb der Einsatz von Ziegelmehl notwendig.

Weiterhin wird das hohe betontechnologische Niveau durch die überlieferte römische Literatur, wie z.B. die «Zehn Bücher der Architektur des Vitruv» und die Werke von Frontin, sowie die vielen Bauzeugnisse bezeugt. Vitruv war ein Baumeister, der im 1. Jh. v. Chr. lebte, Frontin war Direktor der Wasserwerke in Rom im ersten nachchristlichen Jahrhundert. In den Büchern werden genaue Anleitungen gegeben, wie die damaligen Bindemittel eingesetzt werden sollten und wie sie im Hinblick auf z.B. Frostbeständigkeit (Beigabe von Öl) und Wasserdichtigkeit (Beigabe von Teer, Leinöl) zu modifizieren sind. Konstruktionshinweise für Mauerwerk, aber auch Gewölbe sind ebenso vermerkt. Ausserdem ist der Einsatz von Betonfertigteilen in Form von Wasserrohren z.B. bei Lyon (Lambrecht 1984) bezeugt. Betonfertigteile für den Bau von Molen sind schon bei Vitruv beschrieben. Aus den vielen überlieferten – natürlich nur besonders dauerhaften oder besonders vor der Verwitterung oder Abbruch geschützten – Bauwerken ist die hohe Qualität bekannt. Die sorgfältige Abstimmung der Zusammensetzung der Baustoffe auf ihren Zweck ist ebenso überliefert wie Pusch am Bau.

2. Ziel der Untersuchung

Bei der Untersuchung von römischem Beton richtet sich das Augenmerk auf die Zusammensetzung des Baustoffes und auf das Bindemittel (hydraulisch – nicht hydraulisch). Da der heutige Zement erst seit ungefähr 150 Jahren Verwendung findet, ist es – neben dem historischen Gesichtspunkt – für die Abschätzung der Lebensdauer von Bauwer-

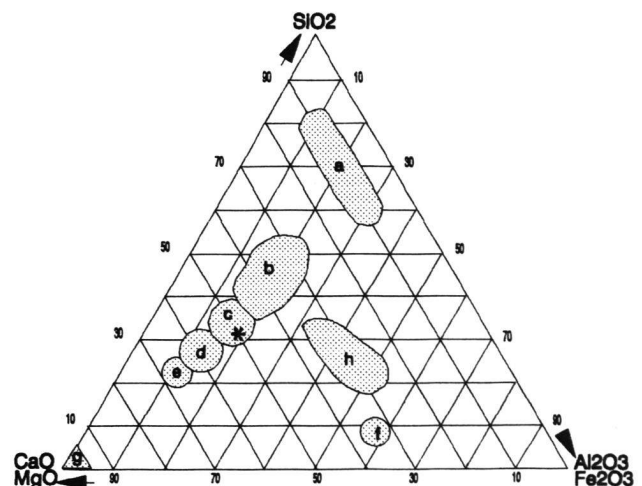


Abb. 1: Rankine-Diagramm für verschiedene Bindemittel, nach Krenkler, 1980, mit Ergänzungen aus Jäckli, 1989. a: Puzzolane, Trass, b: Hochofenschlacke, c: Hochofenzement, d: Eisenportlandzement, e: Portlandzement, f: Tonerdezement, g: Kalk, h: Zürcher Ziegeleitone, *: Bindemasse von hydraulischem Kalk.

ken (z.B. bei Endlagern für radioaktive Abfälle) wichtig, das Langzeitverhalten ähnlicher (z.B. römischer) Bindemittel zu kennen. Parallel dazu werden auch natürliche (geogene) Vorkommen (u.a. in Irland, Israel und Jordanien) von diesen Bindemitteln ebenfalls untersucht.

Durch chemische und mineralogische sowie rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen lässt sich der Art des Bindemittels auf die Spur kommen. Die Eigenschaft des zusammengesetzten Baustoffes kann mittels des mechanischen Verhaltens (z.B. Druckfestigkeit) und des Studiums der Porosität gekennzeichnet werden.

Bei all diesen Untersuchungen – nach bald zwei Jahrtausenden – darf der Einfluss der Alterung (z.B. durch den Chemismus des Grundwassers und der Atmosphäre) sowie die möglicherweise nicht zweckmässige Benutzung des Bauteils in nachrömischer Zeit nicht ausser Betracht gelassen werden.

3. Untersuchung

3.1 Allgemeines

Dem Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion der ETH Zürich wurde von der Kantonsarchäologie eine römische Betonprobe mit den Massen $40 \times 30 \times 20$ cm von der Sohle einer Frischwasserleitung aus dem 1. Jh. n. Chr. bei Hausen bei Brugg im Kanton Aargau zur Verfügung gestellt. Genauere Angaben über den Aufbau der Leitung und die Position des untersuchten Betons sind in diesem Jahresbericht bei Widmer zu finden.

Um die genaue Zusammensetzung zu bestimmen, wurden folgende Untersuchungen durchgeführt: makroskopische und mikroskopische Analyse, mineralogische und thermische Bestimmung der Zusammensetzung des Baustoffes, Bestimmung der Porosität und Permeabilität, Bestimmung der Druckfestigkeit.

3.2 Makroskopische und mikroskopische Analyse

Der römische «Beton» ist mässig verfestigt und besteht ungefähr zu 90% aus Zuschlag und 10% Matrix (Bindemittel) (Abb. 2). Bei den Zuschlägen dominiert die Fraktion > 3 cm. Die Zuschläge weisen Punkt- und Flächenkontakte untereinander auf. Dies resultiert aus dem hohen Zuschlaganteil. Die Zuschläge bestehen zu etwa einem Drittel aus roten, leicht porösen Ziegelbruchstücken bis 80 mm Grösse und zu zwei Drittel aus weissgrauen, dichten Kalkbruchstücken bis 60 mm. In der gelblichgrauen Matrix sind organische Reste (Wurzeln usw.) durch ihre schwarzbraunen Verfärbungen erkennbar. 1 bis 2 mm grosse Hohlräume, zum Teil bis zu 10 mm, sind in der Matrix häufig zu beobachten.

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen wiesen auf ein kalkiges Bindemittel (Abb. 3) und kleine Nester von nadeligen Kriställchen (Abb. 4) hin. Die Morphologie der Nadelchen weist auf Calciumsilikathydrat (C-S-H) hin, welches massgeblich für die Festigkeit im modernen Beton verantwortlich ist.

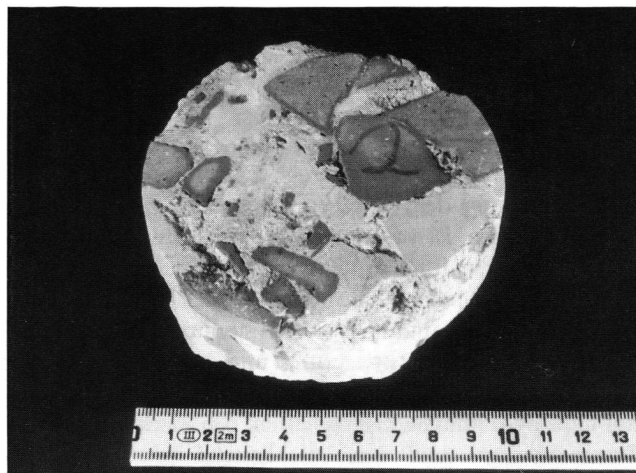


Abb. 2: Fotografie des leicht angefeuchteten Bohrkernes Nr. 2 des römischen Betons. Der Kern besitzt einen Durchmesser von 9,6 cm.

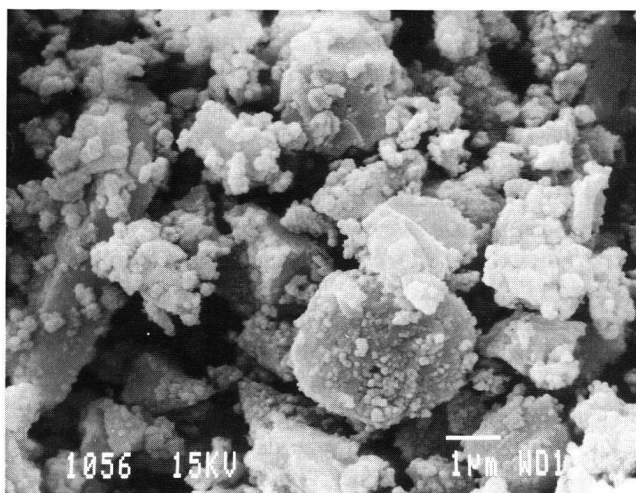


Abb. 3: Kalkiges Bindemittel.

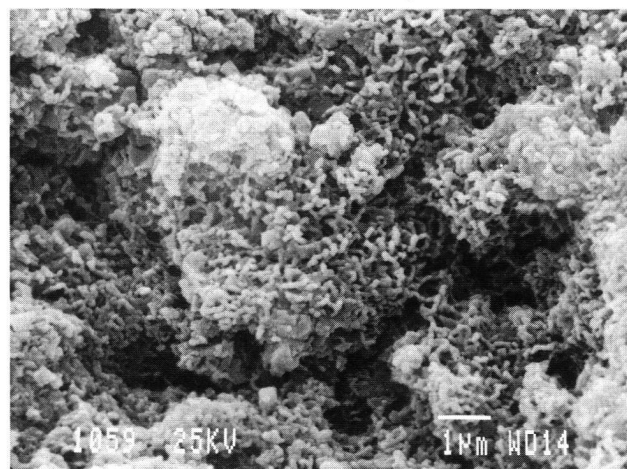


Abb. 4: Mögliche C-S-H-Kristalle von etwa $\frac{1}{1000}$ mm Länge (= $1\mu\text{m}$).

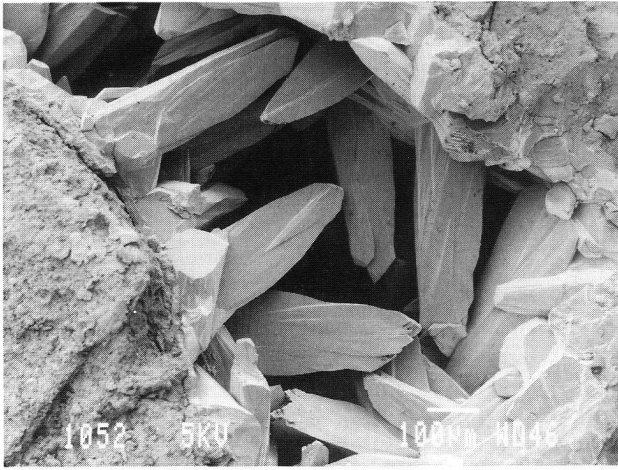


Abb. 5: Etwa 1 mm lange Aragonitkristalle in einem Riss.

Matrixpartien, die Ähnlichkeiten mit natürlichem Kalksinter aufweisen, deuten auf Neukristallisation von Kalk hin. In kleinen Hohlräumen und Klüften finden sich Neukristallisationen von Aragonit (CaCO_3) (Abb. 5).

3.3 Mineralogische Bestimmung der Zusammensetzung der Probe

3.3.1 Röntgenographische Phasenanalyse

Für eine mineralogische Bestandaufnahme wurde eine röntgenographische Phasenanalyse vorgenommen. Dafür wurden die drei verschiedenen Materialien makroskopisch ausgewählt, aus denen der römische Beton besteht: Kalkbruchstücke, Ziegelbruchstücke, Matrix (Bindemittel).

Die Auswertungen ergaben, dass im Kalzit geringe Mengen von Dolomit vorhanden sind. In den Ziegelbruchstücken wurden viel Quarz und geringe Mengen von Kalzit und Feldspat gefunden. Die Matrix weist hohe Gehalte an Kalzit und geringe an Quarz auf.

Die Matrix stellt ein Gemisch von Kalkmehl mit wahrscheinlich geringen Mengen an Ton und Quarz dar. Der Kalk entstand wahrscheinlich überwiegend durch die Karbonatisierung von gelöschtem Kalk. Der Quarz stellt eine natürliche Beimengung von Ton dar.

Die röntgenographische Phasenanalyse deutet auf keine Veränderungen im römischen Beton hin. Neukristallisationen von Kalzit, wie sie aus der optischen Beschreibung konstatiert wurden, sind möglich. Für anderweitige Um- und Rekristallisationen durch das Grundwasser gibt es keine röntgenographischen Hinweise.

3.3.2 Thermische Analyse

Thermische Untersuchungsverfahren erlauben es, Proben durch Aufheizen auf bis zu 1000°C und gleichzeitiger Analyse der aus der Probe austretenden Gase näher zu bestimmen. Diese Versuche zeigten, dass Ton in der Probe vorliegt. Der Ton könnte das Ausgangsprodukt der vor bald 1900 Jahren von den Römern gebrannten Ziegelsteine sein. Dieser könnte zum Beispiel bei zu niedrigen Tempera-

turen bzw. zu kurzer Brenndauer gebrannt worden sein, wodurch keine vollständige Umsetzung des Tons zu Ziegelstein stattfand. Des Weiteren wurde die Anwesenheit von Kalk als Bindemittel und Zuschlag bestätigt. Das C-S-H konnte einerseits durch den geringen Gehalt und andererseits durch das starke Auftreten von Ton nicht detektiert werden.

3.4 Permeabilität

An zwei erbohrten Kernen (Dichte $1,61$ und $1,71 \text{ kg/dm}^3$) wurde die Gas- und Wasserpermeabilität bei verschiedenen Drücken bestimmt. Die Versuche wurden bei verschiedenen Wassersättigungen durchgeführt. Der Unterschied bei der Messungen ist ein Mass für die Porengrößenverteilung und die Porosität.

Bei geringen Drücken setzte bereits Gas- und Wasserfluss durch die Probe ein. Dies deutet auf grosse Poren hin. Insgesamt bestätigte sich, wie durch die unterschiedlichen Rohdichten vermutet wurde, ein Unterschied in der Permeabilität der Proben untereinander (für Gas: $1,5$ bis $2,4 \times 10^{-11} \text{ m}^2$). Dieser Unterschied liegt im normalen Streubereich bei Baustoffproben. Die Sättigung mit Wasser führte zu einer drastischen Reduktion des Durchlässigkeitskoeffizienten für Gas um mehr als 3 Zehnerpotenzen auf 10^{-14} m^2 . Der Durchlässigkeitskoeffizient für Wasser lag in der gleichen Größenordnung ($2-30 \times 10^{-14} \text{ m}^2$). Dieser Wert sagt aus, dass z.B. bei einer $1 \times 1 \text{ m}$ grossen und $0,1 \text{ m}$ dicken Platte aus diesem römischen Beton, welche auf einer Seite von konstant $0,5 \text{ m}$ Wasser überschichtet ist und auf der anderen Seite durchtretendes Wasser ungehindert abfliessen kann, $0,4 \text{ ml}$ Wasser pro Sekunde bzw. 35 l/Tag durchfliessen kann. Verringert man die überstehende Wasserschicht oder erlaubt man keinen ungehinderten Abfluss – in diesem Falle umgibt die Kanalsohle ein Gemisch aus Lehm und Bruchsteinen –, so kann sich die durchsickernde Menge drastisch auf kleiner als 1% reduzieren.

Im Vergleich mit Messwerten, welche an modernen Betonen gemessen werden, entsprechen die gemessenen Werte für den römischen Beton einem Beton mit hoher Porosität und geringer Festigkeit.

3.5 Porosität

Mittels Quecksilberdruckporosimetrie wurde die Porosität und die Porengrößenverteilung bestimmt. Das Prinzip der Methode beruht darauf, dass Quecksilber im Gegensatz zu Wasser nicht von alleine in Poren eindringt. Bei dem Anlegen eines äusseren Druckes ist es möglich, das Quecksilber in die Poren zu pressen. Je höher der Druck ist, um so feiner sind die Poren, in die das Quecksilber eindringen kann. Die eingedrungene Quecksilbermenge wurde bei Drücken zwischen $0,035 \text{ bar}$ und 4000 bar gemessen. Dies entspricht Porendurchmessern von $0,36 \text{ mm}$ bis $3 \cdot 10^{-9} \text{ m}$.

Die Porosität lag im Mittel bei 30% . In Abb. 6 ist eine repräsentative Porengrößenverteilung aufgetragen. Das Hauptmaximum der Poren liegt bei $0,4$ bis $0,06 \mu\text{m}$ mit Nebenmaxima bei $200 \mu\text{m}$, $0,5$ bis $0,8 \mu\text{m}$ und um $0,01 \mu\text{m}$.

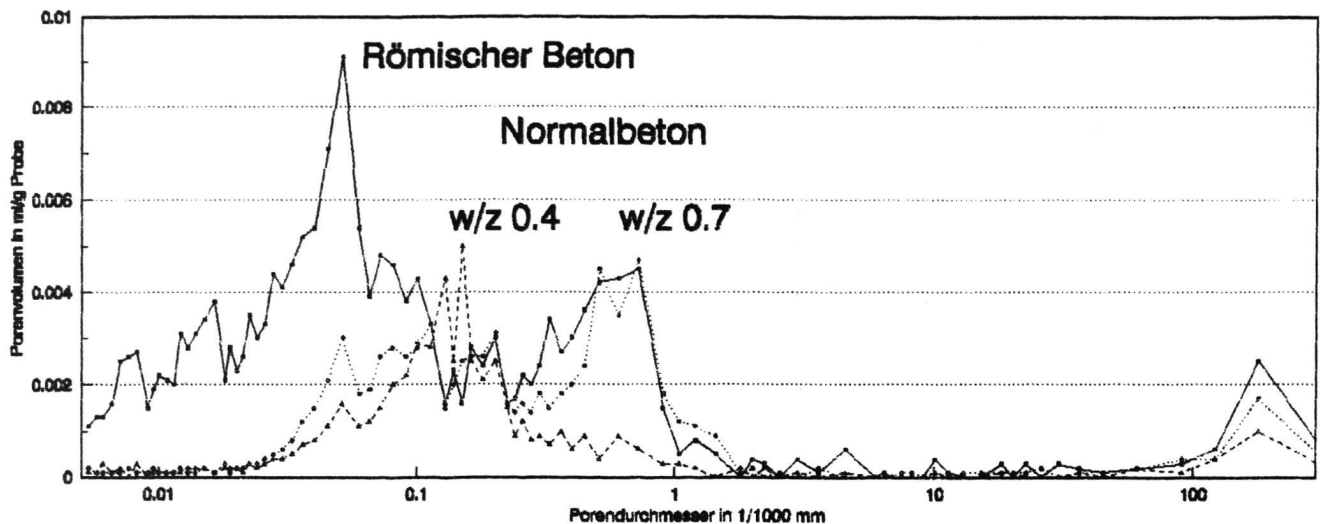


Abb. 6: Porengrößenverteilung von römischem und modernem Beton unterschiedlicher Qualität (w/z-Wert 0,4 und 0,7).

Die Porenanhäufungen bei $0,01\ \mu\text{m}$ legen ebenfalls den Schluss für die Anwesenheit von C-S-H-Gel nahe. Erhöhte Porengehalte bei $200\ \mu\text{m}$ zeugen von lokaler Makroporenanhäufung, wie sie durch ungenügendes Mischen und/oder Verdichten entstehen können. Das gemessene Porenspektrum zeigt im Vergleich zu Normalbeton (w/z-Wert: 0,4 und 0,7) eine Abweichung auf. Die Ursache liegt in den unterschiedlichen Bindemitteln und im möglichen Alterungsprozess des römischen Betons. Der römische Beton besitzt Luftkalk und untergeordnet latent hydraulisches Ziegelmehl als Bindemittel. Mögliche Auslaugungen im Boden können ebenfalls zu einer erhöhten Porosität führen.

Die ermittelten Rohdichten lagen um $1,8\ \text{kg}/\text{dm}^3$ und die Reindichten (ohne Poren) um $2,7\ \text{kg}/\text{dm}^3$. Normalbeton weist wegen der geringeren Porosität Rohdichten von $2,4\ \text{kg}/\text{dm}^3$ und Reindichten von $2,7\ \text{kg}/\text{dm}^3$ auf.

3.6 Druckfestigkeit

Bei einer Probe konnte an einem Zylinder ($d=9,6\ \text{cm}$, $h=5\ \text{cm}$) die Druckfestigkeit bestimmt werden. Sie lag bei $2\ \text{N}/\text{mm}^2$. Dies erlaubt somit eine Belastung von $20\ \text{kg}/\text{mm}^2$. Die Probennahme sowie die Durchlässigkeitsversuche könnten eine Gefügeflockerung verursacht haben und somit zu so einer geringen Druckfestigkeit geführt haben.

4. Schlussbemerkungen

Der untersuchte römische Beton zeigt, dass seine Zusammensetzung einem Beton geringer Qualität entspricht. Das Bindemittel ist überwiegend Kalk und in geringen Mengen C-S-H-Gel. Das Material ist somit nur ein leicht hydraulisches Bindemittel, es löst sich sehr langsam beim Kontakt mit Wasser auf. Es handelt sich somit um keinen Beton im heutigen Sinne. Dieser poröse Baustoff mit geringer Festigkeit würde auch heute noch als Verfüll- oder Ausgleichsmaterial Verwendung finden. Durch die hier angewendete

Bauweise (Lehm-Bruchsteinhinterfüllung) ist mit nur sehr geringen Sickerwasserverlusten zu rechnen gewesen. Insgesamt deutet die untersuchte Probe auf gute betontechnologische Kenntnisse seiner Bauherrn hin, da sie die Zusammensetzung (viel Zuschläge, kalkiges Bindemittel) der Funktion (Ausgleichsmaterial) anpassten. Die mineralogische Zusammensetzung legt die Verwendung von Rohstoffen aus dem Jura nahe.

5. Literatur

- Frontin, S. J. (1979): Wasser für Rom (Deutsch von M. Hainzmann).
- Jäckli, H. (1989): Geologie von Zürich. Orell Füssli Verlag.
- Krenkler, K. (1980): Chemie des Bauwesens. Springer Verlag.
- Lambrecht, H. O. (1984): Opus caementitium. Beton Verlag.
- Röder, J. (1960): Römische Tuffsteinbrüche der Vordereifel. Umschau 1960, 1.
- Vitruv (1976): Zehn Bücher über die Architektur (Deutsch von C. Fensterbusch).