

VERWENDUNG VON BETON BEI WASSERBAUTEN IN DER ANTIKE

The use of concrete for hydraulic structures
in the ancient world



Prof. Dr.-Ing. Heinz-Otto Lamprecht
Studium des Bau-Ing.-Wesens an der TH Hannover bis 1951.
Anschließend Assistent an der TH, Leiter der Forschungs-
stelle Sylt (Küsten-Ingenieur-Wesen) und Bauleiter in
der Bauindustrie; 1955 Promotion.
1962 Leiter der Bauberatungsstelle Frankfurt des Bun-
desverbandes der Deutschen Zementindustrie, seit 1974
technischer Geschäftsführer dieses Verbandes und Leiter
der Bauberatung Zement.
Lehraufträge 1973 an der TH Darmstadt und seit 1979 an
der RWTH Aachen; 1984 Ernennung zum Honorar-Professor.

Veröffentlichungen aus den Bereichen Betontechnik,
Wasserbau, Straßenbau, Architektur und Archäologie.
Verfasser u. a. des Buches "Opus Caementitium - Bautech-
nik der Römer".

Inhaltsangabe

Die Entstehungsgeschichte des Betons, die maßgeblich durch römische Baumei-
ster beeinflusst wurde, wird anhand von Infrastruktur-Bauten dargestellt.
Dabei bilden Wasserbauwerke wie Wasserversorgungs- und Abwasseranlagen so-
wie Häfen ein anschauliches Beispiel.

Summary

The genesis of concrete as a building material has been influenced by Roman
architekts and is described with examples of civil engineering structures.
Hydraulic structures as water-supply and sewage plants as well as harbors
give a vivid example of it.

* Bundesverband der deutschen Zementindustrie, Köln

<u>INHALT</u>	Seite
1 Einführung	81
2 Römischer Beton	81
3 Wasserleitungen	85
4 Zisternen	88
5 Talsperren	88
6 Abwasseranlagen	89
7 Häfen	91
8 Rationalisierung	94

1 Einführung

Heute bestehen in unseren Breiten weit mehr als 50% aller Bauwerke aus Beton, da dieser Baustoff beliebig formbar, dauerhaft und wirtschaftlich ist. Daß schlechte gestalterische Lösungen zu häßlichen Einzelbauten und Massensiedlungen geführt haben, ist nicht Schuld des Baustoffs. Neuerdings kommen die drei Forderungen des römischen Baumeisters Vitruv ("Zehn Bücher über die Baukunst", etwa 20 v. Chr.) an das ideale Bauwerk wieder zu Ehren: Sicherheit, Zweckmäßigkeit, Schönheit.

Vorläufer des heutigen Betons ist das Opus Caementitium (Römischer Beton), das römische Baumeister bereits vor der Zeitenwende angewendet haben (vergl. LAMPRECHT: Opus Caementitium - Bautechnik der Römer, Düsseldorf 1984).

2 Römischer Beton

Der aus dem Lateinischen stammende Begriff Opus Caementitium (eigentlich: Opus Caementicium) setzt sich aus den Worten Opus (Werk, Bauwerk, Bauteil, Bauverfahren u.a.) und Caementitium (von Caementum = der behauene Stein, auch Bruchstein, Mauerstein, Zuschlagstoff; nach Begriffswandel Ursprung für unser heutiges Wort Zement) zusammen. Caementum wurde mit Materia (hier: Mörtel; andere Bezeichnung: Mortar) gemischt und ergab nach Er-

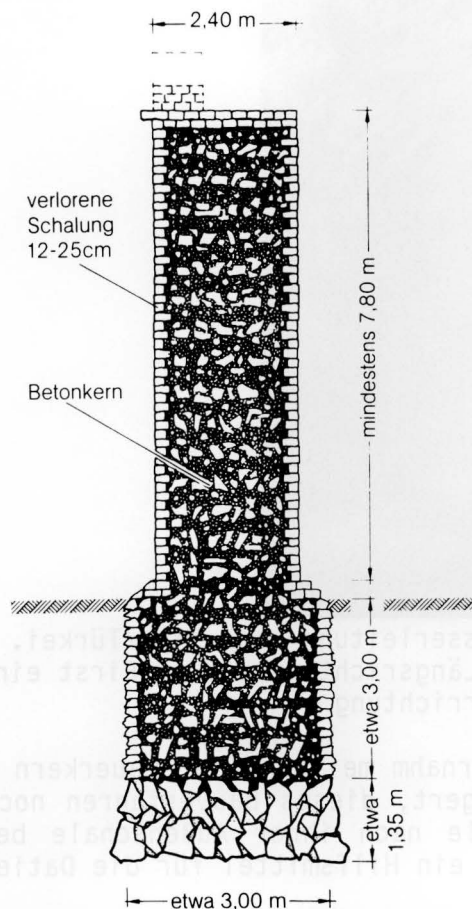


Bild 1: Stadtmauer Köln aus Opus Caementitium. Man erkennt die Außenschale sowie den lagenweise eingebrachten Römischen Beton

härtung des Bindemittels ein Konglomeratgestein von sehr hoher Druckfestigkeit. Da dessen Aussehen und Eigenschaften unserem heutigen Beton entsprechen, werden in der Archäologie und der Baugeschichte dafür die Bezeichnungen Gußmauerwerk, Gußbeton, Klamottenbeton, Kalkbeton, Zementmauerwerk oder - am häufigsten - Beton bzw. Römischer Beton verwendet. Opus Caementitium bedeutet also ein Herstellverfahren für druckfeste Bauteile aus Mörtel und Steinen. Die Form des Bauteils ergab sich durch eine Schale, die aus vorher aufgemauerten Steinen bestand oder durch eine Schalung aus Holzbrettern und -balken. Die Holzschalung wurde nach Erhärten des Bauteils - wie heute - meistens wieder entfernt und konnte erneut verwendet werden. Es entspricht der heutigen Terminologie, auch das Ergebnis dieses Herstellverfahrens - d.h. den erhärteten Baustoff einschließlich der Schale - als Opus Caementitium zu bezeichnen. Opus Caementitium ist daher, je nach Zusammenhang, mit "römische Betonbauweise" oder "Römischer Beton" zu übersetzen.



Bild 2: Schalbrettabrücke in der Wasserleitung nach Side/Türkei.
Man erkennt die Abdrücke in Längsrichtung und am First einen etwa 50 cm breiten Bereich in Querrichtung

Bei römischen Betonkonstruktionen übernahm meistens der Mauer Kern die tragende Funktion. Es hat sich eingebürgert, dieses Bauverfahren noch weiter aufzugliedern, indem man die Bauteile nach ihrer Außenschale bezeichnet (z.B. Opus Incertum) - heute übrigens ein Hilfsmittel für die Datierung.

Insgesamt gesehen wurde der Römische Beton zunächst als eine leistungsfähigere und billigere Bauweise für Stadtmauern, Speicherhäuser, Hafenanlagen,

Aquädukte, Wasserleitungen u.a. entwickelt. Seit der Mitte des 1. nachchristlichen Jahrhunderts entdeckten begabte Baumeister durch den Einsatz dieses Baustoffs neue Möglichkeiten zur Raumgestaltung, indem sie ihn zu Tonnengewölben und Kuppeln mit teilweise gewaltigen Abmessungen formten.

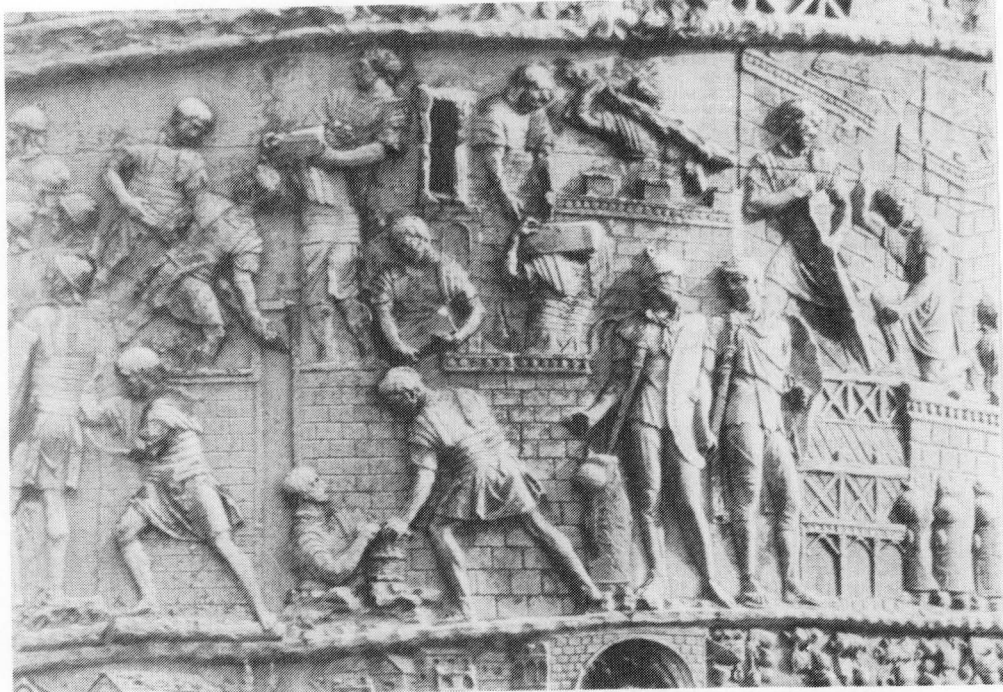


Bild 3: Bau einer römischen Stadtmauer aus Opus Caementitium. Ausschnitt aus der Trajans-Säule in Rom. Von unten links werden die Steine für die Außenschale hochgereicht, von unten rechts die Mörtelbehälter. Die Säule wurde 113 n. Chr. eingeweiht.

Unsere Kenntnisse über den Römischen Beton stammen aus zeitgenössischen Schriften (vor allem von Vitruv), aus zeitgenössischen Darstellungen (Plastiken, Reliefs, Zeichnungen) sowie aus heutigen Untersuchungen römischer Bauten. Insgesamt läßt sich sagen, daß die Baugeschichte mit dem Römischen Beton einen Höhepunkt erreicht. Bedeuten doch z.B. die heute gemessenen Druckfestigkeitswerte bis 40 NN/mm^2 , daß ein Quadratzentimeter der Oberfläche einer Belastung von etwa 400 kg standhielt, ehe die Probe zerbrach. Heute liegen etwa 3/4 aller Betonneubauten mit ihren Festigkeitswerten in dieser Größenordnung oder niedriger.

Als Zuschläge bevorzugten die Römer aus Kostengründen örtlich anstehendes Material. Die Kornzusammensetzung erfolgte nach ähnlichen Gesichtspunkten wie in unserer Zeit. Die Ermittlung zweier antiker Sieblinien zeigte, daß diese römische Kornzusammensetzung auch unsere heutigen Bauvorschriften erfüllt. Als Ausgangsgestein für das Bindemittel wurden im wesentlichen die gleichen Arten benutzt wie heute für Zement und Baukalk. Häufig setzte man dem Beton puzzolanische Stoffe wie Trass oder Ziegelmehl zu.

Der Römische Beton wurde in Schichten eingebracht. Wegen einer gleichmäßigen Lastübertragung im Bauwerk ist dieses Vorgehen auch heute vielfach üblich. Bei sachgemäßem Verbund der Schichten durch Stampfen ergab sich so ein Bauteil "aus einem Guß" mit ähnlichen Eigenschaften wie vergleichbarer Naturstein.

Bauwerk	Bauzeit	Druckfestigkeit: Mittelwert	Rohdichte lufttrocken (bei 105 °C)	Bindemittel (vermutetes Ausgangsgestein)
	n.Chr.	N/mm ²	kg/dm ³	
Stadtmauer Köln	50 bis 69	15	2.2	Dolomitkalk (Dolomitkalkstein) mit Trass
Säulengrundamente Side/Türkei	Anfang 2. Jahrh.	36	2.1 (1.9)	Kalk (Kalkstein) mit Puzzolan, wahrscheinlich eisenfreies Ziegelmehl
Gewölbe Kaiserthermen Trier	280 bis 300	17	(1.8)	Dolomitkalk (Dolomitkalkstein)
Wasserbecken Martinsviertel Köln	Mitte 1. Jahrh.	8	(1.5)	Kalk (Kalkstein) mit Puzzolan, wahrscheinlich Trass und Ziegelmehl
Wasserleitung nach Köln, Hermülheim	1. Jahrh.	37	2.6	Kalk (Kalkstein) mit Trass
Estrich für Mosaik, Kreuznach	Mitte 3. Jahrh.	22	(1.4)	Kalk (Kalkstein)
Heutiger Beton für Ingenieurbauten (z.B. Brücken)		40 bis 60	etwa 2.4 (etwa 2.3)	Zement (Mischung aus Kalkstein und Ton)

Die Druckfestigkeit von Beton wird in N/mm² gemessen (N = Newton), die Festigkeit von 10 N/mm² entspricht etwa dem Druck von 100 kg auf eine Fläche von 1 cm².

LAMPRECHT opus caementitium

Bild 4: Ergebnisse von Materialprüfungen an Römischen Beton

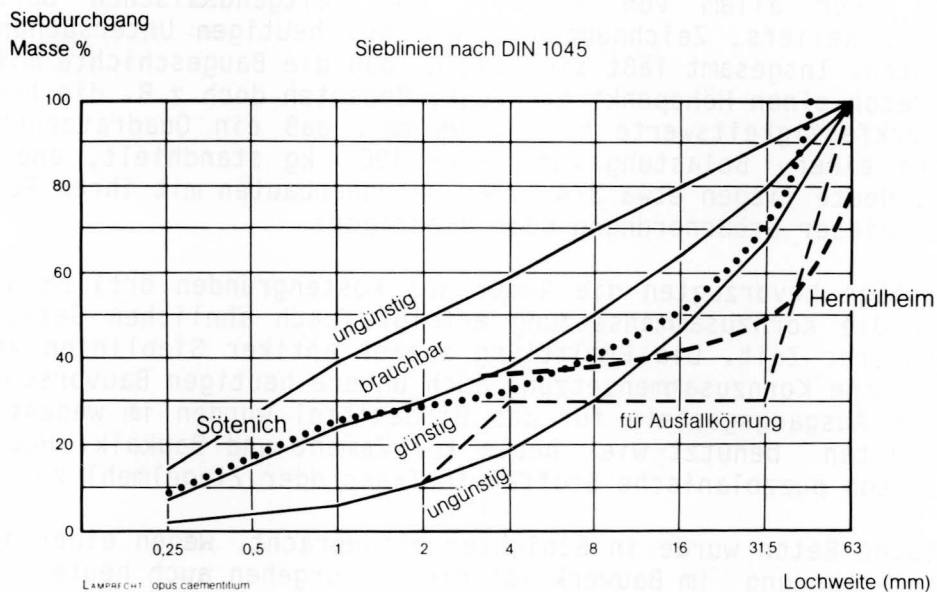


Bild 5: Sieblinien von Materialprüfungen am Beton der römischen Wasserleitung nach Köln

3 Wasserleitungen

Voraussetzung für jedes menschliche Leben ist das Wasser; das zeigt sich besonders in Ländern mit trockenem und heißem Klima. So ist es kein Wunder, daß die Römer bei ihrer Geschicklichkeit und ihren Möglichkeiten auch die klassischen Wasserbauer wurden.

Die einfachste Art der Wasserversorgung bilden Zisternen (Wasserspeicher), in denen das Regenwasser gesammelt wird. Weitaus unabhängiger vom Regen sind natürlich ein Bach, ein Fluß oder eine Quelle. Wir kennen außerdem mehrere aus Flüssen abgezweigte Wasserleitungen. Wohlgeschmeckender als Flußwasser ist jedoch Quellwasser. Aus diesem Grunde entstanden nach und nach eine Vielzahl von Wasserleitungen, die frisches Quellwasser in die Städte brachten.

In der Kaiserzeit baute man sie fast immer aus Opus Caementitium und deckte diese Kanalleitungen mit Natursteinplatten oder einer Betonwölbung ab. Auf Brückenkonstruktionen wurden sie über Täler und mit Hilfe von Tunneln durch Berge geführt. Im deutschen Sprachgebrauch hat es sich eingebürgert, eine über eine Bogenkonstruktion geführte Wasserleitung als Aquädukt zu bezeichnen, obwohl die Übersetzung des lateinischen Wortes eigentlich Wasser-



Bild 6: Aquädukt bei Lyon/Frankreich. Die Pfeiler bestehen aus Römischen Beton mit einer Schale aus Natursteinen und Ziegeln.

führung bedeutet, sich also auf die gesamte Leitung beziehen müßte. Seit einiger Zeit gibt es bei uns ein amtliches Hinweiszeichen auf archäologische Stätten: es zeigt einen stilisierten Aquädukt.

Vitruv war auch ein erfahrener Vermessungsingenieur und forderte für eine Wasserleitung ein gleichmäßiges Gefälle zwischen 0,25 und 0,50 %. Seine Bücher enthalten ausführliche Beschreibungen für die Konstruktion des städtischen Netzes vom Wasserschloß am Stadtrand bis zum Endverbraucher. Im Gegensatz zu den größeren Überlandleitungen aus Römischen Beton verwendete man in der Stadt häufig Druckleitungen und schaltete im Bedarfsfall "Wassertürme" dazwischen. Diese Druckleitungen bestanden aus Blei- oder Tonrohren; es sind aber auch Elemente aus Holz und Stein und sogar "Beton"-Fertigteile im Gebrauch gewesen.

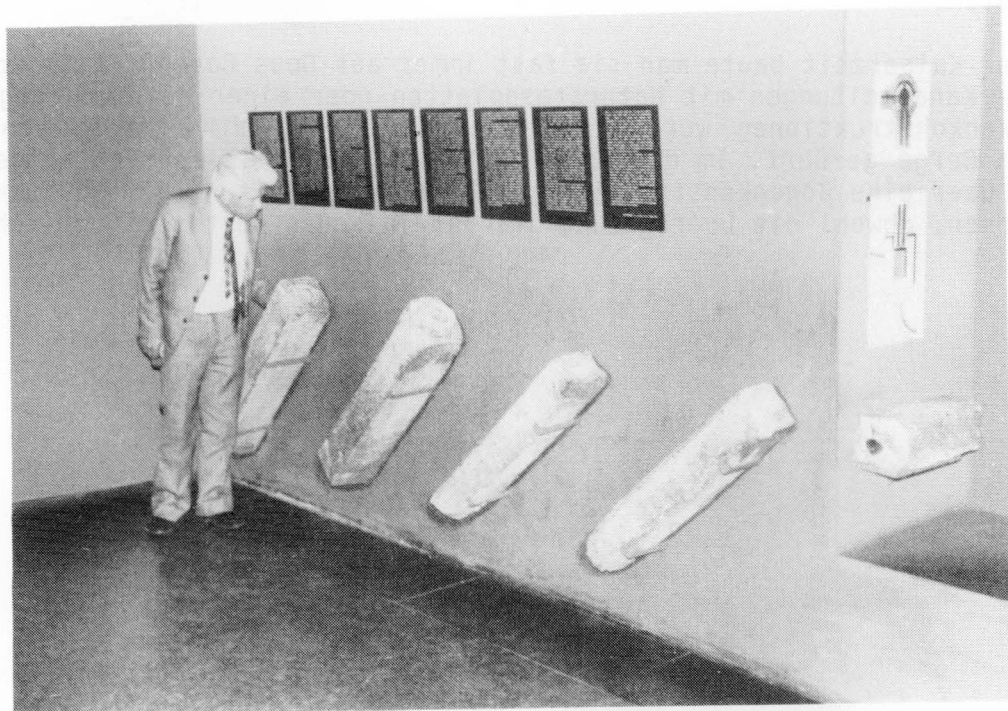


Bild 7: Wasserrohre aus "Beton"-Fertigteilen im Archäologischen Museum in Metz/Frankreich.

Die meisten Wasserleitungen führten nach Rom. Der "Nabel der Stadt" und damit des Weltreiches ist auf dem Forum Romanum sogar durch ein rundes Bauwerk markiert. Der römische Baumeister Frontinus hat uns eine exakte Beschreibung aller neun Leitungen hinterlassen, die am Ende des 1. Jahrhunderts n. Chr. nach Rom führten. Dort mußten damals etwa 700 000 Einwohner mit Wasser versorgt werden. Nach vorsichtiger Schätzung lag das tägliche Trinkwasserangebot zwischen 370 und 450 Litern pro Kopf.

Auch die germanischen Provinzen konnten mit beachtlichen römischen Bauwerken dieser Art aufwarten. Die Stadt Köln erhielt im 2. Jahrhundert n. Chr. eine insgesamt rund 100 km lange Wasserleitung, nachdem die kürzeren Versorgungsstränge des 1. Jahrhunderts n. Chr. aus dem Vorgebirge nicht mehr ausreichten. Man entschied sich jedoch nicht für zusätzliche Quellengebiete in der Nähe von Köln, sondern - wegen der besseren Wasserqualität - für weit entfernte Vorkommen in der West-Eifel. Die Eifelwasserleitung mit ihren Leitungsästen und dazu die älteren Versorgungsstränge hatten eine Gesamtlänge von fast 130 km. Für den Bau waren etwa 500 000 Tagewerke erforder-

derlich; dem entspricht bei 250 Arbeitern in mindestens 13 Baulosen eine Bauzeit von etwa vier Jahren.

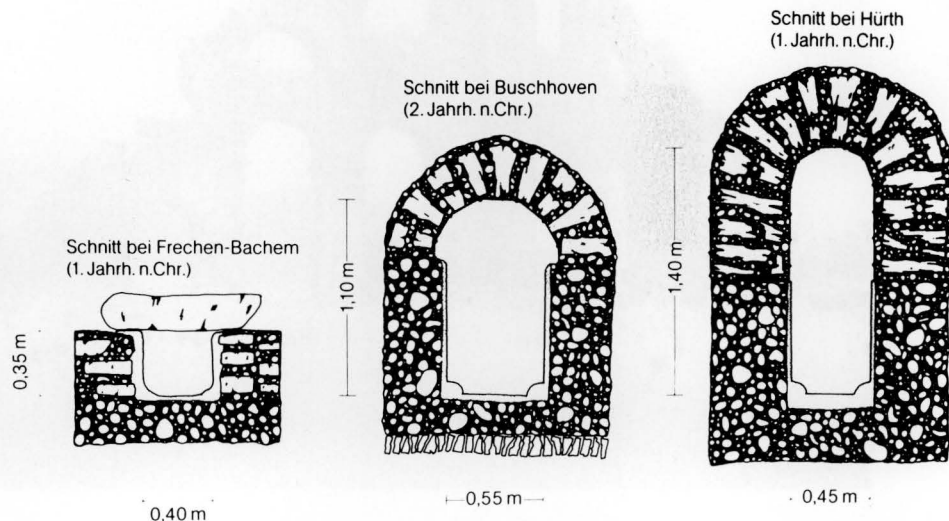


Bild 8: Schnitte durch die römische Wasserleitung aus der Eifel nach Köln

Die Leitung besteht in ihrem unteren Querschnittsteil meistens aus Opus Caementitium mit einem Innenputz, den man mit einem Gewölbe aus vermörtelten Natursteinen (über einem Lehrgerüst betoniert) überdeckte. Der Querschnitt schwankt je nach Durchflußmenge, ist aber meistens so groß, daß ein Mann mindestens durchkriechen konnte. Im Raum Köln hat die ältere Leitung eine lichte Höhe von etwa 1,70 m. Für die Kontrolle waren Einstiegschächte angeordnet. Bei gefährlichen Geländeeinschnitten untertunnelte man die Leitung, um einen Abfluß nach Sturzregen quer zur Leitung zu ermöglichen. Täler wurden beim Bau mehrfach mit Hilfe von Aquädukten überquert. Spätestens im 5. Jahrhundert geriet die Eifelleitung außer Betrieb und wurde in den folgenden Jahrhunderten zu einem beliebten "Steinbruch" für die Umgebung.

Bei Planungen von Wasserleitungen durch ein Tal untersuchten die römischen Baumeister gemäß Vitruv zunächst die drei Alternativen: Umgehungsschleife, Aquädukt und Druckleitung. Die Wirtschaftlichkeit gab dann den Ausschlag. Taltiefen bis zu etwa 50 m überwand man im allgemeinen durch einen Aquädukt; tiefere Täler durch eine Druckleitung, wie z.B. bei Lyon/Frankreich, Laodikeia/Westtürkei und Aspendos/Südtürkei.

Die antike Stadt Aspendos erhielt ihr Trinkwasser über eine im Grundriß zweimal geknickte Druckleitung aus Steinrohren. Jeweils an den Knickpunkten wurden zwei etwa 30 m hohe massive Rampenbauwerke errichtet, die einen oben offenen Behälter für den Druckausgleich des Wassers trugen. Den römischen Baumeistern war - sicher aus leidvoller Erfahrung - bekannt, daß bei Druckleitungen besonders an Knickpunkten leicht Brüche auftraten. Die riesigen Ruinen der Rampenbauwerke bei Aspendos bilden auch heute noch ein eindrucksvolles Beispiel römischer Wasserbaukunst.



Bild 9: Aspendos/Türkei. Zum Abbau des schädlichen Druckes an zwei Knickpunkten der dortigen Druckwasserleitung wurden rund 30 m hohe "Wassertürme" errichtet, die oben offene Behälter trugen.

4 Zisternen

Becken und Vorratsbehälter für Brauch- und Trinkwasser sind seit alters her bekannt. Die zahllosen noch heute vorhandenen Zisternen aus römischer Zeit weisen Rauminhalte bis zu etwa 100 000 m³ auf. Sie liegen häufig verdeckt unter der Erdoberfläche; wir kennen aber auch oben offene Anlagen. Neben den Zisternen für den Privatbedarf, die sich in allen Teilen des Imperiums befinden, verdienen die Großbauten dieser Art eine besondere Beachtung. Dazu gehören die "Piscina Mirabilis" in Misenum bei Pozzuoli (15 m tief und 70 x 25 m Grundfläche) und die Fildami-Zisterne am Stadtrand von Istanbul/Türkei. Dieses oben offene Bauwerk mit 11 m hohen Mauern aus Opus Caementitium hat eine Grundfläche von 127 x 76 m, faßte also etwa 100 000 m³ Wasser. Die Umfassungsmauer wurde zur Erhöhung der Stabilität bogenförmig ausgebildet und zeigt eine Schale aus Naturstein und Ziegeln mit Putz.

5 Talsperren

Wenig bekannt sind römische Talsperren, obwohl ihre Zahl in die Hunderte ging. Sie wurden fast ausschließlich als Gewichtsstaudämme oder -mauern ausgeführt; es gibt aber auch Anfänge der "Bogenstaumauer". Neben reinen Erddämmen und reinen Betonkonstruktionen sind kombinierte Bauweisen aus Erde sowie Stein oder Beton üblich.

Römische Talsperren enthielten - wie auch heute üblich - im allgemeinen einen oder mehrere Wasserentnahmetürme neben der Mauer und in der Mauerbasis einen Grundablaß. Zahlreiche Talsperren können - meistens als Reste - noch heute in Spanien, Nordafrika und Vorderasien besichtigt werden.

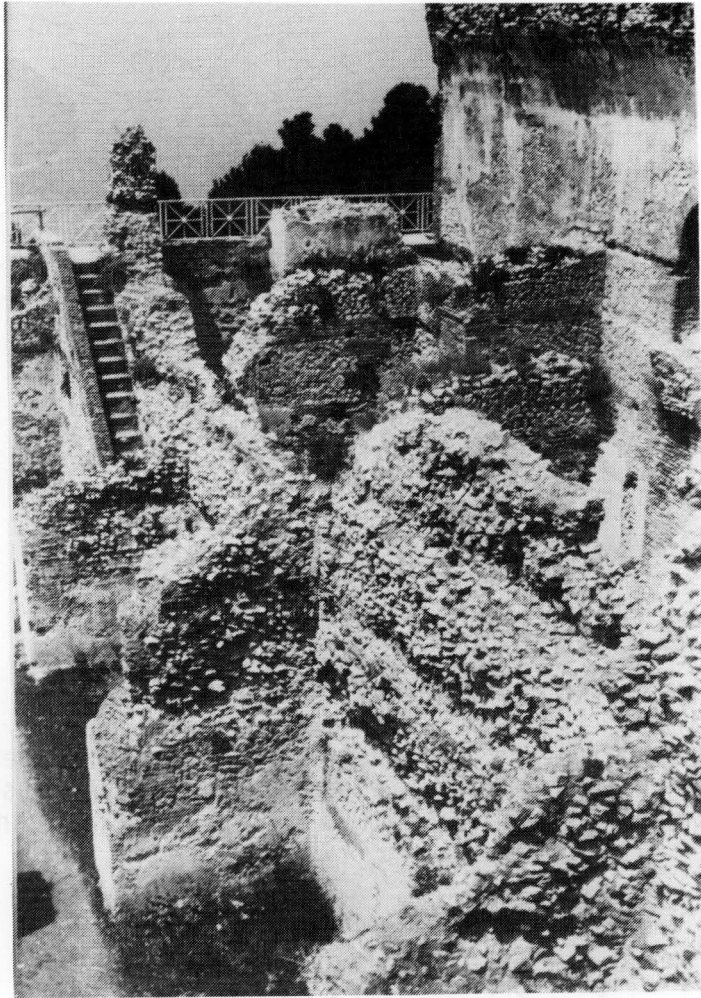


Bild 10: Zisternen-Komplex der Tiberius-Residenz auf Capri. Der Speicherbereich umfaßte vier Großbehälter vom etwa 28 x 6,5 m Grundfläche und zahlreiche kleinere Becken.

6 Abwasseranlagen

Viel Wasser bedeutet viel Abwasser. Auch auf diesem - besonders in heißen Zonen "anrühigen" - Gebiet haben die Römer Maßstäbe gesetzt. Die bekannte Cloaca Maxima in Rom geht in ihren Anfängen auf König Tarquinius Priscus zurück (um 500 v. Chr.), als die systematische Entwässerung der sumpfigen Niederungen zwischen den sieben Hügeln begann. Der ursprünglich offene Kanal zeigt in seinem Grundriß noch deutlich den Verlauf eines Baches und wurde nach und nach überbaut. In den folgenden Jahrhunderten kamen Erweiterungen, Reparaturen und sonstige Veränderungen hinzu. Zur Kaiserzeit konnten die Kanalinspektoren ihre Arbeiten bereits mit einem Kahn verrichten: die Abmessungen der Cloaca Maxima gehen nämlich bis zu mehr als 3 m Breite und mehr als 4 m Höhe. In den ersten Jahrhunderten verwendeten die Römer zum Bauen große Natursteinquader (Tuff, Kalkstein und für den Boden Lava), später kamen Ziegel und vor allem Opus Caementitium hinzu.

Abwasseranlagen sind aus vielen anderen Städten bekannt. In Köln hat man z.B. drei der bisher nachgewiesenen zehn Hauptsammler teilweise freigelegt.

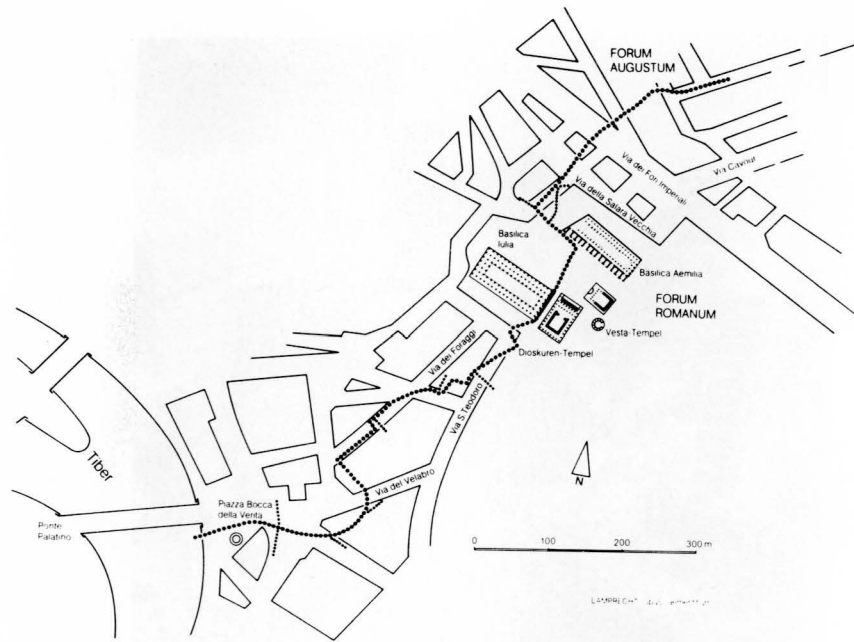


Bild 11: Cloaca Maxima in Rom, Übersicht

Sie ziehen in östlicher Richtung zum Rhein und verlaufen unter den alten Straßenzügen, die sie gleichzeitig entwässerten. Große Abwässerkanäle in Massivbauweise sind auch im Stadtgebiet von Trier mehrfach angeschnitten worden.

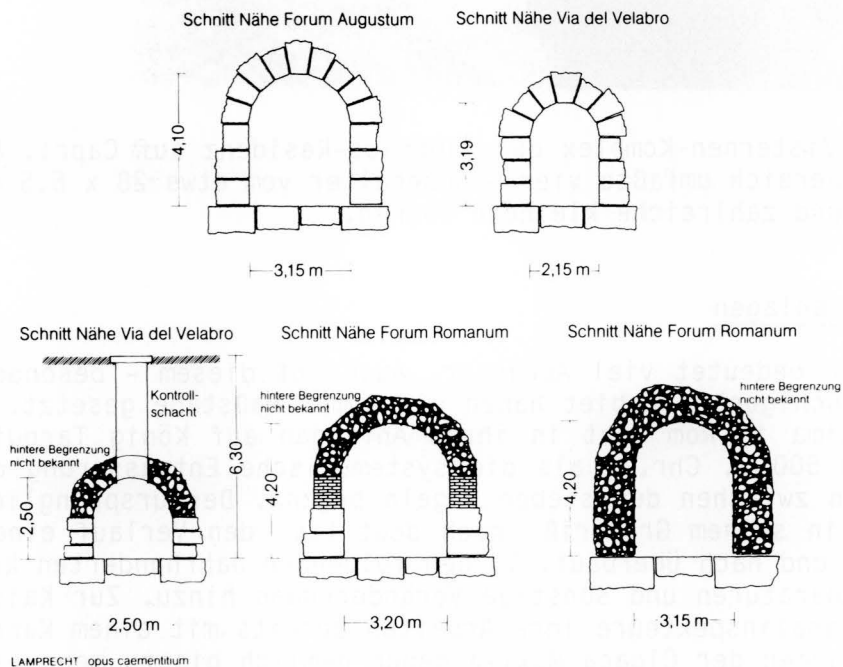


Bild 12: Cloaca Maxima in Rom, Querschnitte, siehe Bild 11

Zu den meisten römischen Straßen gehörte eine wirkungsvolle Entwässerung. Staatsstraßen hatten einen gewölbten Querschnitt mit seitlichem Rand für

den störungsfreien Abfluß. In vielen Stadtstraßen wurde das Wasser in bestimmten Abständen durch Abflußöffnungen in die unterirdischen Sammler aufgenommen.

7 Häfen

Rom baute sein Imperium zunächst im wesentlichen mit Hilfe der Landheere auf. Daneben spielten von Anfang an die See-, Küsten- und Flußschifffahrt eine Rolle. In den beiden ersten Jahrhunderten n. Chr. wurde auch die militärische Flotte zu einem wichtigen Instrument. Eine Voraussetzung dafür waren leistungsfähige und sichere Häfen. Hafenanlagen wurden möglichst dort errichtet, wo von Natur aus günstige Voraussetzungen bestanden (Felsriffe als Wellenschutz, Bäche und Flüsse für Sandausspülungen des Hafenbeckens usw.). Diese Voraussetzungen wurden in der Kaiserzeit durch Ingenieurbauten mit teilweise riesenhaften Ausmaßen ergänzt oder sogar ersetzt. Alle Häfen wiesen eine ähnliche Konzeption auf: ein ein- oder zweiteiliges Hafenbecken wurde nach See zu durch zwei bogenförmige Molen geschützt, vor deren Öffnung meistens eine dritte lag. So konnten auch bei Sturm die Wellen nicht direkt in das Becken einlaufen. Die Molen bestanden aus Steinschüttungen, Steinmauern, Mauern aus Opus Caementitium oder einer Kombination. Die Ränder der Becken wurden mit Vorratsspeichern und Büros, an exponierten Punkten auch mit Tempeln und Leuchttürmen besetzt.

Vitruv gab für den Hafenbau viele interessante Anregungen. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen forderte er eine sorgfältige Platzauswahl, um künstliche Molen möglichst zu vermeiden und die Baukosten gering zu halten. Die Hafeneinfahrt sollte äußerst stabil angelegt werden, damit man sie im Bedarfsfall mit Ketten absperren konnte. Zum führenden Hafen Italiens und einem der bedeutendsten des Mittelmeeres in republikanischer Zeit entwickelte sich die Stadt Pozzuoli. Die antike Mole des Hafens ist aus Bildern und Stichen noch bekannt. Nach der Zeitenwende verlagerte sich die Bedeutung von Pozzuoli als Hafen allmählich nach Ostia, dem "Tor von Rom" an der Tibermündung. Nach der ersten Bauphase unter Augustus und Nero traten bald erhebliche Versandungen auf; Trajan erbaute daher zwischen 100 und 106 n. Chr. einen neuen, nach ihm benannten Hafen. Dieser bestand aus einem symmetrischen sechseckigen Becken von 322 000 m² Fläche mit einem Anschlußkanal und besaß rund 1970 m Kaimauern aus Opus Caementitium. Man schätzt, daß für dieses Vorhaben 2,4 Mill. m³ Erde bewegt und etwa 550 000 m³ Baumasse (Opus Caementitium mit Steinverkleidung) verarbeitet werden mußten. Für den Bau der drei Molen in Ostia entwickelten die Baumeister ein besonders rationelles Verfahren: Man füllte ausgediente Schiffe mit Steinen oder sogar mit römischem Beton, schwamm sie zur Einbaustelle und versenkte sie dort. Bei Bauarbeiten für den Flughafen Leonardo da Vinci bei Rom, der im Bereich des antiken Hafens liegt, wurden vor einiger Zeit bei Erdarbeiten zahlreiche Schiffsreste ausgegraben.

Die am besten erhaltene antike massive Hafenmole (aus Opus Caementitium) liegt in Ampurias/Spanien. Sie ist etwa 85 m lang, 6 m breit und 7 m hoch. Weitere bemerkenswerte Reste von Hafenmolen sind in Side/Südtürkei vorhanden. Die in der Antike reiche Handelsstadt verfügte über zwei gewaltige Hafenanlagen, die von Molen geschützt waren. Mit Hilfe moderner archäologischer Taucher-Untersuchungen konnten die drei von Vitruv empfohlenen Bauverfahren für Hafenmolen nachgewiesen werden: die Herstellung von Unterwasser-Beton, die Kastenfangedamm-Methode und der Bau von großen Betonblöcken zum späteren Versenken ins Wasser.



Bild 13: Mole für den antiken Hafen Ampurias/Spanien. Das heute 85 m lange Bauwerk besteht aus Römischen Beton mit Steinblöcken als Schale.

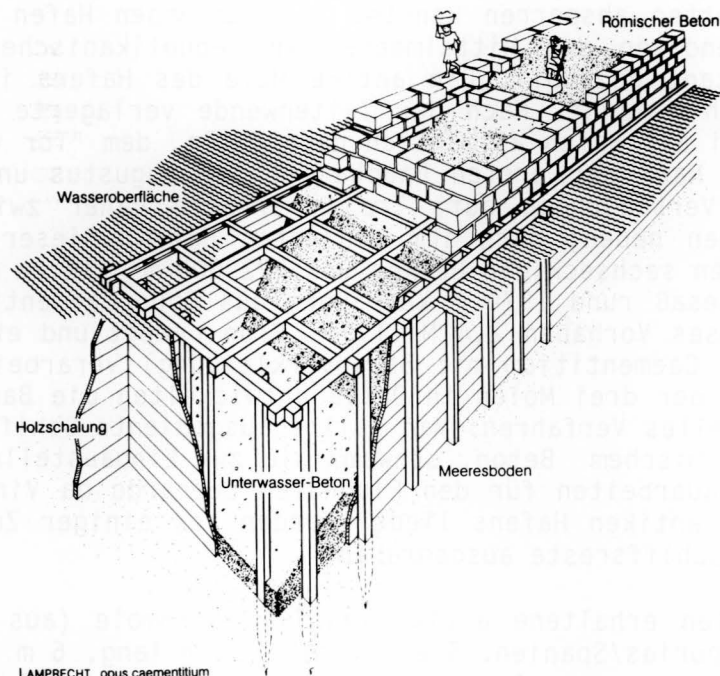


Bild 14: Herstellung einer Hafemole mit Unterwasser-Beton gemäß Vitruv. Zum Bau wurden hölzerne Schalwände mit Hilfe von Balken ins Wasser gebaut und der speziell hergestellte hydraulische Beton in das so entstandene wassergefüllte Becken geschüttet.

Ein anderer interessanter Hafen war Misenum, am Westende der Bucht von Pozzuoli. Mit zwei Becken und natürlichen Molen stellte er den fast idealen Naturhafen dar. Das Vorhafenbecken ist seitlich durch eine Felswand des Kap von Misenum und eine parallel dazu verlaufende Felsbarriere begrenzt. In diese Felsbarriere brachen die Römer mehrere Öffnungen, so daß die Uferlängsströmung durch die Öffnungen in die Hafeneinfahrt gelenkt wurde und dort einer Versandung entgegenwirkte.

Aus Beschreibungen, von Bildern und aus Bauwerksresten wissen wir, daß wichtige Häfen meistens mit Leuchttürmen ausgestattet waren. Stark verfallene und romantische Ruinen gibt es an vielen Stellen, z.B. auf Capri. Diese Insel vor dem Golf von Neapel bildete den Alterssitzung des Kaisers Tiberius. Unmittelbar neben seiner Kaiservilla finden wir Reste eines antiken Leuchtturms von noch etwa 23 m Höhe auf einem quadratischen Sockel mit etwa 12 m Seitenlänge. Er besteht aus Opus Caementitium mit Ziegelverkleidung und diente hauptsächlich als Signalstation. Die Verbindung zum rund 30 km entfernten Hafen Misenum wurde bei Tage durch Rauchwolken und nachts durch Feuer aufrechterhalten.

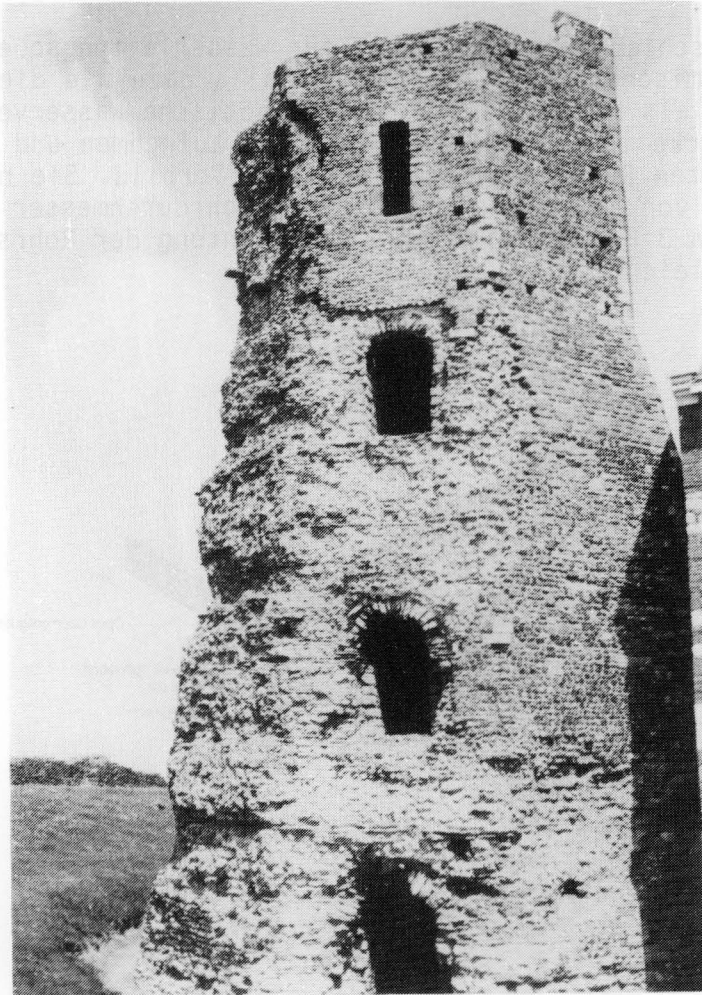


Bild 15: Leuchtturm in Dover/England. Er besteht aus Opus Caementitium und ist das älteste, nahezu erhaltene römische Bauwerk in England.

Ein eindrucksvoller Leuchtturm ist in Dover an der Südküste Englands zu sehen. Er wurde um 50 n. Chr. errichtet, hat einen achteckigen Grundriß und ist das älteste weitgehend erhaltene römische Bauwerk Großbritanniens.

Bei der Überfahrt von Calais nach Dover erkennt man den Turm schon von weitem im Komplex des Dover-Castle an der steil abfallenden Kreideküste.

8 Rationalisierung

Heute verbinden wir mit dem Begriff Rationalisierung moderne Produktionsmethoden, bei denen man mit gleichem Aufwand ein besseres Ergebnis oder das gleiche Ergebnis mit geringerem Aufwand erreicht. Solche Überlegungen können auch als typisch römisch angesehen werden. Das scheint um so erstaunlicher, als die Antike für unsere Begriffe meistens verschwenderisch mit der menschlichen Arbeitskraft umging. Eine große Bedeutung hat hier die spätere Benutzung griechischer und vor allem römischer Großbauten als bequeme "Steinbrüche".

Es wurde bereits erwähnt, daß die Entwicklung des Opus Caementitium als Musterbeispiel für Rationalisierung gelten kann; sie führte außer zu Verrbilligung und schnellerem Baufortschritt sogar zu neuen Bauweisen.

Die Verwendung von verschiebbaren Schalungen für Wasserleitungsquerschnitte ("Schal-Wagen") aus Römischen Beton gehört ebenfalls dazu wie die Entwicklung von Beton-Rohren als Fertigteile für die städtische Wasserversorgung. Sie konnten höhere Drucke als Ton- oder Bleirohre aufnehmen und benutzten die ebenfalls verwendeten Rohre aus Naturstein als Vorbild. Sie haben eine quadratische Außenform von etwa 21 x 21 cm, einen Rohrdurchmesser von 6 bis 8 cm und eine Länge von 3 Fuß (etwa 95 cm). Die Dichtung der Rohrstöße wurde durch einen Falz erleichtert.

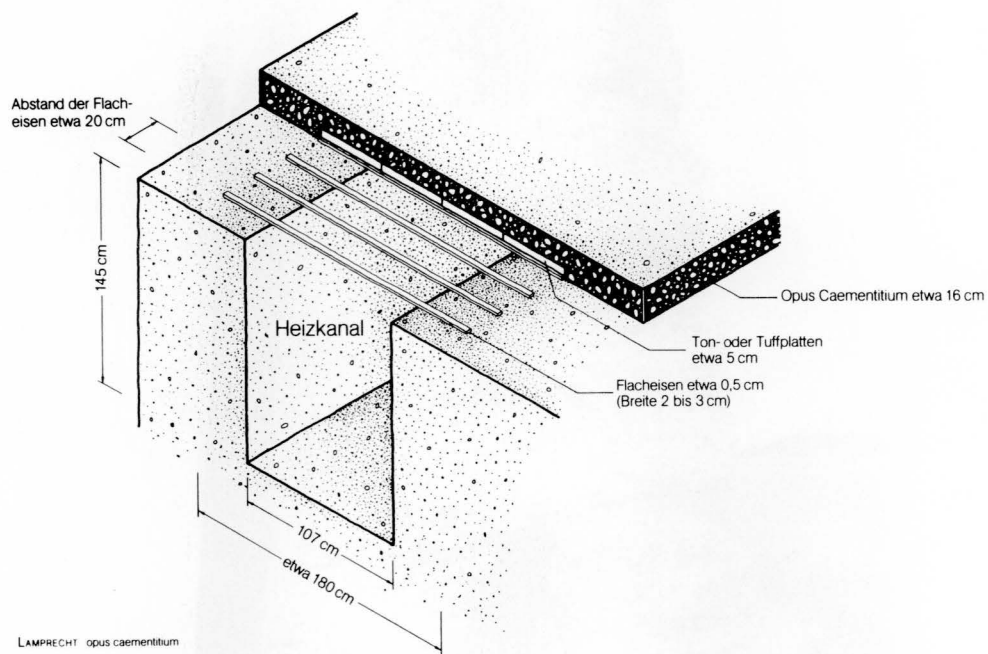


Bild 16: Römischer Beton mit Eisenverstärkung. Die Decke eines Heizkanals bei Klagenfurt/Österreich bestand aus einer Betonkonstruktion, bei der die Zugkräfte durch Flacheisen aufgenommen wurden.

Kaum bekannt ist die Tatsache, daß römische Ingenieure auch bereits das Prinzip unseres heutigen Stahlbetons verwirklichteten, bei dem bekanntlich

der Beton die auftretenden Druckkräfte und der Stahl die Zugkräfte aufnimmt. In der Nähe von Klagenfurt/Österreich befindet sich in einer römischen Siedlung eine Hypokaustanlage, die wie üblich durch Heizkanäle versorgt wurde. Und das Bemerkenswerte: im unteren Teil der Decke eines dieser Kanäle fanden die Archäologen Eiseneinlagen zur Verstärkung. Die 2 bis 3 cm breiten und 0,4 bis 0,6 cm dicken Bandeisen wurden als Armierung des Betons bezeichnet. Netzartig geflochtene Eiseneinlagen sind auch aus Decken in Herkulaneum und den Thermen des Trajan in Rom bekannt.

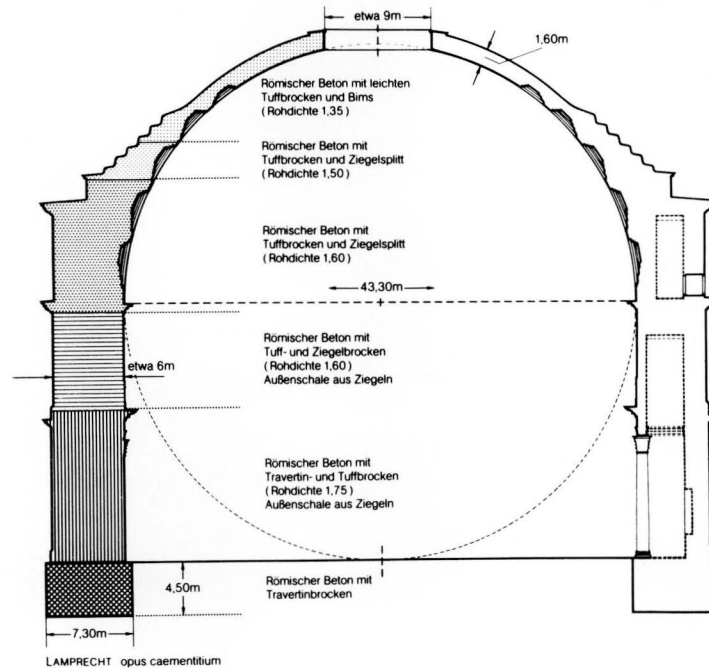


Bild 17: Pantheon in Rom. Dieses eindrucksvollste Ingenieurbauwerk der Antike überspannt mit einer Kuppel aus Römischem Leichtbeton die nie vorher gewagte Weite von 43 m. Die Zuschläge haben von unten nach oben eine deutlich abnehmende Rohdichte.

Eines der eindrucksvollsten Bauwerke der Menschheitsgeschichte ist das Pantheon in Rom. Durch ihre Meisterschaft in der Beherrschung von Gewölbekonstruktionen erreichten die römischen Baumeister eine Freiheit der Raumgestaltung, die der bisherigen Steinarchitektur fremd war. Die heutige Fassung des Bauwerks wurde um 120 n. Chr. von Hadrian hergestellt. Seit jener Zeit fanden nur noch unwesentliche Veränderungen und Ausbesserungen an diesem allen Göttern geweihten Tempel statt.

Man betritt das Pantheon durch eine tempelartige Vorhalle nach griechischer Konzeption. Der gewaltige Rundbau besteht aus einer exakt halbkugelförmigen Kuppel mit einem Durchmesser von etwa 43 m, die auf einem Zylinder mit der Höhe des halben Durchmessers aufliegt. Dieser Zylinder ist eine rund 6 m dicke Konstruktion aus Opus Caementitium (mit Ziegelschale) mit zellenartig ausgesparten Räumen. Die Kuppel zeigt innen ein Kassettenmuster, ist im oberen Bereich etwa 1,60 m dick und weist eine runde Öffnung von fast 9 m Durchmesser auf. Wie wir aus Untersuchungen wissen, läßt die Konstruktion aus Römischem Leichtbeton deutlich drei Bereiche mit verschiedenen schweren Zuschlägen erkennen. Dieser Kunstgriff brachte eine Anpassung an die wechselnden statischen Druckverhältnisse und hält durch das geringere Gewicht

der Leichtzuschläge das Kuppelgewicht und damit den Horizontalschub möglichst klein.

Die eindringliche Wirkung des Rundbaus erwächst wohl aus der Kombination der beiden archaischen Körperformen Kugel und Zylinder sowie den gewaltigen Abmessungen. Außerdem läßt dieser antike Großbau wie kein anderer noch heute die Intention des Erbauers voll erleben: Harmonie von Raum, Licht und Farbe. Berühmte Nachfahren des Pantheons sind die Hagia Sophia im heutigen Istanbul und der Petersdom in Rom; beide bleiben in den Kuppelabmessungen jedoch hinter ihrem Vorbild zurück.

