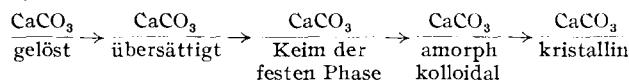


Zusammenfassung.

Damit es zur CaCO_3 -Ausscheidung kommt, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein: 1. Der Gehalt an freier CO_2 muß den Gleichgewichtswert der sog. „zugehörigen Kohlensäure“ unterschreiten bzw. der CO_2 -Partialdruck der Gasphase muß unter den diesem Wert entsprechenden CO_2 -Partialdruck sinken. 2. Das Ionenprodukt $[\text{Ca}^+][\text{CO}_3^-]$ muß das Löslichkeitsprodukt $[\text{Ca}^+][\text{CO}_3^-] = k$ überschreiten. 3. Die Übersättigung der Lösung an CaCO_3 muß aufgehoben werden.

Die Hauptregulatoren der CaCO_3 -Abscheidung aus reinen $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ -Lösungen sind im allgemeinen: der CO_2 -Partialdruck und die Bildungsgeschwindigkeit der festen Phase:



Zusammensetzung und Beständigkeit von 1850 Jahre altem Beton.

Von Prof. Dr. R. GRÜN,

Forschungsinstitut der Hüttenzementindustrie, Düsseldorf.

(Eingeg. 1. Dezember 1934.)

Die römische Wasserleitung, welche in einer Länge von ungefähr 77 km aus Sötenich in der Eifel nach Köln führt (Abb. 1), ist erbaut in den Jahren 70—100 n. Chr. und wurde vermutlich im Jahre 475 zerstört, als Köln durch den Frankenkönig Hilperich erobert wurde. Sie besteht aus einem Kanal mit U-förmigem Querschnitt folgender Abmessungen:

Lichte Höhe ohne Deckgewölbe	75 cm
Lichte Höhe mit Deckgewölbe	100 cm
Lichte Breite	60 cm
Wandstärke im Mittel	30 cm

Dieser Kanal war vermutlich anfangs oben mit Holzbohlen oder Steinplatten abgedeckt; später wurde er dann durch ein Gewölbe aus starken Bruchsteinen nach oben hin abgeschlossen (Abb. 2). Im Gebirge liegt er 20—30 cm unter

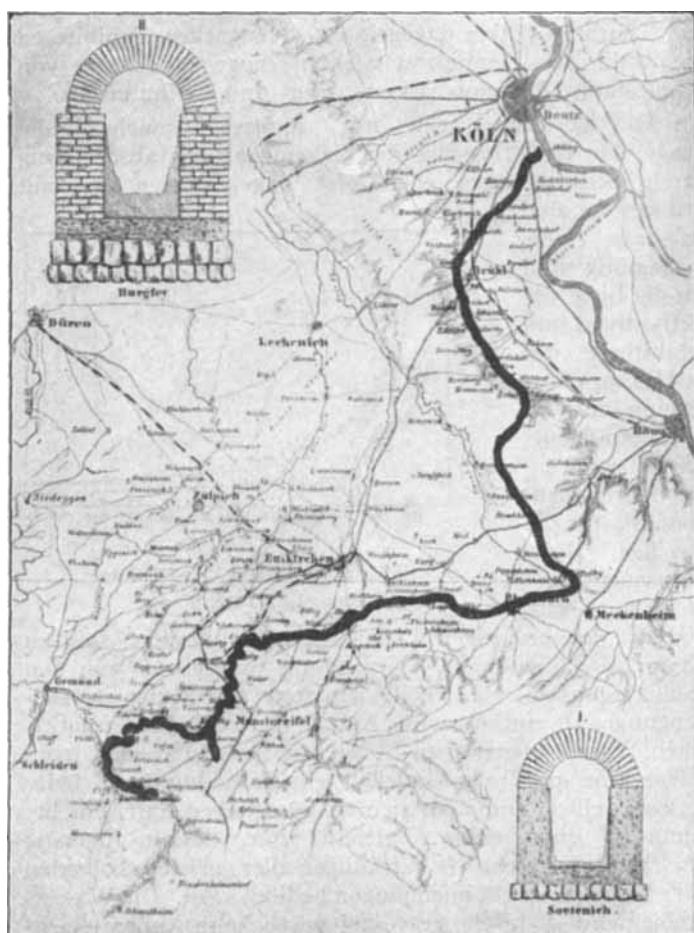


Abb. 1.

Die CaCO_3 -Ausscheidung aus übersättigten Lösungen setzt erst nach Ablauf einer Induktionsperiode ein; zwischen dieser (I) und der Anfangskonzentration (C) besteht das einfache Gesetz $C/\sqrt{I} = \text{Konst.}$ Die Induktionsperiode ist gegenüber Fremdstoffen sehr empfindlich.

Bestimmte pulverförmige Zusätze üben eine Keimwirkung auf die übersättigte CaCO_3 -Lösung aus und beschleunigen die CaCO_3 -Abscheidung. Besonders wirksam sind CaCO_3 , Koks, Graphit, A-Kohle; wobei die Aktivität des CaCO_3 von seiner Ausbildungsform stark abhängt. Neben diesen Aktivatoren der CaCO_3 -Abscheidung gibt es auch Inhibitoren, deren Wirkung sich in einer Verlängerung der Induktionsperiode äußert. Der Zusatz von Zinkpulver, das Einhängen einer Zinkplatte oder die Zugabe von 10 mg/1 Zn (als ZnSO_4) verzögern die CaCO_3 -Abscheidung sehr beträchtlich. Die Übertragung dieser Ergebnisse auf die natürlichen Wässer führt dazu, jedem Wasser eine eigene Individualität zuzuschreiben.

[A. 142.]

der Erde, hat stets das gleiche Gefälle von 1 : 273 und benutzt geschickt alle Formen der Berge, um dieses einzuhalten. Zieht er sich um allzulange Bergnasen, so begleitet er sie nicht bis an das Ende, sondern durchsticht sie nach Art eines Tunnels. In der Ebene wurde der Kanal als Aquädukt geführt. Einer der Pfeiler, die ihn trugen, ist noch teilweise erhalten, alle übrigen sind zur Bausteingewinnung benutzt worden und verschwunden.

Der Kanal selbst besteht aus gewöhnlichem Stampfbeton. Die Herstellung ist, wie die Beschaffenheit des Betons deutlich zeigt, in der Weise erfolgt, daß zunächst der Graben mit senkrechten Seitenwänden, welcher den Kanal aufnehmen sollte, ausgehoben und die Sohle nach Aufbringen einer Packlage mit Beton gefüllt wurde. Auf die ungefähr 20—30 cm starke Schicht wurde eine Lehre aufgesetzt und dann der Zwischenraum zwischen Lehre und Grabenwand mit Beton ausgestampft. Die Lehre wurde allmählich weiter gezogen und der erhärtete Beton mit einer mehrere Millimeter starken Putzschicht aus Kalk und Ziegelmehl überzogen. Auf große Strecken hat sich dieser Putz im Laufe der Jahrhunderte mit einer Sinterschicht aus kohlensaurem Kalk überzogen, die teilweise den Kanal fast ganz ausfüllte, so besonders zwischen Anzweiler und Weingarten. Der Kalksinter wurde, nachdem der Kanal unbrauchbar geworden war, von unseren Vorfahren ausgebrochen und für Schmucksteine an Gebäuden verarbeitet. So finden sich Säulen, Friese, Kapitelle und dergl. an folgenden Stellen: Cäcilienkirche Köln, Taufkapelle der Gereonskirche Köln, Abteikirche zu Laach, Münsterkirche zu Bonn, Hauptkirche zu Münsterfeil, Burg Dankwarderode bei Braunschweig, Irmensäule zu Hildesheim, Altar der Kreuzkirche zu Hildesheim, Lüdgeruskirche Helmstedt usw. Der Beton selbst wurde zu Hausteinen zerschlagen, die ihrerseits wieder zum Burgenbau Verwendung fanden (Abb. 3). Trotzdem bei Herstellung des Betons naturgemäß auf Wetterfestigkeit keine Rücksicht genommen worden war, hat sich in den vielen hundert Jahren, die sich dieser „Betonwerkstein“ an sekundärer Lagerstätte befindet, keine Verwitterungerscheinung gezeigt, und die so aus Beton-Kunststein erbauten Burgen zeigen einen besseren Erhaltungszustand als viele ähnliche Bauwerke aus Naturstein.

Bei dieser Sachlage und unter Berücksichtigung der weiteren Tatsache, daß die Wasserleitung selbst so ausgezeichnet erhalten ist, daß sie sofort wieder in Betrieb genommen werden könnte, wenn nur die Unterbrechungen durch Krieg und Materialgewinnung nicht wären, erscheint es wünschenswert, die physikalischen Verhältnisse des Betons festzustellen, zumal hierüber nähere Angaben bisher noch nicht bekanntgeworden sind. Die im Forschungsinstitut untersuchten Stücke waren von verschiedenen Stellen der Wasserleitung entnommen, so ein Hauptstück (Abb. 2) aus einem Steinbruch bei Sötenich, weitere Stücke von Herrenmülheim an der Bonner Straße.

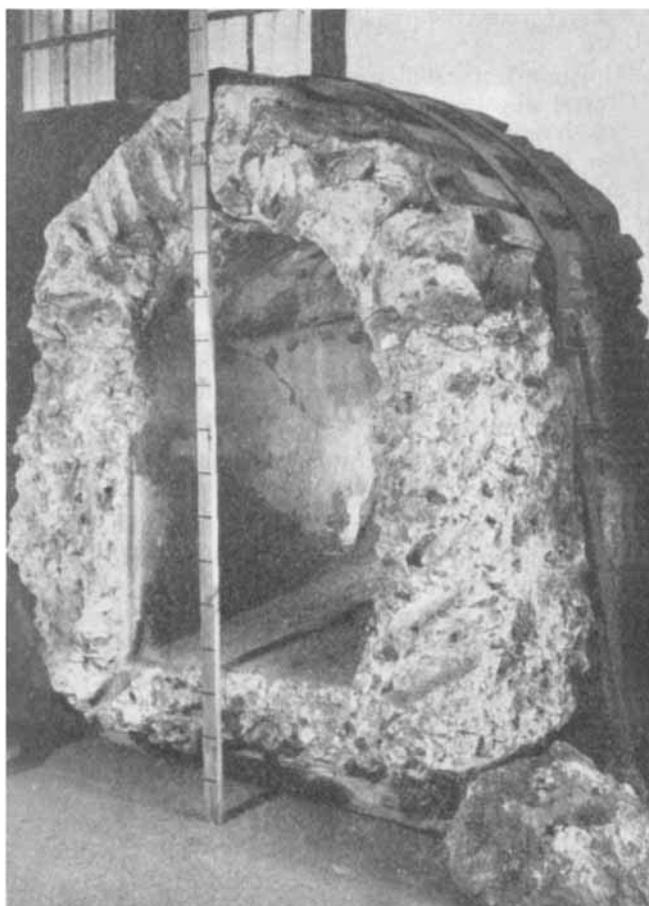


Abb. 2.

A. Physikalische Eigenschaften.

Das Raumgewicht des Betons beträgt 2,06, die Wasseraufnahme 7,5%, die Druckfestigkeit von 2 Würfeln mit etwa 15 cm Kantenlänge 106 und 114 kg/cm², im Mittel = 110 kg/cm².

Nach diesen Eigenschaften ist der Beton von recht guter Festigkeit, sein Raumgewicht ist verhältnismäßig gering und seine Wasseraufnahme ziemlich hoch. Der Zuschlag besteht in den feineren Anteilen aus Kiessand, in den gröberen Anteilen aus einem grauen Kalksteinsplitt mit teilweise weißen Adern und schließlich aus Ziegelmehl.

Der Kies erwies sich als säureunlöslich und konnte ohne weiteres als normaler Rheinkies erkannt werden. Die Splitte wurden einer Analyse unterzogen und zeigten folgende Zusammensetzung:

	Brutto-Analyse %	Glühverlustfrei	Lösliche Bestandteile auf 100 umgerechnet
Unlösliches ...	3,29	5,85	—
SiO ₂ löslich ...	0,06	0,11	0,12
Al ₂ O ₃ ...	0,37	0,66	0,70
Fe ₂ O ₃ ...	0,45	0,80	0,85
MnO ...	0,05	0,09	0,10
MgO ...	0,21	0,37	0,39
CaO ...	51,73	92,03	97,74
CaSO ₄ ...	0,05	0,09	0,10
CaS ...	—	—	—
Glühverlust ...	45,55	—	—
Summe ...	99,76	100,00	100,00
CaO gesamt ...	51,75		
SO ₃ ...	0,03		
CO ₂ ...	43,00		
H ₂ O ...	0,55		

Es handelt sich also um gewöhnlichen, hochprozentigen Kalkstein. Der Putz bestand neben Kalk als Bindemittel nur aus einem roten Mehl, dessen Analyse der Analyse eines gewöhnlichen Ziegelmehles gegenübergestellt wurde:

	Rotgefärbte Teile aus Römerbeton	Modernes Ziegelmehl	Aufschlußanalyse Rotgefärbte Teile	Aufschlußanalyse Ziegelmehl
Unlöslich ...	79,8	80,7	—	—
löslich. SiO ₂	6,8	4,9	66,2	72,0
R ₂ O ₃ ...	7,2	8,3	25,2	16,6
CaO ...	1,2	3,9	1,4	4,9
MgO ...	0,6	0,8	1,9	1,6
SO ₃ ...	0,0	0,2	0,0	0,2
Glühverlust ...	4,9	0,7	4,9	0,7

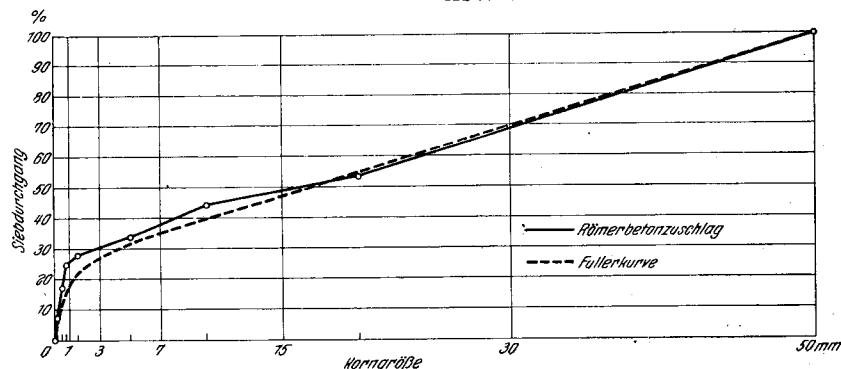
Die Zahlen zeigen gute Übereinstimmung, also die Bestätigung, daß für den Putz zum Schutze des Betons die Puzzolane Ziegelmehl herangezogen wurde.

Die Korngröße der Zuschlagstoffe wurde wie folgt ermittelt:

Korngröße in mm	%	Korngröße in mm	%
0 — 0,2	7,1	1,5 — 5	6,2
0,2 — 0,50	10,0	5 — 10	10,2
0,50 — 0,75	7,6	10 — 20	9,1
0,75 — 1,5	3,0	20 — 50	46,8

Zeichnet man die Siebkurve dieses Zuschlagstoffes auf (Abb. 4) im Vergleich zur Fullerkurve, welche nach un-

Abb. 4.



seren heutigen Erfahrungen das Korngrößenverhältnis eines guten Betonzuschlags wiedergibt, so zeigt sich eine fast völlige Übereinstimmung der von den Römern gewählten Kornabstufung mit den heute gültigen Richtlinien. Es war den Römern also zweifellos eine Regel bekannt, nach der man besonders wasserdichten Beton herstellen mußte. Die Sandanteile allein ergeben eine Kurve, welche zwischen die Kurven B und C der Bestimmungen des Deutschen Ausschusses für Eisenbeton von 1932 fällt.



Abb. 3.

B. Chemische Zusammensetzung des Mörtels.

Über die chemische Zusammensetzung des Mörtels teilt *Hambloch*¹⁾ mit, daß seine Feststellungen „mit apodiktischer Sicherheit“ auf die Verwendung von Eifelkalk bzw. einem tonigen Magerkalk oder Wasserkalk hinweisen und es der örtlichen Lage halber zweifellos „Sötenicher Wasserkalk“ gewesen sei. Ferner stellt *Hambloch*, der Vorkämpfer für den Traß, fest, daß „der Zusatz von Traß nirgendwo zu erkennen ist, was auch das Fehlen von Hornblende, Sanidin und Augitglimmer, lauter Fragmente des Trasses, bestätigt.“

An gleicher Stelle ist mitgeteilt, daß auch das Materialprüfungsamt in Dahlem „zu dem von manchen Fachmann wohl nicht erwarteten“ Schluß kam, daß zu dem Mörtel — soweit wenigstens die Wasserleitung von Dalbenden nach Sötenich in Frage kommt, Traß nicht verwendet wurde. „Die besonders eigentümliche Festigkeit des Bauwerks ist also einzig und allein dem Sötenicher Wasserkalk zuzuschreiben.“

Die Angabe von *Fremersdorf*²⁾, nach welcher mit Traßmörtel gearbeitet worden sei, ist lediglich entstanden nach dem Augenschein, ohne genauere Feststellung, wie Herr

¹⁾ Bei Kiepenheuer „Wasserkalk“, Bonn 1911, S. 56.

²⁾ „Neue Forschungen an der römischen Eifelwasserleitung“, Bonn 1930, S. 101 und andere Stellen.

Fremersdorf vom Wallraf-Richartz-Museum mir auf Anfrage mitteilte.

Um nun festzustellen, wie in dem Stück aus Sötenich die Mörtel des Betons und der Überwölbung zusammengesetzt sind, wurden aus dem Boden, den beiden Seitenwänden und der Überwölbung Mörtelproben entnommen und analysiert. Die Analysen 1, 2 und 3 (Tabelle 1) zeigen eine weitgehende Ähnlichkeit des Betons des Kanals mit dem Mörtel der Überwölbung. Rechnet man die löslichen Anteile auf 100 um, so kommt man ungefähr auf die Zusammensetzung eines Naturzementkalkes. Für den Wandputz dagegen wurde entweder ein Romanzement herangezogen, wie die Analysen 4 und 5 zeigen, oder die löslichen Anteile des Ziegelmeihs haben die Analysenzahlen durch Herabsetzung des Kalkgehaltes verschoben.

Von dem Stück aus Herrenmühlheim hergestellte Analysen (6, 7 u. 8) zeigen die Verwendung eines ganz ähnlichen Bindemittels sowohl für den Beton als auch für den Putz.

Da naturgemäß die Analysen etwas beeinflußt sind durch die Zuschlagstoffe, obwohl für die Analyse des Mörtels nur solche Mörtelstücke herausgesucht wurden, in welchen möglichst wenig Zuschlagstoffe vorhanden waren,

Tabelle 1.

wurden von einem besonders günstigen Stück (Sötenich), in welchem offenbar seinerzeit die Mischung etwas nachlässig behandelt worden war, weiße Körnchen unvermischten Bindemittels mit der Pinzette ausgezogen und dieses überhaupt nicht mit Zuschlag versetzte Bindemittel analysiert (Analyse 9, Tab. 1). Die Analyse ergab eine ganz ähnliche Zusammensetzung für die löslichen Bestandteile wie die anderen Proben; es errechnet sich hieraus die Zusammensetzung des Kalksteins, aus welchem das Bindemittel gebrannt wurde, wie folgt:

SiO_2	18,3 %
R_2O_3	9,2 %
CaO	38,1 %
MgO	1,9 %
SO_3	0,5 %
CO_2	32,0 %
	100,0 %

Solcher Kalkstein kommt in großen Mengen z. B. in dem heute noch in Betrieb befindlichen Steinbruch in Sötenich vor, wie die folgende Analyse einer aus diesem Bruch entnommenen Kalksteinprobe zeigt:

SiO_2	18,9 %
R_2O_3	2,6 %
CaO	43,9 %
MgO	1,1 %
SO_3	0,2 %
CO_2	33,3 %
	100,0 %

Vom Wallraf-Richartz-Museum zur Verfügung gestellte Wandputze, die beim Flughafenbau in Köln ausgegraben wurden, zeigten folgende Zusammensetzung:

	Brutto-Analyse		Glühverlustfrei		Lösliche Bestandteile auf 100 umgerechnet	
	untere Schicht	obere Schicht	untere Schicht	obere Schicht	untere Schicht	obere Schicht
Unlösliches	75,6	66,4	83,5	76,7	—	—
SiO_2	0,9	0,4	1,0	0,5	6,1	2,2
Al_2O_3	1,7	2,9	1,9	3,3	11,5	14,2
Fe_2O_3	2,2	2,4	2,5	2,8	15,2	12,0
MnO	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	0,4
CaO	8,8	13,5	9,7	15,5	58,4	66,5
MgO	1,2	0,9	1,3	1,0	7,9	4,3
CaSO_4	0,05	0,1	0,05	0,1	0,3	0,4
CaS	—	—	—	—	—	—
Glühverlust	9,5	13,2	—	—	—	—
Summe . . .	100,05	99,9	100,05	100,0	100,0	100,0
CaO gesamt	8,8	13,5	—	—	—	—
SO_3	0,02	0,06	—	—	—	—
S	—	—	—	—	—	—
CO_2	6,7	9,8	—	—	—	—

Es ist also auch hier wieder die Verwendung des genannten Kalkes bewiesen.

Es ist somit die Feststellung *Hamblochs* und des Materialprüfungsamtes bestätigt, daß den Römern die Verwendung des Sötenicher Wasserkalkes bekannt war, und daß dieser Sötenicher Wasserkalk auch von ihnen beim Bau der genannten Wasserleitung ohne Traßzusatz verarbeitet wurde.

Bemerkenswerte Ergebnisse zeigte eine mikroskopische Untersuchung eines Dünnschliffes (Abb. 6). Hier sind an den Rändern der Quarzkörner die Folgen der jahrhunderte-langen Wechselwirkung zwischen Kalk einerseits und Kiesel-säure andererseits deutlich zu erkennen: Es zeigen sich hier Neubildungen, welche stark polarisieren und sich von den Quarzkörnern deutlich unterscheiden. Der Kalk ist also mit dem Quarzsand in Reaktion getreten in ähnlicher Weise, wie uns heute die Erzwingung einer solchen Wechsel-

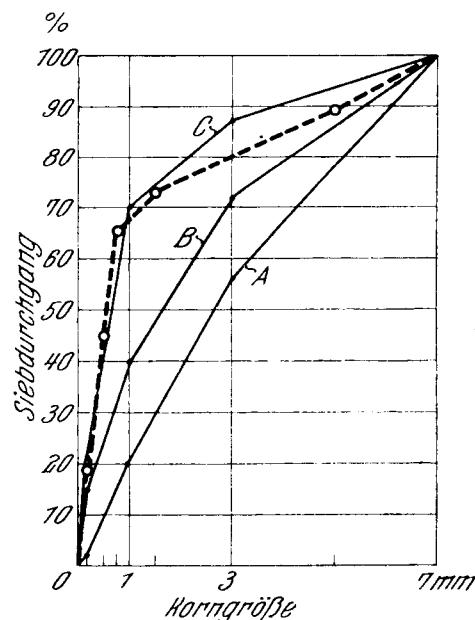


Abb. 5.

wirkung bei der Kalksandsteinfabrikation durch Anwendung von Hitze gelingt.

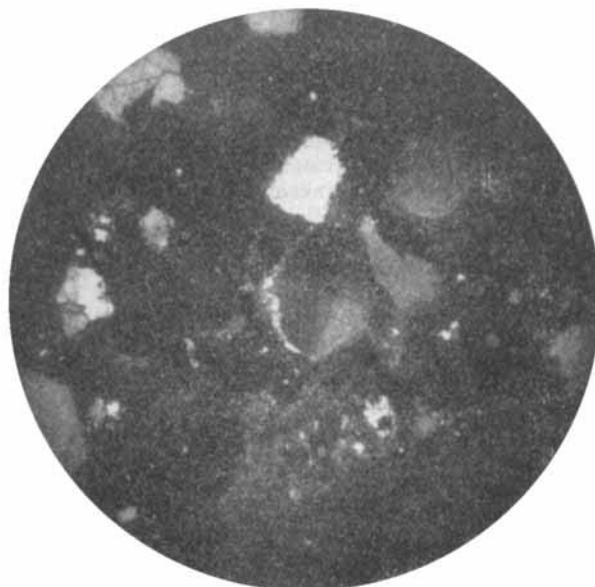


Abb. 6.

Zusammenfassung.

Beim Bau der Wasserleitung Eifel—Köln in den Jahren 70—100 n. Chr. wurde von den Römern ein Beton verwendet, der heute 110 kg/cm^2 Druckfestigkeit aufweist und der auch in Außenlagerung, z. B. bei der Verwendung als Haustein beim Burgenbau, sich als vollkommen witterungsbeständig erwiesen hat. Als Bindemittel wurde Sötenicher Wasserkalk, ein hydraulischer Kalk, wie er heute noch verwendet wird, herangezogen, als Zuschlag für die feineren Anteile Rheinsand, für die größeren Anteile Kalksplitt. Das Korngrößenverhältnis der Zuschläge entsprach genau den Bedingungen, die auch heute für die Kornabstufung eines Beton-Zuschlags maßgebend sind. Für den Innenputz wurde zu dessen Dichtung und zur Herbeiführung genügender Widerstandsfähigkeit gegen aggressive Einflüsse als Puzzolane Ziegelmehl verwendet; Traß ist in Übereinstimmung mit allen anderen Forschern dagegen bei den zahlreichen untersuchten Stücken nicht nachgewiesen worden.

[A. 143.]