Über die Struktur des Zementsteins

Autor(en): **Esenwein, P.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Cementbulletin**

Band (Jahr): **40-41 (1972-1973)**

Heft 8

PDF erstellt am: **28.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-153531

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

CEMENTBULLETIN

AUGUST 1972 JAHRGANG 40 NUMMER 8

Über die Struktur des Zementsteins

Zusammensetzung des Zementsteins. Aufnahme von Bruchflächen mit dem Raster-Elektronenmikroskop. Tobermorit-Kristalle. Mikro-Schwindrisse.

Lange Zeit hielt man den Zementstein, den erhärteten Portlandzement, für eine amorphe gelförmige Masse, in welcher winzige Kristallfragmente von Calciumhydroxid ($Ca[OH]_2$) und eventuell auch Calciumsulfoaluminat ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4$) $32 \cdot H_2O$ eingebettet liegen. Man wusste auch, dass die einzelnen Zementkörner nur oberflächlich hydratisieren und in dieses amorphe Zementgel umgewandelt werden, während im Innern noch unabgebundene Zementteilchen verbleiben. Die langsam fortschreitende Erhärtung und Festigkeitszunahme des Zementsteins stellte man sich so vor, dass zufolge Abnahme des Wassergehaltes gegen den Kern des Zementteilchens kapillare Kräfte entstehen, welche die fortschreitende Verfestigung bewirken würden.

2 Mit der Vervollkommnung der **Röntgen-Feinstruktur-Analyse** vor etwa 20 Jahren wurde aber festgestellt, dass die anscheinend amorphe Gelmasse des abgebundenen Zementsteins zu erheblichem Teil als sehr feinkörnige Aggregate von **Tobermorit** in kristalliner Form vorliegt.

Dank der Erfindung und Weiterentwicklung des **Elektronenmikroskopes,** welches gegenüber dem Lichtmikroskop eine etwa 1000mal stärkere Vergrösserung ermöglicht, gelang es, nicht nur die kristallisierten Bestandteile, also insbesondere den Tobermorit, direkt sichtbar zu machen, sondern auch die strukturellen Eigenschaften des Zementsteins genauer zu erforschen. Vor allem das erst kürzlich entwickelte **Raster-Elektronenmikroskop (REM)*,** welches gegenüber dem Lichtmikroskop eine viel grössere Tiefenschärfe besitzt, liess im Auflicht Struktur und Kristallteile des Zementsteins in unerwarteter Deutlichkeit erkennen und photographieren. Die grosse Tiefenschärfe des REM erlaubt nämlich, Untersuchungen an gewöhnlichen Bruchflächen zu machen und erübrigt die Herstellung von Dünn- und Anschliffen. Dies hat den grossen Vorteil, dass offene Porenhohlräume und unverletzte Kristallaggregate beobachtet werden können. Dank dieser Möglichkeit zeigte sich, dass der Zementstein, der makroskopisch als eine kompakte Masse erscheint, bei 1000- bis 10 000facher linearer Vergrösserung zahlreiche Hohlräume besitzt, die von dem im Überschuss zugesetzten Anmachwasser herrühren. Im Endzustand der Erhärtung des Zementsteins werden auf das Zementgewicht bezogen etwa 0,4 Teile Wasser fest gebunden, während eine gewöhnliche Betonmischung ungefähr 0,5 Teile Wasser enthält. Der Wasserüberschuss ist notwendig für die Verarbeitbarkeit der Mischung. Von den 0,5 Teilen Wasser sind 0,2 chemisch als Kristallwasser gebunden, 0,2 oberflächenaktiv in den Gelporen festgehalten, und 0,1 Teile sind frei beweglich. Wenn das freie Wasser sich verflüchtigt, hinterlässt es im Zementstein das Kapillarporensystem. Anfänglich sind alle Hohlräume mit diesem Wasser gefüllt, und in diesem Zustand können sich in ihnen die wachsenden faser- bis nadelförmigen Tobermorit-Kristalle ausbreiten, wie dies in den Abb. 1 bis 3 zu erkennen ist. Dieses Kristallwachstum geht weiter, die Tobermoritnadeln werden zahlreicher und grösser und die Poren deshalb immer mehr mit filzig bis strahlig angeordneten Kristallaggregaten gefüllt. Dadurch erhöht sich aber auch die

---

* Das Rasterelektronenmikroskop der EMPA (Dübendorf), mit welchem diese Bilder aufgenommen wurden, ist eine Neuanschaffung. Es steht auch für normale Auftragsuntersuchungen zur Verfügung.

Festigkeit des jungen Zementsteins immer mehr, bis schliesslich der harte, sich aber immer noch langsam weiter verfestigende, Zementstein entsteht. Voraussetzung für diese lange anhaltende Festigkeitszunahme des zementgebundenen Baustoffes ist also das Vorhandensein von Wasser bzw. mit Zementbestandteilen gesättigter Lösung in den Porenhohlräumen. Sobald dieses Wasser z. B. durch vorzeitige Austrocknung verschwindet, ist eine weitere Durchwachsung der Poren mit Tobermoritkristallen nicht mehr möglich und deshalb auch eine weitere Festigkeitszunahme des Zementsteins beendet.

Beim Trocknen des Zementsteins wird aber nicht nur flüssiges, in den Poren enthaltenes Wasser abgegeben, auch das schon in den feinen Gelstrukturen eingeschlossene Wasser entweicht teilweise. Dies hat nun eine Veränderung des Zementsteins zur Folge, die man mit **Schwinden** bezeichnet. Grobe Schwindrisse an Zementmörteln und Betonkörpern sind makroskopisch leicht zu erkennen. Sie sind einige Zehntels- bis einige Millimeter breit. Von blossem Auge nicht sichtbar sind dagegen **Mikroschwindrisse,** welche, ohne die äussere Form des Baustoffes zu verändern, in der Feinstruktur des Zementsteins entstehen und oft nur mit sehr starker Vergrösserung, wie sie das REM ermöglicht, zu sehen sind. Solche Mikroschwindrisse im Zementstein zeigen die Abb. 4 und 5.

Ohne Zweifel haben die Bildung der Tobermorit-Kristallaggregate und die Bildung der Mikroschwindrisse Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften zementgebundener Baustoffe. Vielleicht erlauben sie einmal die Erklärung der rund 10mal grösseren Druck- als Zugfestigkeit der letzteren. Ein sicherer Beweis für diesen Zusammenhang ist jedoch erst durch weitere Studien zu erwarten, bei denen sich das Raster-Elektronenmikroskop sicher als sehr nützlich erweisen wird.

Dr. P. Esenwein, Zürich

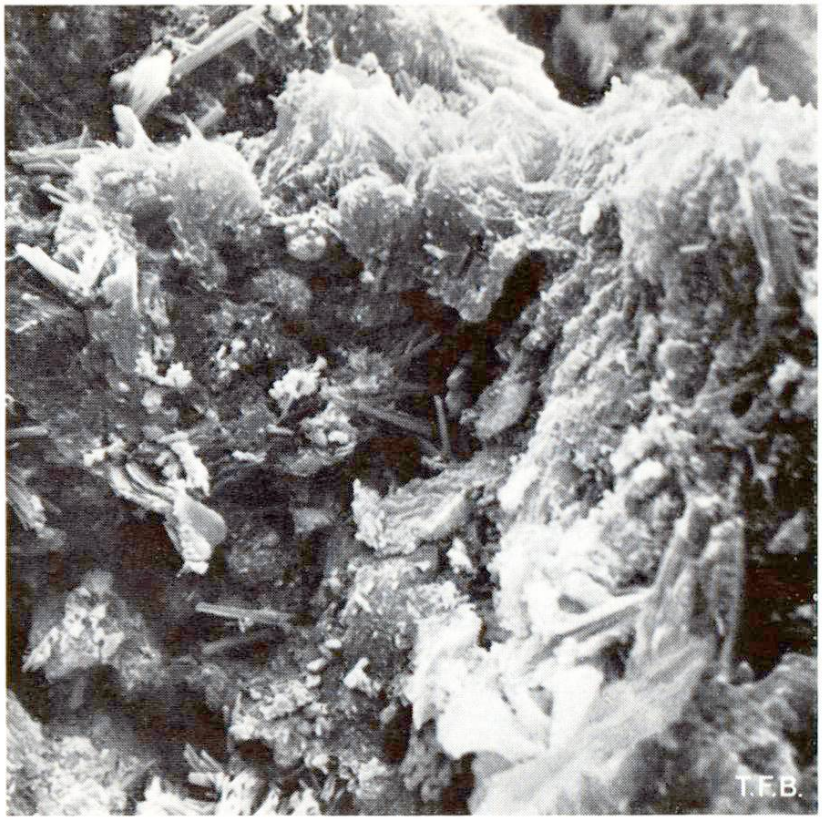

Abb. 1 Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Bruchfläche einer sandfreien Zementmörtelprobe (Plättchenprobe für Raumbeständigkeitsprüfung nach SIA, ungedarrt, 3 Monate alt), im Hochvakuum goldbelegt. Vergrösserung 2500fach linear. Die Aufnahme zeigt geöffnete Hohlräume, mit faserig-nadeligen Kriställchen durchwachsen, welche nach analogen Formen bei reinem, hydratisierten Tricalciumsilikat (C_3S) zu schliessen, eine **Tobermorit-Art** sein müssen.

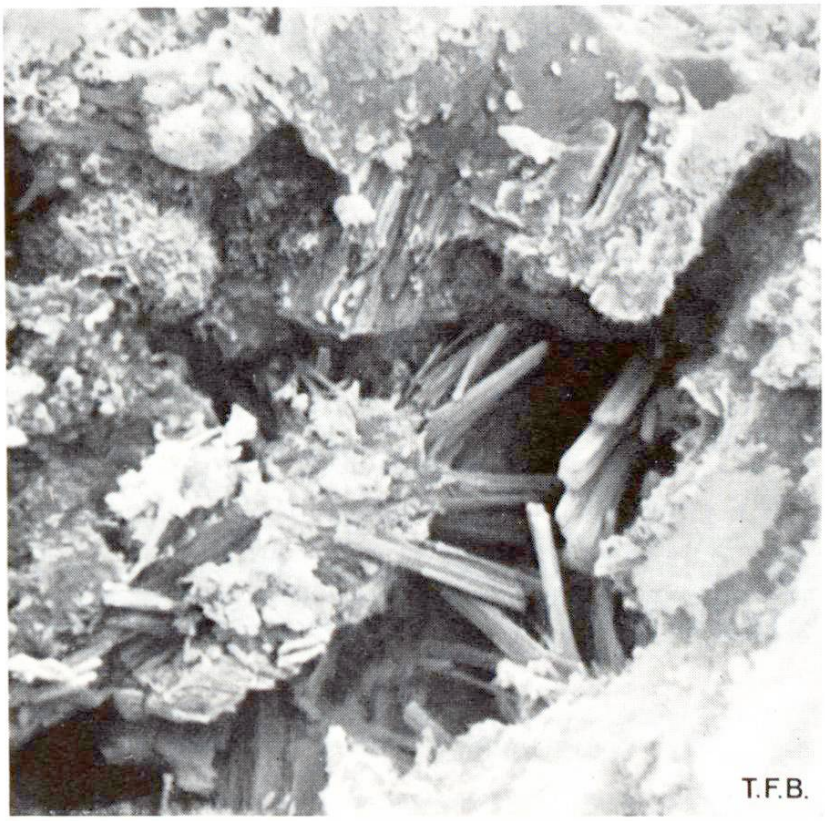

Abb. 2 Detail aus Bild 1 in 5500facher Vergrösserung. Es zeigt deutlich den in allen Richtungen mit Tobermorit-Nadeln durchwachsenen Hohlraum.

Abb. 3 Detail aus Bild 2 in 11 000facher Vergrösserung. In der Mitte links ein in den Hohlraum ragendes Zementkörnchen, mit weisslichen Hydratationsprodukten ohne gute Kristallformen umhüllt. Von letzteren aus wachsen die Tobermoritkristalle spiessig in den Hohlraum hinein, andere Nadeln wachsen ihnen entgegen, bis schliesslich der ganze Hohlraum filzig verwachsen ist.

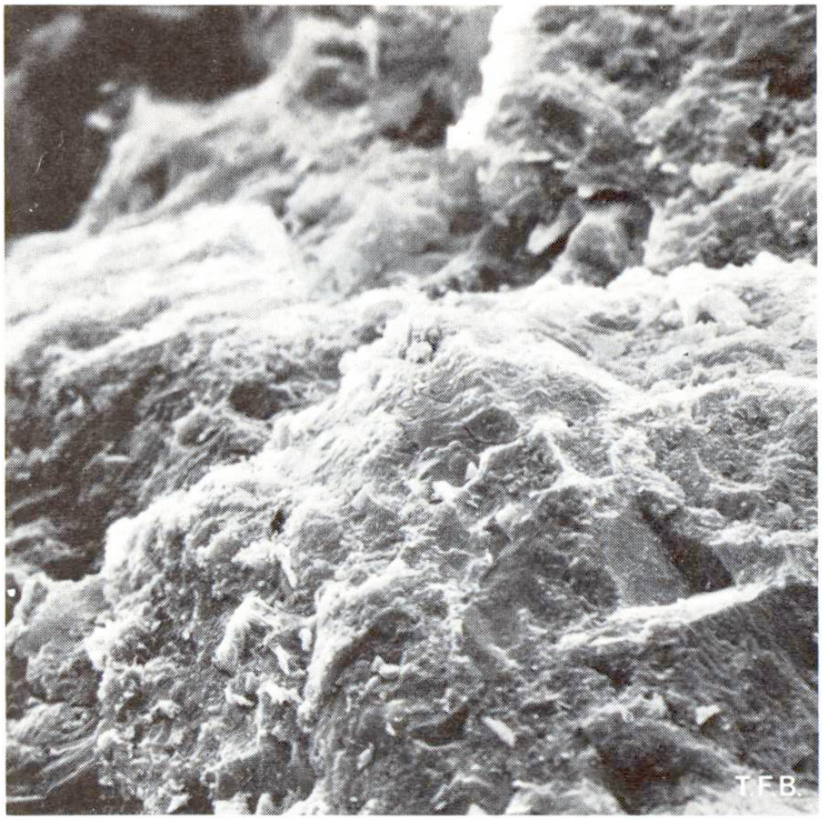

Abb. 4 Gleiche Probe wie Bilder 1–3 (Bruchfläche PC-Normenplättchen), aber an einer relativ dichten, porenarmen Stelle in 1100facher Vergrösserung, ebenfalls goldbelegt.

Nur vereinzelt sind Fragmente von Tobermoritkriställchen sichtbar, die Hydratationsprodukte bilden anscheinend eine zusammenhängende dichte Masse. In der Bildmitte einzelne Schwindrisse in dieser Masse, die bei stärkerer Vergrösserung (Bilder 2b und 2c) deutlich sichtbar werden.

Abb. 5 Detail aus Bild 4 in 2200facher Vergrösserung. Die netzförmig verlaufenden Schwindrisse werden besser sichtbar.

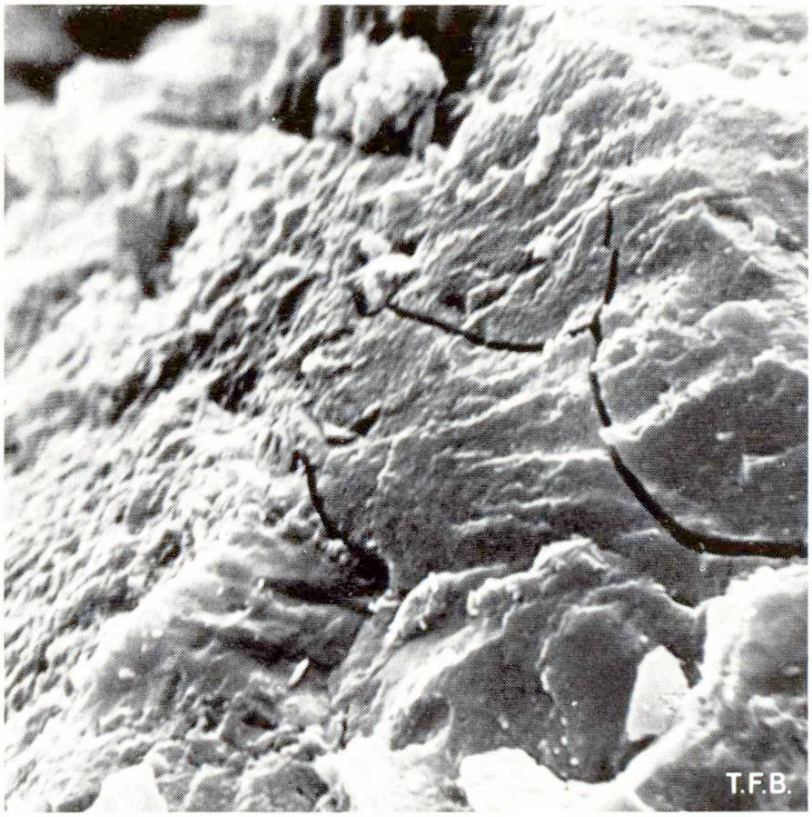

Abb. 6 Detail aus Bild 5 in 5500facher Vergrösserung. Die Schwindrisse klaffen in der Zementsteinmasse, ihre Breite beträgt indessen nur ca. $^{1}/_{5000}$ Millimeter, d.h. 0,2 µm.

TFB

Zu jeder weiteren Auskunft steht zur Verfügung die
TECHNISCHE FORSCHUNGS- UND BERATUNGSSTELLE
DER SCHWEIZERISCHEN ZEMENTINDUSTRIE
5103 Wildegg Postfach Telephon (064) 53 17 71