Zeitschrift: Cementbulletin
Herausgeber: Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton (TFB AG)
Band: 30-31 (1962-1963)
Heft: 14

Artikel: Der Zementstein
Autor: [s.n.]
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-153416

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: 15.07.2025

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

CEMENTBULLETIN

FEBRUAR 1963 JAHRGANG 31 NUMMER 14

Der Zementstein

Bildung, Zusammensetzung und Struktur des Zementsteins. Zementgel, Gelporen und Kapillarporen. Einfluss der Zementeigenschaften auf Festigkeit und Dichtigkeit von Beton.

Der Zementstein bildet sich durch Abbinden und Erhärten des Zementleims (s. CB 8/62). Da er die bindende, festigkeitserzeugende Komponente des Betons ist, sind von ihm die wesentlichen Betoneigenschaften direkt abhängig, insbesondere Festigkeit, Durchlässigkeit und Beständigkeit.

Die bestimmenden Eigenschaften des Zementsteins sind weniger durch die chemische Zusammensetzung als durch den strukturellen Aufbau bedingt. Die erstere ist zwar infolge der konstanten Zusammensetzung des Portlandzementes gegeben, aber im einzelnen tatsächlich noch wenig bekannt. Demgegenüber konnte die Struktur des Zementsteins, und damit auch die physikalischen Gegebenheiten, in letzter Zeit weitgehend aufgeklärt werden.

Man hat erkannt, dass der Zementstein im wesentlichen aus ausserordentlich kleinen festen Ausscheidungen zusammengesetzt ist, aus Partikeln, die nur wenige Molekülschichten dick sind. Man nennt deshalb die Hauptkomponente des Zementsteins **Zementgel** und die Hohlräume zwischen den feinen Teilchen **Gelporen.**

Der Portlandzementklinker besteht aus einem Agglomerat der folgenden vier Hauptverbindungen:

Tricalciumsilikat	$3CaO.SiO_2$	etwa 50%
Dicalciumsilikat	$2CaO.SiO_2$	etwa 25%
Tricalciumaluminat	$3CaO.Al_2O_3$	etwa 10%
Tetracalciumaluminatferrit	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	etwa 10%

Mit Ausnahme der feinsten, ist jedes Zementkörnchen aus diesen vier Bestandteilen zusammengesetzt. Bei der Erhärtung werden

daraus mit Wasser neue Verbindungen, die entsprechenden **Hydrate,** gebildet.

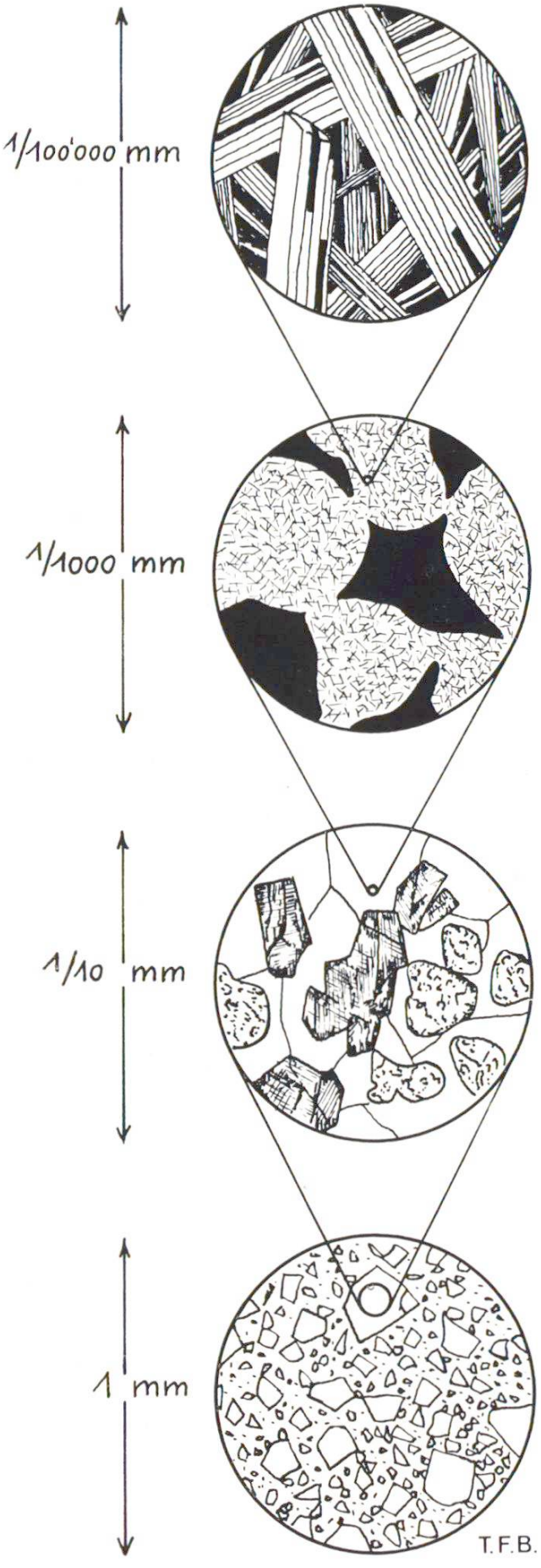
Aus den beiden Calciumsilikaten, die mengenmässig und effektiv am meisten zur Erhärtung beitragen, entstehen Hydrate, deren durchschnittliche Zusammensetzung etwa mit der Formel $3CaO.2SiO_2.3H_2O$ ausgedrückt werden kann. Die Calciumoxyd- und die Siliziumoxyd-Komponenten bilden bei der Kristallisierung wechselweise aufeinanderliegende gitterartige Schichten, zwischen denen in mehr oder weniger regelmässigen Abständen die Wassermoleküle eingelagert sind. Dieser kristalline Aufbau ist gegenüber demjenigen der ursprünglichen Calciumsilikate vollständig verändert. Es ist also nicht so, dass das Wasser in die bestehenden Kristalle der Klinkermineralien eindringt und sich dort einfach festsetzt, sondern es löst diese, Schicht um Schicht, auf, befreit die Moleküle aus ihrer kristallinen Bindung und gibt ihnen Gelegenheit zu wandern und sich neu zu gruppieren. Bei diesem Vorgang entsteht neben den Calciumsilikathydraten auch freies Calciumhydroxid, $Ca(OH)_2$, welches u.U. zu den bekannten weisslichen Ausblühungen an der Betonoberfläche führen kann.

Charakteristisch für den strukturellen Aufbau des Zementsteins ist nun, wie bereits gesagt, der Umstand, dass sich die Calciumsilikathydrate in ausserordentlich feiner Verteilung ausscheiden. Während die entstehenden Kristalle des sich bildenden Calciumhydroxydes mit dem Mikroskop z.T. gerade noch wahrgenommen werden können, sind die Teilchen der Calciumsilikathydrate etwa 1000mal kleiner und messen nur $^1/_{1\,000\,000}$ bis $^1/_{100\,000}$ mm im Durchmesser (Abb. 1). Aufnahmen mit dem Elektronenmikroskop und die Auswertung von Adsorptions- und Dichtemessungen lassen erkennen, dass die Hydrate in Form von faserigen Plättchen ausgeschieden werden und ein Filzwerk (Zementgel) mit zusammenhängenden Hohlräumen (Gelporen) bilden. Der Anteil der Gelporen am Gesamtvolumen des Zementgels ist eine gleichbleibende Grösse und beträgt etwa 30%.

Ein Mass für die ausserordentliche Kleinheit der Bausteine des Zementgels ist seine spezifische Oberfläche. Diese beträgt 400 bis 500 m^2/g (zum Vergleich: Zement: 0,3 m^2/g, Sand 0/1 mm: 0,01 m^2/g).

Der Angriff des Wassers auf die Kristallite der Calciumsilikate setzt sofort ein. Es bilden sich zunächst sehr feine Häutchen von Zementgel, die, noch während des Abbindens, infolge des osmotischen Druckes aufgesprengt werden. Hierdurch erfolgt anfänglich ein relativ grosser Umsatz der Hydratisierungsreaktionen. Im Zeitpunkt des Abbindeendes sind bereits etwa 15% des Zementes hydratisiert. Bei dicker werdender Gelschicht kann diese nicht

mehr aufspringen, und die Hydratation schreitet immer langsamer voran. Die Zufuhr von Wasser zur Reaktionsstelle wird durch das wachsende Netz der Gelporen immer stärker behindert. Der



A Versuch einer Darstellung des Aufbaues des Zementgels durch kleinste, kristalline Ausscheidung der hydratisierten Zementmineralien. Zwischenräume = Gelporen.

B Schematische Darstellung der Kapillarporen.

C Zementklinkeranschliff. Tricalciumsilikat-Kristallite (dunkel schraffiert) und Dicalcium-silikat-Kristallite (heller, punktiert) sind in einer erstarrten Schmelze der Aluminate (weiss) eingebettet.

D Zementpulver vergrössert.

Abb. 1 Schematische Darstellung der strukturellen Grössenverhältnisse im Zementstein (A und B hydratisiert, C und D nicht hydratisiert).

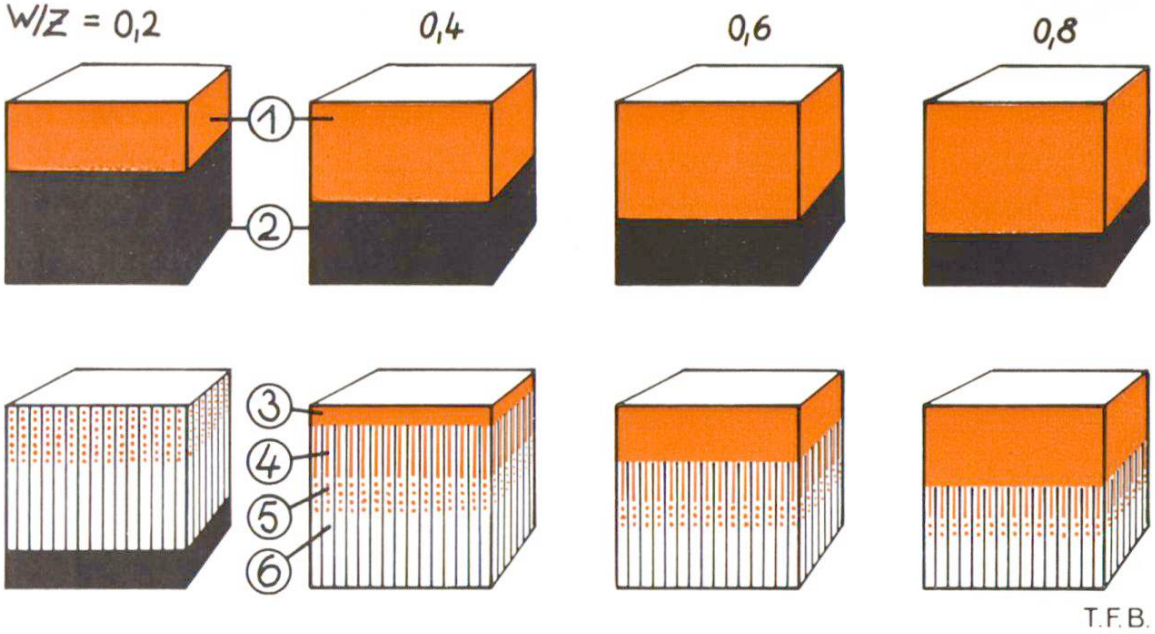


Abb. 2 Räumliche Verhältnisse im Zementstein vor und nach praktisch beendeter Hydratisierung geordnet nach Wasserzementwerten von 0,2, 0,4, 0,6 und 0,8. Vergleich der Volumina (1) Anmachwasser; (2) Zement; (3) unverbrauchtes Wasser = Kapillarporen; (4) Wasser locker gebunden in den Gelporen; (5) chemisch gebundenes Wasser; (6) Bereich des Zementsteins senkrecht schraffiert. Bei W/Z = 0,2 bleibt infolge Wassermangels ein Rest unhydratisierten Zementes.

Durchmesser der Gelporen entspricht nur der 5- bis 15fachen Abmessung eines Wassermoleküls. Das Wasser dürfte demnach hier starken Adsorptionskräften unterworfen und nur in beschränktem Masse beweglich sein.

Wie steht es mit der **räumlichen Entwicklung** und mit dem **Wasserhaushalt** bei der Bildung des Zementsteins? Das Volumen des Zementgels ist nach vollständiger Hydratation wenig mehr als doppelt so gross wie dasjenige des ursprünglichen Zementes. Das Gel wächst also in die mit Wasser gefüllten Hohlräume im Haufwerk der Zementteile hinein. Eine Wassermenge, entsprechend einem Fünftel des Zementgewichtes, wird bei der Hydratation chemisch gebunden. Ein weiterer Fünftel findet in den Gelporen Platz. Somit wird bei einem Wasserzementwert von 0,4 (= $^2/_5$) alles Anmachwasser im Zementgel aufgenommen. Es entsteht ein geschlossen ausgefüllter Raum. Ist der Wasserzementwert höher, so verbleiben infolge des überschüssigen Wassers Hohlräume, die als **Kapillarporen** bezeichnet werden (Abb. 2). Diese sind mit dem Mikroskop noch nicht sichtbar, obschon sie 100- bis 1000mal grösser sind als die Gelporen. Zwischen W/Z = 0,4 und W/Z = 0,7 bilden die Kapillarporen in sich geschlossene Hohlräume. Bei höherem Wassergehalt aber wird ihr Anteil so gross, dass ein zusammenhängendes System entsteht. Die Kapillarporen beanspruchen dann bereits einen Drittel und mehr des vom Zementstein eingenommenen Raumes.

Wie zeigt sich nun zusammenfassend der Aufbau des Zementsteins?

1. **Zementgel** als aufbauende Substanz mit ziemlich konstanter, unabhängiger Zusammensetzung und Struktur, jedoch mit schwankendem Wassergehalt in den Gelporen.
2. Vornehmlich in den äusseren Schichten des Zementgels eingebettete kristalline Ausscheidungen von **Calciumhydroxyd.**
3. Rückstände von ursprünglichem Zement, insbesondere bei vorzeitigem Austrocknen oder $W/Z < 0{,}4$.
4. Rückstände von überschüssigem Anmachwasser bei $W/Z > 0{,}4$ die sogenannten **Kapillarporen** bildend.

Bei der Beurteilung des Einflusses der Zementsteineigenschaften auf die Festigkeit, Dichtigkeit und Beständigkeit des Betons spielen nur die Eigenschaften des Zementgels und der Gehalt an Kapillarporen eine wesentliche Rolle.

Die **Festigkeit** des Betons erweist sich grundsätzlich abhängig vom individuellen Charakter des Zementes, vom Feuchtigkeitsgehalt, von der Temperatur und insbesondere vom Wasserzementwert.

Der erstgenannte Einfluss wirkt über die Zusammensetzung des Zementgels und über den Anteil an gebildetem Calciumhydroxyd.

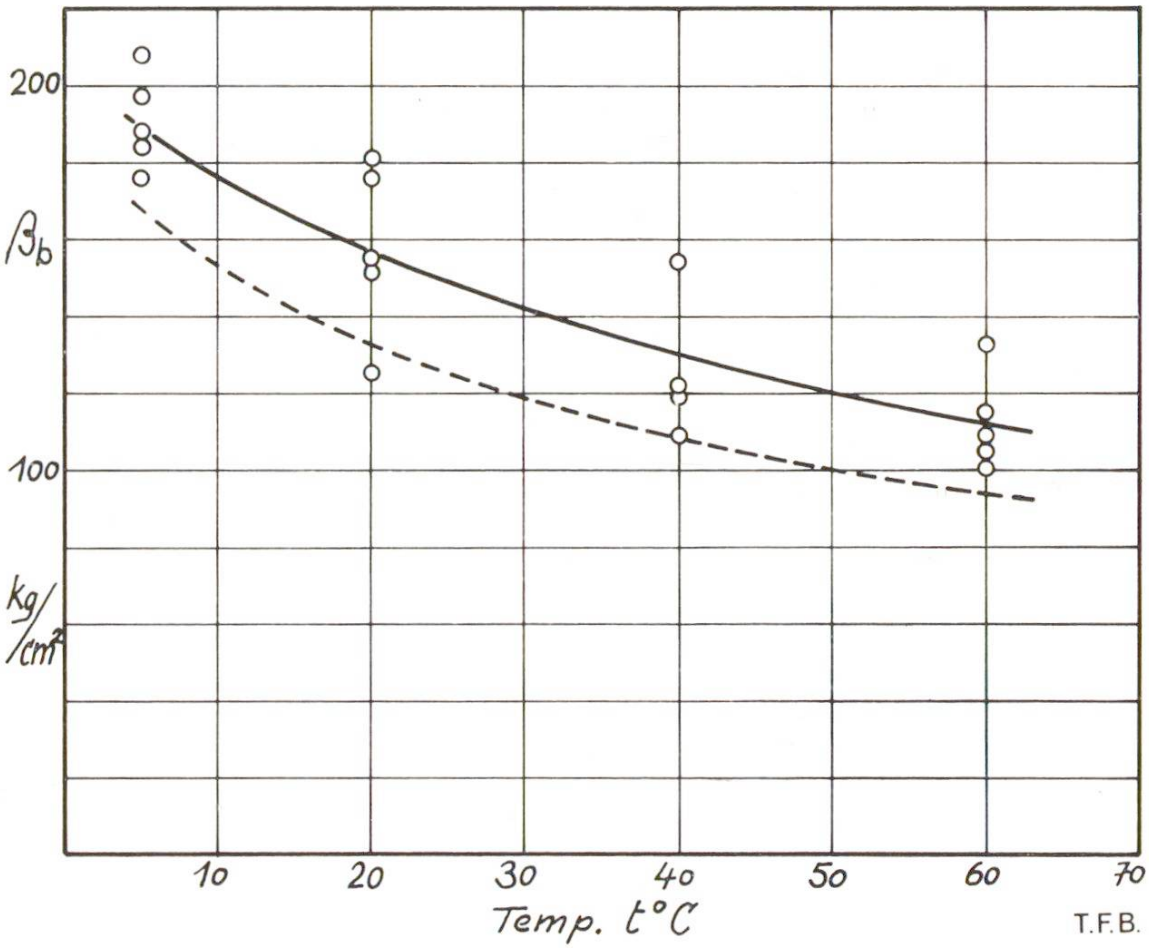


Abb. 3 Einfluss der Prüftemperatur (t) auf die Biegezugfestigkeit (β_b) von Zementstein. Ausgezogene Kurve oben: Lagerung 3 Monate unter Wasser bei 40 °C; gestrichelte Kurve unten: Lagerung 6 Monate unter Wasser bei 20 °C. Prüfung jeweils nach 6 Std. bei t °C unter Wasser (nach G. Wischers)

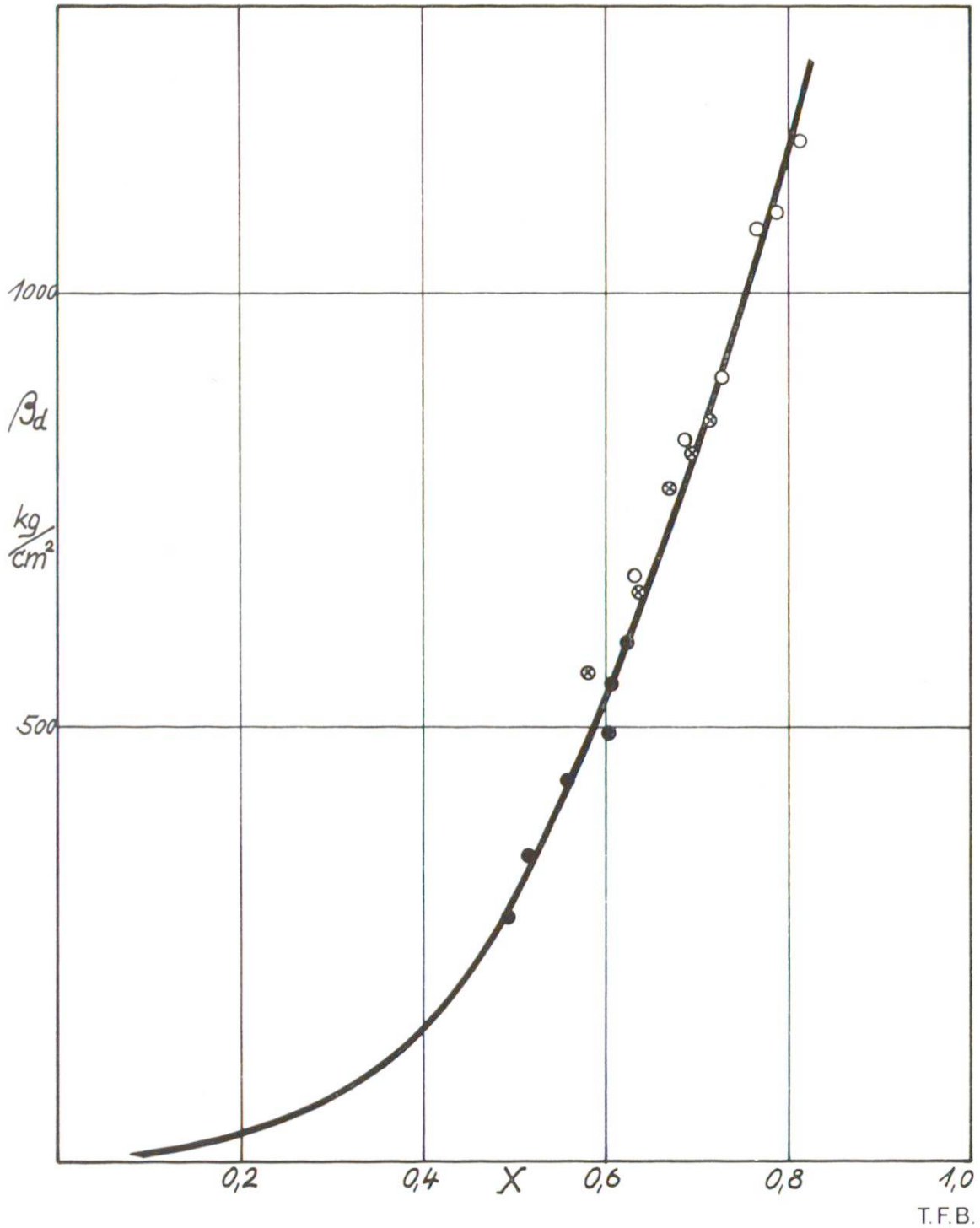


Abb. 4 Abhängigkeit der Würfeldruckfestigkeit (β_d) vom Anteil des Gelvolumens am verfügbaren Raum (X). Die verschieden gekennzeichneten Punkte beziehen sich auf drei verschiedenartige Mörtelmischungen und zeigen, indem sie alle auf der gleichen Kurve liegen, dass es sich hier um eine grundlegende Beziehung handelt (nach T. C. Powers).

Wahrscheinlich wirken sich feine stoffliche Unterschiede der Portlandzemente auf den strukturellen Charakter des Zementgels aus. Diese Gruppe von Einflüssen ist aber wissenschaftlich noch sehr unvollständig geklärt. Sie wird gesamthaft empirisch erfasst durch die Normenfestigkeiten der Zemente und deren Verhältnis zu den entsprechenden Festigkeiten des Betons.

Der Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes auf die Festigkeit des Betons ist, wie auch derjenige der Temperatur, verhältnismässig gering. Man kann annehmen, dass die Eigenfestigkeit des Zementgels verändert wird, je nach der Menge des in den Gelporen locker

gebundenen Wassers. Bei sinkendem Feuchtigkeitsgehalt oder ansteigender Temperatur nimmt die Festigkeit leicht ab. Bedeutsam ist, dass bei reinem Temperatureinfluss gegen 100 °C hin die Abnahme der Festigkeit erlischt (Abb. 3).

Die fundamentale Abhängigkeit der Betonfestigkeit vom Wasserzementwert erklärt sich durch den Anteil des Zementsteins an Kapillarporen. Bei W/Z = 0,5 besteht theoretisch $^1/_8$ des Zement-

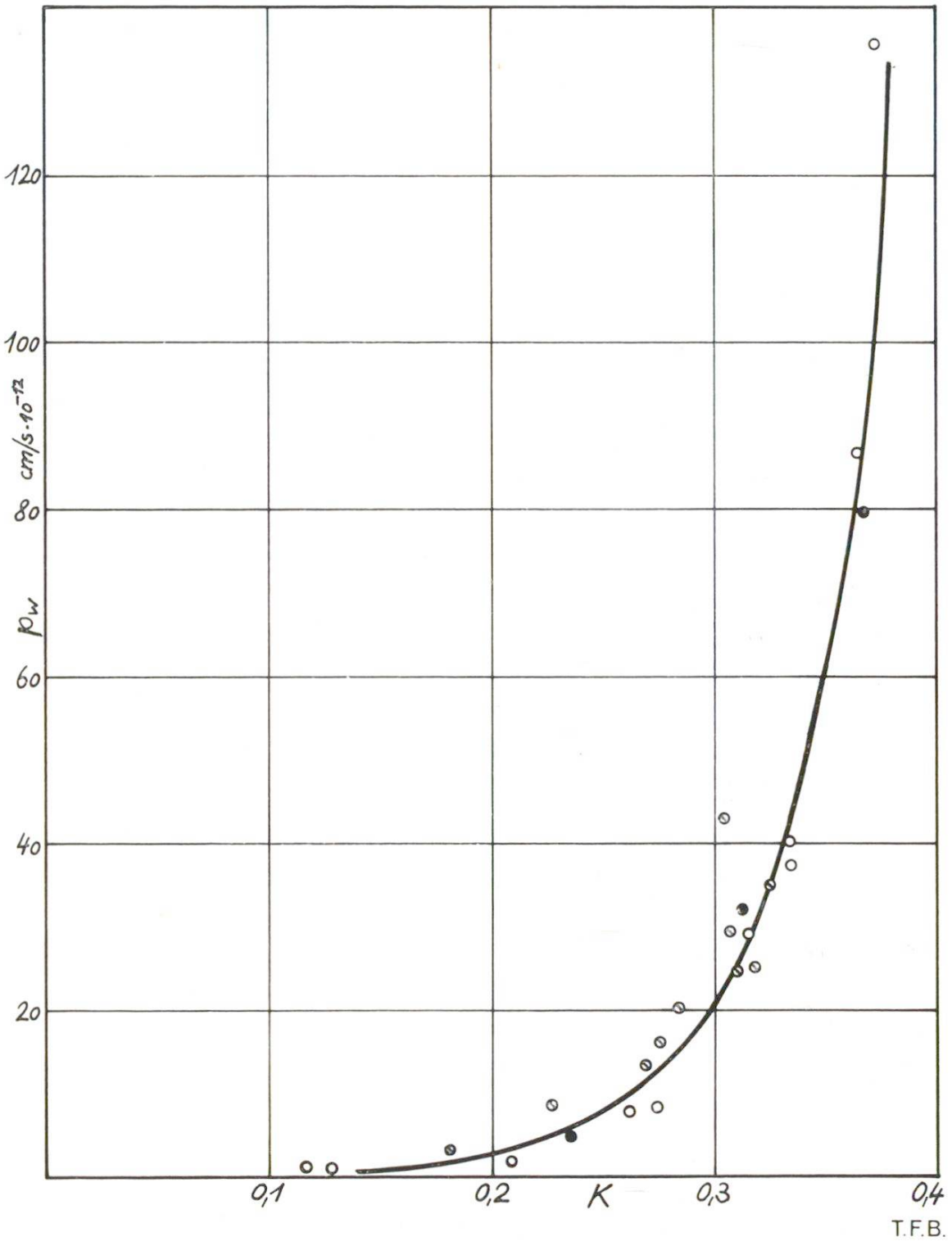


Abb. 5 Abhängigkeit der Wasserdurchlässigkeit (P_W) von der Kapillarporosität (K) des Zementsteins. Die verschieden gekennzeichneten Punkte beziehen sich auf Zementsteine, erstellt mit Zement verschiedener Mahlfeinheit und auf das Alter des Zementsteins bei der Prüfung. Helle Punkte: spez. Oberfläche des Zementes = 3400 cm²/g, geprüft nach 233 bzw. 416 Tagen. Dunkle Punkte: spez. Oberfläche des Zementes = 7800 cm²/g, geprüft nach 325 Tagen (nach T. C. Powers).

steinvolumens aus Kapillarporen, bei W/Z = 0,7 bereits 1/3. Diese augenfälligen strukturellen Änderungen müssen sich naturgemäss auf die Festigkeit auswirken. Hierzu bedarf es keiner weiteren Erklärungen (Abb. 4).

Bezüglich der **Dichtigkeit** des Betons müssen die Kapillar- und Gelporen in Betracht gezogen werden. Diese, 100- bis 1000mal kleiner als jene, setzen einem durchdringenden Stoff einen sehr viel grösseren Widerstand entgegen. Es kommt deshalb auf die Grösse des Anteils an Kapillarporen an, und der Wasserzementwert erweist sich hier wiederum als grundsätzliche Einflussgrösse. Abb. 5 zeigt die Abhängigkeit der Wasserdurchlässigkeit von Zementstein von der Kapillarporosität. Deutlich ist zu erkennen, wie die Durchlässigkeit im Bereich der zusammenhängend werdenden Kapillarporen (W/Z = 0,7, Kapillarporenanteil = 1/3) unverhältnismässig stark zunimmt.

Der Anteil des in den Gelporen adsorbierten Wassers wirkt sich auf die Gasdichtigkeit des Betons aus. Deshalb ist diese im ordentlichen Temperaturbereich stark vom Feuchtigkeitsgehalt und der Temperatur abhängig.

Sehr interessante Ableitungen aus der Struktur des Zementsteins ergeben sich auch bezüglich Quellen, Schwinden, Temperaturdehnung und Kriechen. Diese Einflüsse sollen hier später zur Behandlung kommen. Bezüglich der Frostbeständigkeit sei auf CB Nr. 22/1961 verwiesen. Tr.

Literaturangaben:

T. C. Powers und Mitarbeiter, Permeability of Portlandcement-Paste. J. Am. Concr. Inst. **Proc. 51,** 285 (Nov. 1954).

T. C. Powers, Structure and physical Properties of hardened Portlandcement-Paste. J. Am. Ceramic Soc. **41,** 1 (1958).

T. C. Powers und Mitarbeiter, The Flow of Water in hardened Portlandcement-Paste. Portland Cement Assoc. Res. Dep. Bull. No. 106 (July 1959).

G. Wischers, Diss. TH Aachen 1961, Schriftenreihe der (deutschen) Zementindustrie Heft Nr. 28 (1961).

T. C. Powers, Einige physikalische Geschichtspunkte der Hydratation von Portlandzement. Zement-Kalk-Gips **14,** 81 (März 1961).

L. E. Copeland, Edith G. Schulz, Electron-optical investigations of the hydration products of calciumsilicates and Portlandcement. J. of the Portlandcement Assoc. **4** (Jan. 1962).

Zu jeder weiteren Auskunft steht zur Verfügung die
TECHNISCHE FORSCHUNGS- UND BERATUNGSSTELLE DER SCHWEIZERISCHEN ZEMENTINDUSTRIE WILDEGG, Telephon (064) 8 43 71