

Zum Verhalten des Betons im Frühstadium

Autor(en): **Kral, Stefan**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **104 (1986)**

Heft 14

PDF erstellt am: **28.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-76121>

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.

Zum Verhalten des Betons im Frühstadium

Von Stefan Kral, Wettingen

Eine der wichtigsten Eigenschaften des Betons ist seine Beständigkeit gegenüber schädlichen Einflüssen, welcher der Jubilar bedeutende Arbeiten gewidmet hat. Die Eigenschaften des Betons im Bauwerk sind bekanntlich nicht nur durch seine ursprüngliche Beschaffenheit vorausbestimmt, sondern werden – wie ein Lebewesen neben Erbanlagen – auch von äusseren Einflüssen vorwiegend in frühester Jugend geprägt. Andererseits sind die Vorgänge im Beton im Anfangsstadium seiner Erhärtung infolge neuerer Verarbeitungs- und Bauweisen (Transport-, Spannbeton, Fertigteile u. ä.) wichtiger geworden. Deshalb hat die Technische Stelle der «Holderbank» Management und Beratung AG in ihrem Betonlaboratorium Untersuchungen durchgeführt, um die Vorgänge im Frischbeton in rheologischer Hinsicht besser zu erfassen und damit die Grundlage für ein vertieftes Verständnis der Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften des Frischbetons und denen des erhärteten Betons zu schaffen. Einige Folgerungen aus diesen Studien seien nachfolgend zusammengefasst.

Anfangskonsistenz des Betons

Die *Anfangskonsistenz des Betons*, die zur Beurteilung seiner Verarbeitbarkeit gemessen wird, ist ein physikalisch schlecht definierter Begriff. Ergebnisse von Konsistenzmessungen mit verschiedenen Methoden korrelieren schwach miteinander, jedoch sind verschiedene Messwerte dennoch Erscheinungen eines ganz bestimmten rheologischen Zustandes, und es fragt sich grundsätzlich, ob und wie sie sich auf einen gemeinsamen Nenner und letztlich auf die Zusammensetzung des Betons zurückführen lassen. Der Vergleich von Konsistenzzahlen verschiedener Prüfmethode ist auch für die Baupraxis von Interesse.

Als gemeinsamer Nenner kann die «Viskosität» des Betons dienen bzw. deren Kehrwert, die «Beweglichkeit ϕ ». Die Beweglichkeit von Gemischen aus festen Körpern und einer Flüssigkeit ist bei einem bestimmten Flüssigkeitsgehalt minimal (ihr Zusammenhalt maximal), sie wird bei höheren wie auch bei niedrigeren Flüssigkeitsgehalten grösser als das Minimum (im letzteren Fall wegen geringeren Zusammenhalts). Wie den Brei aus Zement und Wasser kann man auch den Beton als Zweistoff-System aus Zuschlag und Zementleim betrachten. Der Zement hat einen bestimmten Wasserbedarf, der Zuschlag einen bestimmten Leimbedarf für maximalen Zusammenhalt.

Offensichtlich wird eine bestimmte Flüssigkeitsmenge durch die Feststoffe immobilisiert, sei es durch Ad- und Absorption an der Kornoberfläche (Benetzung) oder auch durch chemische Reaktionen. Nur ein Überschuss an Flüssigkeit bleibt mobil und kann zwischen den Körnern fließen. Die Beweglich-

keit des Gemisches ist um so grösser, je grösser das mobile Flüssigkeitsvolumen im Verhältnis zur Kornmenge ist. Die Korneigenschaften kommen durch den spezifischen Flüssigkeitsbedarf und durch den Reibungswiderstand zur Geltung.

Man kann die Beweglichkeit der Zweistoff-Systeme durch nachstehende Gleichung ausdrücken (1):

$$\phi = \frac{\text{Volumen} \times \text{Beweglichkeit der mobilen Flüssigkeit}}{\text{Volumen} \times \text{Reibungswiderstand der Körner}}$$

Im *Zementleim* variiert nur die Menge des Anmachwassers, seine Beschaffenheit praktisch nicht. Der immobilisierte Wasserbedarf des Zements für maximalen Zusammenhalt W_z ist kleiner als der landläufig nach den Zementnormen ermittelte Bedarf an Wasser, welcher auch mobiles Wasser umfasst. Unterschiede der Reibung – namentlich zufolge der Mahlfineinheit und/oder von Zusätzen – wären noch zu untersuchen, sind aber praktisch vernachlässigbar. Denn der Einfluss der Zementart auf die Anfangskonsistenz ist mit üblichen Prüfmethode bei gewohnten Dosierungen kaum messbar, bis auf Extremfälle; er kommt erst bei hohen Leimgehalten und bei der weiteren Konsistenzentwicklung stärker zur Geltung.

Im Gemisch mit Zuschlagstoff wird der mobile Wasseranteil auch durch den Wasserbedarf des Zuschlags – das Benetzungswasser W_a – verringert. Der Zementleim wird steifer als ohne Zuschlag, um so steifer je höher der spezifische Wasserbedarf des Zuschlags und das Zuschlag/Leim-Verhältnis ist.

Formelmässig kann man eine Masszahl der Beweglichkeit des Zementleimes gemäss vereinfachter Gleichung (1) wie folgt ausdrücken:

(2) ohne Zuschlag

$$\phi_p = \frac{W_{mp}}{Z} = \frac{W - Z \cdot W_z}{Z} = \frac{W}{Z} - W_z$$

(3) im Beton $\phi_b =$

$$\frac{W_{mb}}{Z} = \frac{W - Z \cdot W_z - A \cdot W_a}{Z} = \frac{W}{Z} - W_z - W_a \frac{A}{Z}$$

darin bedeuten:

W_{mp} :	mobiler Wasseranteil im Zementleim	[1]
W_{mb} :	mobiler Wasseranteil im Beton	[1]
W :	Wassergehalt	[1]
Z :	Zementgehalt	[kg]
A :	Zuschlaggehalt	[m ³]
W_z :	immobilisierter Wasserbedarf pro kg Zement	[l/kg]
W_a :	Benetzungswasser je m ³ Zuschlag	[l/m ³]

oder in Worten:

Die Masszahl der Beweglichkeit des Zementleimes entspricht dem um den Wasserbedarf der Feststoffe verminderten W/Z -Faktor.

Durch Einsetzen der Gl. (2) in Gl. (3) erhält man:

$$(4) \quad \phi_b = \phi_p - W_a \frac{A}{Z} = \phi_p \left(1 - \frac{A \cdot W_a}{Z \phi_p} \right)$$

Im *Beton* variieren, im Unterschied zum Wasser im Zementleim, die Eigenschaften der Flüssigkeit Zementleim und je nach dessen Zusammensetzung auch der Leimbedarf des Zuschlags. Offenbar beansprucht der Zuschlag für seinen maximalen Zusammenhalt jene Leimmenge, deren eigener Wasserüberschuss den Wasserbedarf des Zuschlags gerade deckt. Dann bleibt kein Wasser mobil, und man erhält $\phi_b = 0$, weil $A \cdot W_a = W - Z \cdot W_z$ ist. Aus Gl. (4) folgt:

$$(5) \quad Z_a = \frac{Z}{A} = \frac{W_a}{\phi_p} \quad \text{und} \quad P_a = p_z \cdot Z_a$$

darin bedeuten:

Z_a :	Zementbedarf je m ³ Zuschlagsstoffvolumen	[kg/m ³]
P_a :	Leimbedarf je m ³ Zuschlagsstoffvolumen	[m ³ /m ³]
p_z :	spezifisches Leimvolumen je kg Zement	[m ³ /kg]

Der Leimbedarf des Zuschlags für maximalen Zusammenhalt, dem Wasserbedarf des Zuschlags direkt und der Beweglichkeit des Leimes umgekehrt proportional, unterscheidet sich vom Leimbedarf für kompakten Beton, welcher nur vom Hohlraumgehalt des verdichteten Zuschlags und nicht von Leimeigenschaften abhängt.

Das mobil verbleibende Leimvolumen P_m beträgt:

$$(6) \quad P_m = P_l - A \cdot P_a = p_z (Z - A \cdot Z_a) \\ = p_z \cdot Z \left(1 - \frac{A \cdot W_a}{Z \cdot \varphi_p} \right)$$

Der Ausdruck in der Klammer ist gleich jenem in Gleichung (4), d. h. der mobile Leimanteil steht zum gesamten Leimvolumen im gleichen Verhältnis wie φ_b/φ_p und wie der mobile Wasseranteil im Beton W_{mb} zu jenem im Leim allein W_{mp} . Daher ist das Produkt aus dem mobilen Leimanteil (6) und seiner Beweglichkeit (4) gemäss Gleichung (1):

$$(7) \quad P_m \cdot \varphi_b = p_z \cdot \varphi_p \left(\frac{\varphi_b}{\varphi_p} \right)^2 \\ = p_z \cdot Z \frac{(\varphi_b)^2}{\varphi_p}$$

Das Quadrat von φ_b ist stets positiv oder Null und drückt mathematisch aus, dass der Beton bei einem Defizit wie bei einem Überschuss an mobilem Wasser ($W - Z \cdot W_z \leq A \cdot W_a$) beweglicher ist als beim Minimum, wenn $W_{mb} = 0$ und $\varphi_b = 0$.

Den Reibungswiderstand der Körner im Nenner der Gleichung (1) kann man durch eine empirische Verhältniszahl R zur Reibung $R = 1$ eines gewählten Vergleichszuschlags ausdrücken.

Die Beweglichkeit des Betons φ_B kann man gemäss Gl. (1) wie folgt formulieren:

$$(8) \quad \varphi_B = \frac{P_m \cdot \varphi_b}{A \cdot R} = \frac{P_l}{A} \cdot \frac{(\varphi_b)^2}{R \cdot \varphi_p}$$

Der Leim/Zuschlag-Faktor P_l/A spielt eine ähnliche Rolle wie der W/Z -Faktor bei der Beweglichkeit des Zementleimes.

Die Reibung und der Wasser- wie Leimbedarf des Zuschlags variieren in sehr weiten Bereichen je nach Material, Kornaufbau, -form und -oberfläche, insbesondere des Sandes. Verschiedene Zuschläge können bei gleichen Mischungsverhältnissen extrem steife bis sehr flüssige Betone ergeben. Die Zuschlagsart hat im Unterschied zur Zementart einen wesentlichen Einfluss auf die Betonkonsistenz.

Konsistenzprüfungen in Beziehung zur Betonzusammensetzung

Das Setzmass nach ASTM C-143 und das Ausbreitmass nach DIN 1048 geben das Ausmass der Verformung ε des Betons durch eine bestimmte Spannung an. Zementleim und Beton verhalten sich wie Bingham'sche Körper, können sich aber anders als eine homogene Flüssigkeit unterhalb der Fließgrenze plastisch verformen. Die gesamte Verformung ist die Summe der Minimalverformung ε_0 bei $W_{mb} = 0$ und des Fließens proportional der Beweglichkeit des Betons:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + b \cdot \varphi_B = \varepsilon_0 + \frac{b}{R} p_z \frac{Z}{A} \cdot \frac{\varphi_b^2}{\varphi_p} [\text{cm}]$$

wobei b ein vom Prüfverfahren abhängiger Steigungsfaktor ist. ε_0 beträgt beim Setzmass, bei welchem bloss die Schwerkraft auf den Beton wirkt, wenige Millimeter, beim Ausbreitmass einige cm und kann als Konstante der Methode gelten, kaum messbar beeinflusst durch die Betonqualität.

Bei der Ausbreitprüfung zerfallen steife Betone infolge der Stösse des Schocktisches, die Methode ist nur auf weichere Betone anwendbar. Bei solchen kann man vereinfachend annehmen, dass sich der ganze Leim durch die Stösse verflüssigt und in die Hohlräume zwischen den Körnern wandert. In diesem Fall kann man annähernd $P_m = P_l$ setzen und

$$\varphi_B = \frac{P_l \cdot \varphi_b}{A \cdot R} = p_z \frac{W_{mb}}{A \cdot R}, \text{ da } P_l = p_z \cdot Z$$

und $Z \cdot \varphi_b = W_{mb}$ ist. Das Ausbreitmass weicherer Betone nimmt annähernd linear mit dem mobilen Wassergehalt je m^3 Zuschlag zu.

Bei der *VeBe-Methode* nach RILEM-Empfehlung CPC 2.2 ist die Verformung gegeben, gemessen wird die hierzu erforderliche Arbeit als Rüttelzeit. Im gut reproduzierbaren Messbereich weicher Betone ist die Fließgrenze im Verhältnis zur Rüttelenergie vernachlässigbar, die Rüttelzeit ist umgekehrt proportional der Beweglichkeit des Betons:

$\text{VeBe} = b/\varphi_B$ [s]. Da die Vibration den ganzen Leim mobilisiert, kann für φ_B der vereinfachte Ausdruck wie beim Ausbreitmass weicher Betone eingesetzt werden.

Das Verdichtungsmaß nach Walz, DIN 1048, die Messung einer Volumenände-

rung ungeachtet des Arbeitsaufwandes, unterscheidet sich grundsätzlich von den Verformungsprüfungen.

Das Volumen von Zementleim und Beton entspricht dem jeweiligen Volumen des Zement- bzw. Zuschlag-Skeletts samt Hohlräumen, solange die Flüssigkeit in den Hohlräumen Platz hat und sich darin befindet. Soweit sind die Volumina, wie jene von Gefässen, unabhängig vom Flüssigkeitsgehalt; der Luftgehalt ist dem Flüssigkeitsgehalt komplementär.

Das Leim- und Betonvolumen ist grösser als das Skelett, wenn die Korndistanzen durch Flüssigkeit vergrössert werden, und zwar:

- wenn das Flüssigkeitsvolumen das Hohlraumvolumen überschreitet,
- beim unverdichteten Beton durch Leim, der an den Körnern haftet.

Vor Verdichtung ist das Volumen der Zementpaste P_l dem Zementgewicht proportional, solange der W/Z -Faktor nicht grösser ist als der Hohlraumgehalt des Zementes:

$$(9) \quad P_l = 10^{-3} \cdot Z \left[\left(\frac{1}{\gamma_z} + h_z \right) + \left(\frac{W}{Z} - h_z \right) \right] [\text{m}^3]$$

spezifisches Skelettvolumen + Wasserüberschuss wenn vorhanden

wobei:

γ_z : spezifisches Gewicht des Zementes [kg/dm³]

h_z : Hohlraumvolumen des Zementes [l]

Für das Volumen des unverdichteten Betons B_l gilt sinngemäss das Gleiche; doch kommt die Vergrösserung durch die immobilisierte Leimschicht an den Körnern hinzu, auch wenn der mobile Leimanteil die Hohlräume nur teilweise ausfüllt:

$$B_l = A(1 + h_a + P_l),$$

wobei h_a das spezifische Hohlraumvolumen des losen Zuschlags je m^3 Stoffvolumen bezeichnet.

Nach Verdichtung kann man das Leim- und Betonvolumen, bei Vernachlässigung der Luftreste in Poren und Kapillaren, der Summe der Komponenten nach Stoffraum-Rechnung gleichsetzen:

$$P = \frac{Z}{\gamma_z} + W \quad \text{und}$$

$$B = A + P = A \left(1 + \frac{P}{A} \right) [\text{m}^3]$$

Das Verdichtungsmass ist das Volumenverhältnis des lose ins Gefäss gefüllten zum maximal verdichteten Beton:

$$(10) \quad \frac{B_1}{B} = \frac{B_1/A}{B/A} = \frac{1 + h_a + P_1}{1 + P/A}$$

Es kann auch durch die Volumenabnahme, gleich der Abnahme des Luftgehaltes in Zuschlags-Hohlräumen und im Leim, ausgedrückt werden. Die aus beiden entweichenden Luftvolumina ΔL sind gleich den Hohlraumvolumina vermindert um die mobilen Flüssigkeitsvolumina:

$$(10a) \quad \frac{B_1}{B} = \frac{B + L}{B} = 1 + \frac{\Delta L/A}{1 + P/A}$$

im Zuschlag: $\Delta L_a = A(h_a - P_m/A)$

im Leim: $\Delta L_p = Z(h_z - W_m/Z)$

Die Hohlraumgehalte nach losem Einfüllen werden von der Reibung beeinflusst. Der Luftgehalt kann auch im losen Zementleim mit niedrigen W/Z -Faktoren beträchtlich sein. Die Verteilung des Leimes auf Kornumhüllung und Hohlräume hängt von seiner Beweglichkeit ab, diese vom Leim/Zuschlag-Faktor und vom Wasserbedarf beider Feststoffe. Somit wirken dieselben Einflussfaktoren auf das Verdichtungsmass wie auf die Verformungsprüfungen. Auch die Messung der Volumenabnahme ist ein direktes Mass der Konsistenz.

Anwendung. Die Formeln für Konsistenzzahlen in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung können je nach gegebenen und gesuchten Grössen umgebildet und mit statistisch ermittelten Parametern auch als Programme von Kleinrechnern verwendet werden. Z. B. kann man bei vorgeschriebener Festigkeit und dadurch gegebenem W/Z -Faktor den für die gewünschte Konsistenz erforderlichen Zementgehalt ermitteln. Ein Beispiel ist auch das Schätzen der nötigen Wasserzugabe zur Korrektur zu steifer Betone, namentlich nach längerem Transport. Dadurch lässt sich ein schädlicher Überschuss an Wasser vermeiden.

Der Ausdruck und die Dosierung der Zement- und Wassermenge im Verhältnis zum Volumen des Zuschlags anstatt wie üblich des Betons eliminiert das Zuschlags- und Betonvolumen als Variable der Berechnung, welche ohnehin durch die ersteren gegeben sind. Die Formeln können nicht alle Einflüsse umfassen, sie gestatten eine praktisch ausreichende Annäherung.

Die frühe Entwicklung des Betons und äussere Einwirkungen

Das *Ansteifen von Zementleim und Frischbeton* schreitet vom Mischen an stetig fort, auch während der sog. Ruheperiode der Hydratation. Das zeigen wiederholte Konsistenzprüfungen wie auch Messungen der Schall-Laufzeit an Frischbeton. Zuweilen störende «Frühversteifung» ist ein Sonderfall des Ansteifens.

Gleichzeitig wird zunehmend Wasser durch den Zement (allenfalls auch durch den Zuschlag) immobilisiert, auch ohne erhebliche chemische Reaktion während der Ruheperiode, wohl infolge der Vergrösserung der Zementoberfläche. Die fortschreitende Immobilisierung wird durch das Absaugen von Wasser aus Leimproben in verschiedenen Zeitabständen nach dem Mischen bestätigt, indirekt auch durch den Zeitverlauf der Wasserverdunstung.

Das Ansteifen verläuft mit veränderlicher Geschwindigkeit und einer Tendenz zu ihrer Umkehrung: Zemente, die zunächst langsamer ansteifen, neigen zu frühem Erstarren und umgekehrt.

Die *Verdunstung von Wasser* aus Frischbeton ist wesentlich von den Umweltbedingungen abhängig. Sie verlangsamt sich mit dem Ansteifen, jedoch bedeutend rascher, als der Abnahme des Wassergehaltes entsprechen würde. Aus dem Ausmass der Verdunstung aus Betonen verschiedener Zusammensetzung ist zu schliessen, dass bei gewöhnlichen Temperaturen nur der mobile Wasseranteil zur Verdunstung beiträgt. Dieser Wasseranteil nimmt schneller ab als der gesamte Wassergehalt, nämlich nicht nur durch die Verdunstung nach aussen, sondern zugleich durch zunehmende Immobilisierung. Das erklärt den raschen Abfall der Verdunstungsgeschwindigkeit.

Das *Schwinden des Betons* ist eine Folge des Wasserverlustes, im Unterschied zur Volumenabnahme ohne Massenverlust durch «Setzen» und chemisches «Schrumpfen». Der Verlauf des Schwindens hängt auch vom Ansteifen ab: Solange der Beton weich genug ist, um sich der Form anzupassen, also während des schnellsten Wasserverlustes, bewirkt die Volumenabnahme nur ein Absinken der Oberfläche. Das *Schwinden nur in Vertikalrichtung* kann weit bedeutender sein als das spätere *horizontale Schwinden*, das erst einsetzt, wenn der Beton durch das Ansteifen selbsttragend wird. Dann folgt während kurzer Zeit, bei schon ausreichender aber noch nicht zu grosser Steife,

schnelles Schwinden, abgebremst durch den Erstarrungsbeginn.

Die kurze Periode schnellen Schwindens bringt die Gefahr von *Frühschwindrissen*, doch nur wenn zu dieser Zeit Wasser entweicht und der Beton gehindert ist, seine Umrisse der Volumenabnahme anzupassen. Solche Risse – von Rissen anderer Art ist hier nicht die Rede – sind oft erst spät erkennbar, aber schon vor dem Erstarren entstanden. Nach dem Erstarren steht dem geringen Schwinden die schnell zunehmende Zugfestigkeit gegenüber.

Während der Anfangsphase des Vertikalschwindens werden die späteren Betoneigenschaften durch Austrocknung günstig beeinflusst. Während überschüssiges, der Verarbeitbarkeit halber dosiertes Wasser noch ohne Rissgefahr entweicht und der W/Z -Faktor sinkt, verdichtet sich der Beton selbsttätig durch vertikale Volumenabnahme.

Die *Wirkung der Temperatur* auf das Ansteifen und Erhärten des Betons kehrt sich nach einer gewissen Zeit um. Der Vorsprung und der Rückstand der Festigkeit infolge höherer bzw. tieferer Temperatur nimmt nach Erreichen eines Maximums wieder ab und wird schliesslich ausgeglichen und sogar überkompensiert. Die nach dem Maximum herrschende Temperatur spielt nur mehr eine geringe Rolle, die nachherige Festigkeitsentwicklung wird im wesentlichen durch die Temperatur in der ersten Phase vorausbestimmt.

Folgerungen: Die Umkehrung des Temperatureinflusses auf die Festigkeit und die Inversion des Ansteifens deuten darauf, dass das Ansteifen wie das Erhärten mit der Bildung von Strukturen einhergehen, welche dann die Vorgänge verzögern. Zum Beispiel kann für eine spätere Verarbeitung gerade ein anfänglich schneller ansteifender Zement unter Umständen günstiger sein als ein anderer, der bei sofortiger Verarbeitung eine bessere Konsistenz ergibt.

– Aufgrund des Verlaufes von Wasserverlust und Schwinden ist eine anfängliche Austrocknung des Betons vorteilhaft. Der Schutz gegen Austrocknung ist erst von einer gewissen Steife an nötig.

– Aus dem Verlauf der Temperaturwirkung folgt, dass es unwirtschaftlich ist, eine Wärmebehandlung zur Beschleunigung der Erhärtung nach einem gewissen Stadium fortzusetzen.

– Die angeführten Beispiele belegen die Bedeutung des Verhaltens und der Behandlung des Betons sowie der Einflüsse auf ihn im frühesten Stadium für seine spätere Qualität.

Adresse des Verfassers: Dr. Stefan Kral, vormals Technische Stelle der «Holderbank» Management und Beratung AG, Wiesenstrasse 12, 5430 Wettlingen.