

Sachstandbericht
Frischbeton – Eigenschaften, Einflüsse und
Prüfungen

von

Christoph Alfes
Olaf Aßbrock
Christoph Begemann
Rolf Breitenbücher
Amela Cokovic
Dario Cotardo
Eberhard Eickschen
Petra Fischer
Eugen Kleen
Hannes Krüger
Ludger Lohaus
Viktor Mechtcherine
Lars Meyer
Matthias Middel
Christoph Müller
Harald S. Müller
Tobias Schack
Patrick Schäffel
Egor Secieru
Frank Spörel
Katja Voland
Andreas Westendarp
Bou-Young Youn-Çale

Herausgeber:

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.
Budapester Straße 31
10787 Berlin
info@dafstb.de

© 2020 Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.
Budapester Straße 31
10787 Berlin

Telefon: +49 30 2693-1320
Telefax: +49 30 2693-1319
Internet: www.dafstb.de
Email: info@dafstb.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in elektronischen Systemen.

Die im Werk enthaltenen Inhalte wurden vom Verfasser und Verlag sorgfältig erarbeitet und geprüft. Eine Gewährleistung für die Richtigkeit des Inhalts wird gleichwohl nicht übernommen. Der Verlag haftet nur für Schäden, die auf Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit seitens des Verlages zurückzuführen sind. Im Übrigen ist die Haftung ausgeschlossen.

Druck: Medienhaus Plump GmbH, Rheinbreitbach

Gedruckt auf säurefreiem, alterungsbeständigem Papier nach DIN EN ISO 9706

ISSN 0171-7197
ISBN 978-3-410-65843-6

Vorwort und Einleitung

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Zusammensetzung von Beton von einem klassischen „3-Stoff-System“ hin zu einem modernen „5-Stoff-System“ weiterentwickelt. Die Bandbreite von genormten oder bauaufsichtlich zugelassenen Betonzusätzen, die dem Beton zum Erreichen bestimmter Frisch- und Festbetoneigenschaften (mechanische Eigenschaften und Dauerhaftigkeit) zugegeben werden, hat stetig zugenommen und erweitert sich kontinuierlich.

Diese Entwicklung hat es ermöglicht, Betone mit zuvor nicht gekannten Eigenschaften herzustellen. Exemplarisch seien Hochleistungsbetone mit besonders dichtem Gefüge und einem hohen Widerstand gegenüber äußeren Einwirkungen sowie leicht verarbeitbare Frischbetone genannt.

Gleichzeitig zeigt sich dabei aber auch, dass solche Betone vielfach sehr sensibel auf oft nur geringfügige „Störeinflüsse“ reagieren, das heißt weniger robust sein können. So können schon kleine Abweichungen in den Eigenschaften der Ausgangsstoffe, in der Dosiergenauigkeit, in der Mischintensität oder auch in der Temperatur unerwartet zu einem veränderten rheologischen Verhalten des Frischbetons führen.

Während für Sonderbetone wie Selbstverdichtender Beton (SVB) und (Ultra-)Hochfester Beton ((U)HFB) ein solches sensibles Verhalten durchaus bekannt ist, wird dem Thema Robustheit im Bereich der Normalbetone bislang nur wenig Bedeutung beigemessen. Bei Betonen bis zum Konsistenzbereich F3 (früher: Regelkonsistenz KR) stellen sich in der Regel auch keine Schwierigkeiten ein.

Hinsichtlich der eingesetzten Konsistenzen zeigt sich ein gewisser Trend hin zu Betonen sehr weicher und fließfähiger Konsistenz, während der Anteil von Betonen plastischer und weicher Konsistenz eher rückläufig ist. In Tabelle 1 sind aus dem Bereich Transportbeton die jeweiligen Anteile der ausgelieferten Konsistenz zwischen 2003 und 2017 dargestellt; demnach ist der Anteil der F4-Betone in diesem Zeitraum auf das rund zehnfache angestiegen.

Tabelle 1: Prozentualer Anteil der Betonkonsistenzen an der Gesamtproduktion, Stand 26.11.2018 (Quelle: Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (BTB)).

Table 1: Percentage of share of concrete consistency in total production, updated 26.11.2018. (Source: German Ready-Mixed Concrete Association (BTB)).

Konsistenz	2017	2015	2013	2011	2009	2007	2005	2003
F1 (steif)	9,9	11,4	12,2	10,0	11,9	12,8	9,6	5,3
F2 (plastisch)	4,4	4,5	5,6	6,2	10,1	9,4	8,6	11,9
F3 (weich)	66,9	66,7	67,5	68,9	65,8	68,2	73,3	72,2
F4 (sehr weich)	12,6	11,7	8,9	9,0	6,5	5,5	5,7	1,3
F5 (fließfähig)	3,9	3,9	3,4	3,8	3,9	2,8	2,2	1,1
F6 (sehr fließfähig)	0,9	1,1	1,2	0,9	1,3	1,2	0,5	3,9
SVB (selbstverdichtend)	1,3	0,8	1,2	1,2	0,5	0,1	0,1	4,4

Die heutigen Betone kommen durch den Einsatz hochwirksamer Fließmittel in der Regel mit geringeren Wasser- und Leimgehalten aus, um die gewünschte Konsistenz zu erreichen. Gleichzeitig werden auch immer häufiger neue Betonausgangsstoffe verwendet, mit denen im konkreten Einzelfall nur wenige Langzeiterfahrungen über deren Auswirkungen in Kombination mit den vielfältigen anderen Ausgangsstoffen auf das Verhalten im Frisch- und Festbeton vorliegen. So kann sich mit bestimmten Fließmitteln die Verarbeitbarkeitszeit (Erstarren) deutlich verlängern. Die verwendeten Zementarten haben sich in den letzten Jahren deutlich in Richtung größerer Anteile an Zumahlstoffen verschoben. Mit dem Trend zu immer weicheren Konsistenzen geht auch bei diesen Normalbetonen eine erhöhte Sensibilität gegenüber Schwankungen in den Herstell-, Umgebungs- und Verarbeitungsbedingungen einher. Dies kann sich unter Umständen erst beim Verdichten des Betons zeigen, wenn Letztere infolge einer nicht

auf die Konsistenz abgestimmten Verdichtung (Überverdichtung) zu Inhomogenitäten und damit zu lokal ungünstigen Eigenschaften, insbesondere hinsichtlich der Dauerhaftigkeit im Bauteil führen. Damit stellt auch im herkömmlichen Betonbau das Thema Robustheit der Frischbetone zunehmend eine Herausforderung dar.

Im Regelfall wird Frischbeton heute lediglich anhand seiner Konsistenz (Ausbreit- oder Verdichtungsmaß) und den Angaben auf dem Lieferschein beurteilt. Damit kann dessen rheologisches Verhalten jedoch nicht hinreichend beschrieben und bewertet werden. Weitere relevante Leistungsmerkmale, wie die „Klebrigkeit“, Pumpbarkeit oder Mischungsstabilität der Betone können mit dieser Prüfung nicht hinreichend erfasst werden. So können zwei Betone zwar die gleiche Ausgangskonsistenz aufweisen, sich hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit beziehungsweise ihrer Mischungsstabilität aufgrund unterschiedlicher Leimmenge und Leimviskosität allerdings signifikant unterscheiden. Normierte Prüfverfahren zur umfassenden und zielsicheren Beurteilung der Verarbeitbarkeit, Mischungsstabilität oder Robustheit von Betonen fehlen weitestgehend. Eine Vorhersage des Frischbetonverhaltens anhand von eindeutigen rheologischen Parametern ist bisher nur eingeschränkt möglich; auf Grund der Komplexität der Laborprüfmethoden sind diese darüber hinaus meist auch nicht baustellentauglich.

Zur Sicherstellung einer hinreichenden Robustheit des Frischbetons wird meist deskriptiv auf Erfahrungswerte hinsichtlich der Betonzusammensetzung (z.B. Leimgehalt) zurückgegriffen. Auf Grund der zunehmenden Vielfalt an stofflichen Einflussgrößen (Art, Feinheit, chemische Zusammensetzung) sowie den immer komplexer werdenden Interaktionen zwischen diesen kann ein solches deskriptives Vorgehen heute weder die Verarbeitbarkeit und Mischungsstabilität noch die Robustheit generell sicherstellen.

Ziel des vorliegenden Sachstandberichtes ist es, einen Überblick über den aktuellen Kenntnisstand hinsichtlich der maßgebenden Frischbetoneigenschaften zu liefern. Zum einen soll aufgezeigt werden, wie diese Eigenschaften durch die Betonzusammensetzung erzielt und gesteuert werden können. Zum anderen wird erörtert, wie sich unvermeidbare Schwankungen sowohl aus den Ausgangsstoffen als auch aus der Betonzusammensetzung ebenso wie Interaktionen zwischen den einzelnen Komponenten auf die Eigenschaften, die Mischungsstabilität und die Robustheit der Frischbetone auswirken.

Im Weiteren gibt der Sachstandbericht einen Überblick über den aktuellen Stand der Frischbetonprüfungen, die in der täglichen Baupraxis angewendet werden. Dabei werden sowohl nationale als auch internationale Prüfmethoden beschrieben. Ferner werden Ansätze neuerer Prüfmethoden vorgestellt, mit denen zukünftig spezielle Frischbetoneigenschaften, wie zum Beispiel die Pumpfähigkeit, Pumpstabilität oder die Mischungsstabilität unter Rüttelwirkung charakterisiert werden können.

Der Sachstandbericht dient damit einerseits dazu, kompakt einen schnellen Einblick in heute maßgebliche Frischbetoneigenschaften und den damit einhergehenden Einflussgrößen bei der Herstellung und der Verarbeitung zu geben. Andererseits zeigt er die vielfach noch offenen Aspekte auf, die es durch zukünftige Forschungsarbeiten zu lösen gilt, um die Möglichkeiten der modernen Betontechnologie im konventionellen Betonbau zielsicher nutzen zu können.

Inhaltsverzeichnis

1	Begriffe, Definitionen, Symbole	8
1.1	Begriffe in alphabetischer Reihenfolge.....	8
1.1.1	Entmischungsformen	8
1.1.2	Entmischungsneigung	9
1.1.3	Sedimentationsstabilität.....	9
1.1.4	Stabilität	9
1.1.5	Robustheit.....	9
1.1.6	Wasserabsondern	10
Kapitel I: Betonherstellung und Transport.....		11
2	Relevante Frischbetoneigenschaften bei der Betonherstellung.....	11
2.1	Konsistenz	11
2.1.1	Einführung	11
2.1.2	Einfluss der Temperatur	14
2.1.3	Einflüsse aus Dosierreihenfolge, Mischintensität und Mischdauer	17
2.1.4	Einfluss der Ausgangsstoffe und der Betonzusammensetzung.....	19
2.1.4.1	Ausgangsstoffe	19
2.1.4.2	Schwankungen der Eigenschaften der Ausgangsstoffe.....	20
2.1.4.3	Interaktionen der Ausgangsstoffe	26
2.1.4.4	Einflüsse aus der Betonzusammensetzung	28
2.1.5	Zusammenfassung	33
2.2	Mischungsstabilität	33
2.2.1	Sedimentationsstabilität.....	33
2.2.1.1	Einführung	33
2.2.1.2	Einflüsse aus Dosierreihenfolge, Mischintensität und Mischdauer	34
2.2.1.3	Einfluss der Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung	34
2.2.1.3.1	Schwankungen der Eigenschaften der Ausgangsstoffe	34
2.2.1.3.2	Einflüsse aus der Betonzusammensetzung.....	35
2.2.2	Wasserabsondern	36
2.2.2.1	Einführung	36
2.2.2.2	Einflüsse aus Dosierreihenfolge, Mischintensität und Mischdauer	37
2.2.2.3	Einfluss der Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung	37
2.2.2.3.1	Ausgangsstoffe	37
2.2.2.3.2	Schwankungen der Eigenschaften der Ausgangsstoffe	40
2.2.2.3.3	Interaktionen der Ausgangsstoffe	41
2.2.2.3.4	Einflüsse aus der Betonzusammensetzung.....	43
2.2.3	Zusammenfassung	49
2.3	Luftgehalt.....	49
2.3.1	Einführung	49
2.3.2	Einflüsse aus Temperatur und Witterung	51
2.3.3	Einflüsse aus Dosierreihenfolge, Mischintensität, Mischdauer und Transport.....	53

2.3.4	Einfluss der Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung	55
2.3.4.1	Ausgangsstoffe	55
2.3.4.2	Schwankungen der Eigenschaften der Ausgangsstoffe	56
2.3.4.3	Interaktionen der Ausgangsstoffe	57
2.3.5	Zusammenfassung	58
2.4	Pumpbarkeit und Pumpstabilität	59
2.4.1	Einführung	59
2.4.2	Einfluss der Temperatur	64
2.4.3	Einflüsse aus Dosierreihenfolge, Mischintensität und Mischdauer	65
2.4.4	Einfluss der Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung	65
2.4.4.1	Ausgangsstoffe	65
2.4.4.2	Einflüsse aus der Betonzusammensetzung	66
2.4.5	Zusammenfassung	70
2.5	Oberflächenbearbeitbarkeit	70
2.5.1	Einführung	70
2.5.2	Einflüsse aus Temperatur und Witterung	71
2.5.3	Einflüsse aus Dosierreihenfolge, Mischintensität und Mischdauer	71
2.5.4	Einfluss der Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung	71
2.5.4.1	Ausgangsstoffe	71
2.5.4.2	Einflüsse aus der Betonzusammensetzung	73
2.5.5	Zusammenfassung	75
2.6	Verarbeitbarkeit, Klebrigkeit und Verdichtbarkeit	76
2.6.1	Einführung	76
2.6.2	Einfluss der Temperatur	78
2.6.3	Einflüsse aus Dosierreihenfolge, Mischintensität und Mischdauer	81
2.6.4	Einfluss der Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung	81
2.6.4.1	Ausgangsstoffe	81
2.6.4.2	Schwankungen der Eigenschaften der Ausgangsstoffe	82
2.6.5	Zusammenfassung	83
3	Einflüsse aus Transport bis zur Übergabe auf der Baustelle auf die Frischbetoneigenschaften..	85
3.1	Transport	85
3.2	Nachdosierung von Zusatzmitteln	86
Kapitel II: Betoneinbau		87
4	Einflüsse aus Förderung und Einbau auf die Frischbetoneigenschaften	87
4.1	Einführung	87
4.2	Pumpen	87
4.2.1	Allgemeines	87
4.2.2	Einfluss des Pumpens auf die Frischbetoneigenschaften	87
4.2.3	Rohrgeometrie	91
4.2.4	Vertikales Pumpen	94
4.3	Verdichtung	95
4.3.1	Art und Intensität	95

4.3.2	Marktsondierung.....	97
4.4	Frischbetondruck.....	98
4.5	Einfluss der Schalung.....	99
4.6	Fallhöhe.....	100
4.7	Betoniergeschwindigkeit.....	101
4.8	Bewehrung.....	101
4.9	Entwässerungsverhalten.....	102
Kapitel III: Prüfverfahren und -kriterien.....		104
5	Frischbetonprüfungen.....	104
5.1	Einführung.....	104
5.2	Konsistenz.....	104
5.2.1	Ausbreitmaß.....	105
5.2.2	Verdichtungsmaß.....	105
5.2.3	Setzmaß.....	105
5.3	Mischungsstabilität.....	105
5.3.1	Wasserabsondern.....	106
5.3.2	Sedimentation der groben Gesteinskörnung.....	107
5.4	Luftgehalt.....	112
5.4.1	Anforderungen an das Luftporensystem.....	112
5.4.2	Prüfverfahren.....	114
5.4.2.1	Luftgehalt des Frischbetons.....	114
5.4.2.2	Luftporenkennwerte am Frischbeton.....	115
5.5	Pumpbarkeit und Pumpstabilität.....	116
5.5.1	Pumpbarkeit von Beton.....	116
5.5.1.1	Gleitrohr-Rheometer SLIPER.....	116
5.5.1.2	Verifikation der Pumpaktionsvorhersagen durch Großpumpversuche.....	118
5.5.1.3	Pumpverhalten von Normal- und Sonderbetonen.....	119
5.5.2	Prüfverfahren zur Pumpstabilität.....	120
5.5.2.1	Druckverfahren mittels Druckluft.....	121
5.5.2.2	Druckverfahren mittels Druckwasser.....	122
5.5.2.3	Druckverfahren mittels Druckstempel.....	122
5.6	Oberflächenbearbeitbarkeit.....	125
5.6.1	Kegel-Penetrationsprüfung.....	125
5.6.2	Oberflächenbearbeitung durch Glätten.....	126
5.7	Verarbeitbarkeit, Klebrigkeit und Verdichtbarkeit.....	128
5.7.1	Verarbeitbarkeit.....	128
5.7.2	Klebrigkeit.....	129
5.7.3	Verdichtbarkeit.....	133
Kapitel IV: Zusammenfassung und Ausblick.....		134
Literatur.....		137

1.1.2 Entmischungsneigung

Die Entmischungsneigung beschreibt das Bestreben einzelner Bestandteile des Frischbetons sich von den anderen zu separieren. Sie kann als messbare Auswirkung eines oder mehrerer Entmischungsprozesse angesehen werden. Die Neigung des Betons zum Entmischen ist abhängig von der Einwirkung auf den Beton und dem Widerstand, den der Beton dieser Einwirkung entgegensetzen kann. Natürliche und kontinuierlich wirkende Einwirkungen stellen die Gravitationskraft und die Brown'sche Molekularbewegung dar. Darüber hinaus können äußere Einwirkungen, wie beispielsweise der Pumpendruck während des Pumpvorganges oder die Vibrationsenergie während der Verdichtung, Entmischungsvorgänge auslösen oder verstärken. Die Widerstandsseite hängt von der Wahl der Ausgangsstoffe und der Zusammensetzung des Betons ab. Die für den Widerstand gegenüber Entmischen maßgebenden Frischbetoneigenschaften lassen sich vornehmlich über die Rheologie des Baustoffsystems beschreiben. Die Struktur des Frischbetons als Funktion seiner rheologischen Eigenschaften (bspw. Fließgrenze und Viskosität) bestimmt, ob und wie schnell infolge einer bestimmten Einwirkung Entmischungsprozesse ablaufen. Entmischungsneigung oder Mischungsstabilität sind bislang nicht anhand eines allgemein anerkannten Prüfverfahrens definiert.

1.1.3 Sedimentationsstabilität

Sedimentationsstabilität betrachtet als Teil der Mischungsstabilität ein Absinken der groben Gesteinskörnung. Sie meint somit die Eigenschaft des Betons – auch unter dem Einfluss von üblicher Rüttelenergie – soweit stabil zu bleiben, dass es nicht oder nur begrenzt zu einer unerwünschten Trennung zwischen der Leim- oder Mörtelphase und der groben Gesteinskörnung kommt.

1.1.4 Stabilität

Die Stabilität ist eine als Anforderung formulierte notwendige Eigenschaft eines Frischbetons, nicht unzulässig zu entmischen, selbst dann nicht, wenn auf ihn diverse übliche Kräfte und Erschütterungen einwirken. Konkret bedeutet dies, dass der Frischbeton gegenüber praxisüblichen Rüttel-, Pump- und Verarbeitungseinwirkungen soweit homogen bleiben muss, dass die wesentlichen Festbetoneigenschaften nicht unzulässig variieren [152][153].

1.1.5 Robustheit

Während Stabilität die Eigenschaft des Betons meint, unter planmäßigen Einwirkungen (Schwerkraft, fachgerechtes Rütteln etc.) weitgehend homogen zu bleiben, versteht man unter Robustheit die systemische Eigenschaft eines Betons, auch auf Abweichungen vom Soll (Störeinflüsse, wie Wassergehaltsschwankungen und chargenbedingte Schwankungen der Ausgangsstoffe, wechselnde Umgebungsbedingungen, Verzögerungen im Bauablauf, unplanmäßig langes Rütteln u.a.), also übliche Schwankungen oder ungeplante Einwirkungen, „gutmütig“ (vorhersehbar) zu reagieren. Diese „Gutmütigkeit“ kann sich in zweierlei Hinsicht darstellen:

- Entweder reagiert das System nur sehr schwach auf bestimmte Störeinflüsse, so dass die Funktionsfähigkeit des Systems (also die wesentlichen Frisch- und Festbetoneigenschaften) ohne weitere Maßnahmen erhalten bleiben;
- oder das System reagiert deutlich, aber vorhersehbar auf Störeinflüsse, so dass ein Regelkreis installiert werden kann, mit dessen Hilfe die unerwünschten Auswirkungen der Störeinflüsse kompensiert werden können.

Robust ist ein Beton also dann, wenn es auch bei Störungen nicht zu chaotischen, unerwarteten oder nicht vorhersehbaren Zuständen kommt. Somit können Betone, die bei „Soll-Zusammensetzung“ und „Soll-Randbedingungen“ stabil sind, bei geringer Robustheit, zum Beispiel bei erhöhter Eigenfeuchte der Gesteinskörnung, dennoch entmischen.

1.1.6 Wasserabsondern

Das Absondern von Wasser ist meist eine unerwünschte Form der Entmischung. Das sogenannte Betonbluten ist ein Phänomen, das auf eine Mikrosedimentation von feinen Partikeln (Zement, Zusatzstoffe und Feinstanteile der Gesteinskörnung) innerhalb der Bindemittelsuspension zurückzuführen ist. Die Mikrosedimentation führt dazu, dass sich Porenlösung zeitverzögert an der Oberfläche des Frischbetons ansammelt.

2 Relevante Frischbetoneigenschaften bei der Betonherstellung

2.1 Konsistenz

2.1.1 Einführung

Heutige Betonbauwerke werden für eine Nutzung von mehr als 50 Jahren, bei einigen Infrastrukturbauwerken bis zu 150 Jahren, geplant und bemessen. Die in dieser Zeit zu erwartenden Einwirkungen und die Baustoffeigenschaften sind wesentliche Eingangsgrößen der Berechnungsmodelle für das prognostizierte langfristige Bauteil- und Bauwerksverhalten und zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit.

Zur Erreichung dieser Planungsziele wird im Betonbau in aller Regel ein makroskopisch homogenes und dichtes, isotropes Gefüge unterstellt, das die angenommenen Festbetoneigenschaften sicherstellen soll.

Die Voraussetzungen, dass sich die erforderlichen Festbetoneigenschaften im Bauteil einstellen können, werden in einem – im Vergleich zur Bauteilnutzung – kleinen Zeitfenster, der Betonherstellung, des Betoneinbaus, der Nachbehandlung und gegebenenfalls einer weiteren Oberflächenbearbeitung gelegt, in dem die Bauausführenden den Beton verarbeiten.

Der Erfolg der Betonverarbeitung hängt neben der Witterung und der Qualifikation der Ausführenden von einer Vielzahl baustofflicher und baubetrieblicher, sich gegenseitig beeinflussender, Einflussgrößen ab. Bei der Entwicklung einer objektbezogenen geeigneten Betonzusammensetzung sind diese Parameter zu berücksichtigen. Auf das sich hieraus ergebende Verarbeitungsprofil der Frischbetoneigenschaften wird üblicherweise aus dem Begriff „Konsistenz“ geschlossen.

Unter dem Begriff Konsistenz werden mehrere physikalisch unterschiedliche Eigenschaften des frischen Betons zusammengefasst, die die Steife des Frischbetons beschreiben. Diese Eigenschaften reichen von der Fließfähigkeit über die Mischbarkeit, die Förderbarkeit, die Pumpbarkeit bis hin zur Verdichtbarkeit des Frischbetons. Bei all diesen mit baupraktischen Vorgängen verbundenen Prozessen spielen die rheologischen Eigenschaften von Frischbeton eine zentrale Rolle. „Danach kann der Frischbeton mit guter Näherung als Bingham-Fluid beschrieben werden, für welches folgende Beziehung gilt:

$$\tau(\dot{\gamma}) = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{Gleichung 2.1})$$

Darin ist τ die Scherspannung, die linear mit der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ ansteigt, nachdem die Fließgrenze (Schergrenze) τ_0 überwunden ist. Der Zuwachs der Scherspannung wird durch die plastische Viskosität μ bestimmt. Für Scherspannungen unterhalb der Fließgrenze verhält sich das Bingham-Fluid wie ein elastischer Festkörper, oberhalb der Fließgrenze wie ein Newton-Fluid (z.B. Wasser), siehe Bild 2.1.

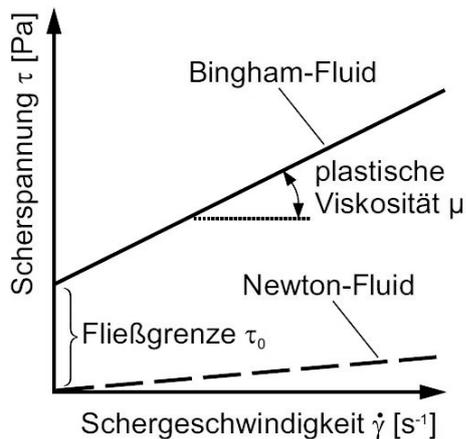


Bild 2.1: Einfluss der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma} = dy/dt$ auf die Scherspannung bei einem Newton-Fluid und einem Bingham-Fluid [173].

Fig. 2.1: Influence of the shear rate $\dot{\gamma} = dy/dt$ on the shear stress of a Newton fluid and a Bingham fluid [173].

Zur Beurteilung des Fließverhaltens des Frischbetons – auch im Hinblick auf die Stabilität einer Mischung – ist es günstiger, die dynamische Viskosität η zu betrachten. Sie errechnet sich aus der vorangehenden Gleichung wie folgt:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau(\dot{\gamma})}{(\dot{\gamma})_0} = \frac{\tau_0}{(\dot{\gamma})} + \mu \quad (\text{Gleichung 2.2})$$

Bild 2.2 veranschaulicht diese Gleichung. Skizziert sind die Kurvenverläufe für einen steifen Normalbeton, einen weichen Normalbeton und einen selbstverdichtenden Beton. Beim Normalbeton führt das Rütteln und die damit eingetragene Energie zu einem starken Abfall der dynamischen Viskosität, wodurch der Beton fließfähig wird, aber sich auch entmischen kann (s. Abschnitt 2.2). Ihr unterer Grenzwert ist die plastische Viskosität, die nur bei hoher Schergeschwindigkeit erreicht wird. Der selbstverdichtende Beton besitzt ohne Zufuhr von Rüttelenergie eine dem Normalbeton unter Rüttel einfluss vergleichbare dynamische Viskosität. Er ist also fließfähig und bei richtiger Zusammensetzung auch mischungsstabil (s. Abschnitt 2.2)“ [173].

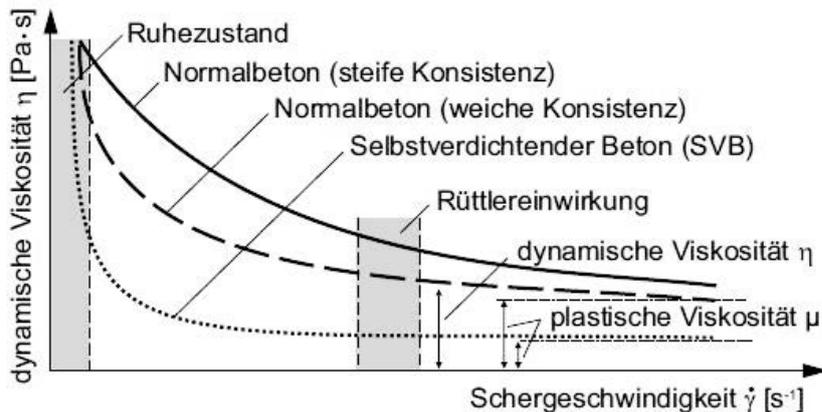


Bild 2.2: Dynamische Viskosität η in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ für Betone unterschiedlicher Konsistenz [173].

Fig. 2.2: Dynamic viscosity η in dependence of the shear rate $\dot{\gamma}$ for concretes with different consistency [173].

Stofflich betrachtet, wird das Fließverhalten beziehungsweise die Verschiebbarkeit des Gefüges wesentlich einerseits durch die (gröberen) Feststoffpartikel, deren Größe, Form und Oberflächenstruktur sowie andererseits durch den Zementleim, dessen stoffliche und volumetrische Zusammensetzung, der Bindungskräfte untereinander und letztendlich durch das Volumenverhältnis von Feststoffpartikeln und Zementleim bestimmt. Hinzu kommen auch Effekte, die sich aus der Zugabe von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen ergeben.

Infolge der bereits nach wenigen Minuten nach Zugabe des Wassers zum Zement einsetzenden Bildung erster Hydratationsprodukte, verändert sich die Betonkonsistenz mit fortschreitender Zeit und zunehmender Hydratation, wobei folgende Randbedingungen die Ausgangskonsistenz des Frischbetons und die zeitliche Veränderung der Konsistenz beeinflussen:

- Frischbetontemperatur und Lufttemperatur,
- Betonzusammensetzung,
- Eigenschaften der Betonausgangsstoffe,
- Dosierreihenfolge,
- Mischintensität.

Für die Baupraxis sind die zeitliche Entwicklung der Konsistenz und damit das Ansteifen des Betons von zentraler Bedeutung. Aus ihnen ergeben sich maximal zulässige Transportzeiten, Betoniergeschwindigkeiten und auch die Zeitpunkte und Zeitfenster eventueller weiterer Oberflächenbearbeitungen der betonierten Bauteile.

Grundsätzlich nimmt die Konsistenz mit der Zeit ab, das heißt der Beton steift an. Dieser Vorgang verläuft nicht zeitlinear, sondern mit zunehmender Zeit asymptotisch abfallend.

Die oben genannten weiteren Einflussgrößen auf die Konsistenz überlagern sich mit zeitabhängigen Effekten und können auf den Konsistenzrückgang sowohl intensivierend als auch verzögernd wirken. Diese Effekte werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

Die Konsistenz des Frischbetons wird durch eine Vielzahl von Einflussgrößen der Ausgangsstoffe beziehungsweise deren Schwankungen, zum Beispiel der Volumenanteil des Leims, die rheologischen Eigenschaften des Leims, sowie durch Kornaufbau (Sieblinie) und Kornform der Gesteinskörnung bestimmt (s. Tabelle 2.1) und kann sowohl durch Erhöhung des Leimgehalts als auch durch eine Verringerung des Scherwiderstands des Leims durch Zugabe von Fließmittel oder Verflüssiger erhöht werden.

Die Fließmittelzugabe bewirkt eine Dispergierung der Feinstoffe im Leim, verbunden mit einer Abnahme des Scherwiderstands [225].

Tabelle 2.1: Einflussgrößen zur Steuerung der Frischbetonkonsistenz [231].

Table 2.1: Influencing factors for the controlling of fresh concrete consistency [231].

Bestandteil	Einflussgröße
Leim (Mehlkornsuspension)	Rheologische Eigenschaften in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung
	Volumenanteil
Gesteinskörnung	Art (rund, gebrochen, Rohdichte)
	Kornaufbau (Sieblinie)

2.1.2 Einfluss der Temperatur

Die Frischbetontemperatur beeinflusst das Ansteifen und Erstarren und damit die Verarbeitbarkeit des Frischbetons.

Erhöhte Frischbetontemperaturen führen im Allgemeinen zu schnellerem Ansteifen und Erstarren und damit einhergehend zu einer schlechteren Verarbeitbarkeit und höheren Frühfestigkeiten [231]. Die Frischbetontemperatur darf dabei im Allgemeinen 30 °C nicht überschreiten, bei massigen Bauteilen darf diese 25 °C nicht übersteigen [55][60][76].

Durch eine niedrige Frischbetontemperatur wird das Ansteifen sowie das Erstarren und Erhärten verzögert. Um planmäßig zu erstarren und zu erhärten, muss der Frischbeton bei niedrigen Außentemperaturen, zum Beispiel bei Frost, eine so hohe Ausgangstemperatur aufweisen, dass durch die eigene Wärmeentwicklung ein zu frühes Durchfrieren vermieden wird (s. Tabelle 2.2) [231].

Tabelle 2.2: Anforderungen an die Betontemperatur für das Betonieren bei niedrigen Temperaturen nach [61].

Table 2.2: Requirements of the concrete temperature for concreting at low temperatures according to [61].

Lufttemperatur	Mindesttemperatur des Frischbetons
+5 °C bis -3 °C	+5 °C allgemein
	+10 °C bei Zementgehalten < 240 kg/m ³
unter -3 °C	+10 °C über mindestens 3 Tage

In [145] wurde der Einfluss der Fließmittelauswahl auf die Frischbetoneigenschaften untersucht. Bild 2.3 zeigt die Ergebnisse aus den Untersuchungen bezüglich des Konsistenzverlaufs bei einer Frischbetontemperatur von 10, 20 und 30 °C unter Verwendung von Fließmitteln FM 2 und FM 5 auf Polycarboxylatether-Basis (PCE).

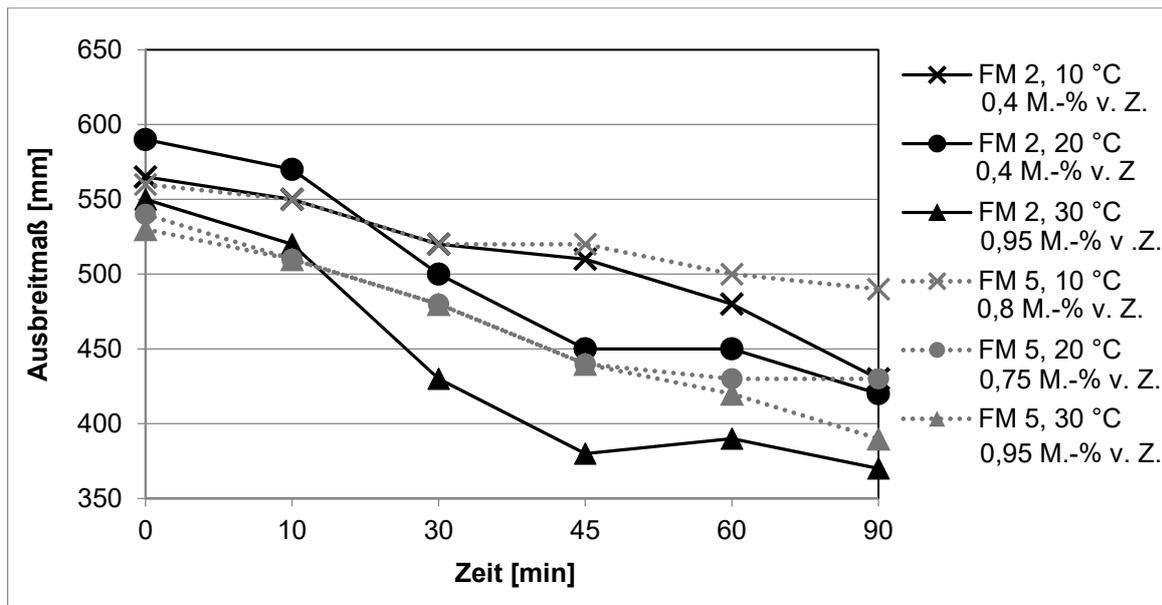
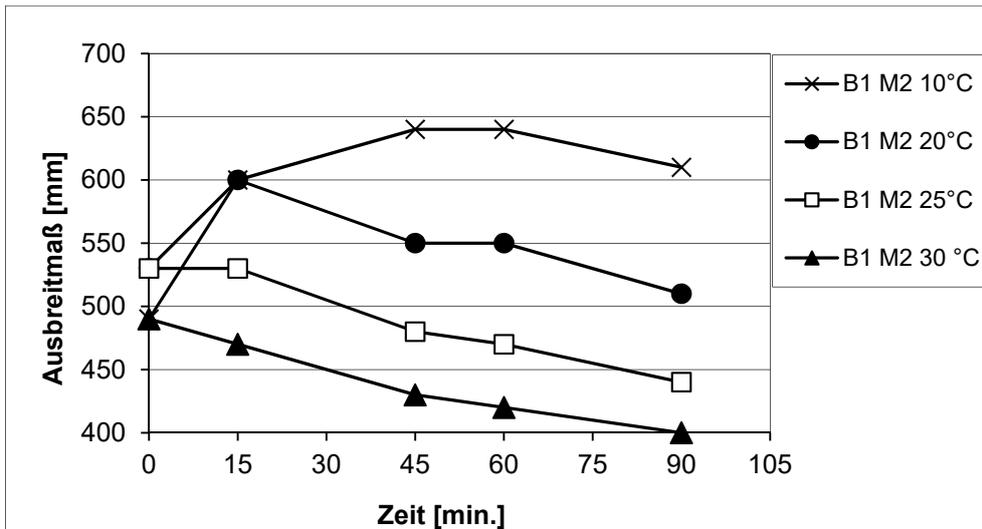


Bild 2.3: Konsistenzverlauf mit FM 2 (Universal-PCE, neues Produkt für bessere Konsistenzhaltung) und FM 5 (Transportbeton-PCE, mit Stabilisierer und LP-Bildner) bei Frischbetontemperaturen von 10, 20 und 30 °C [145].

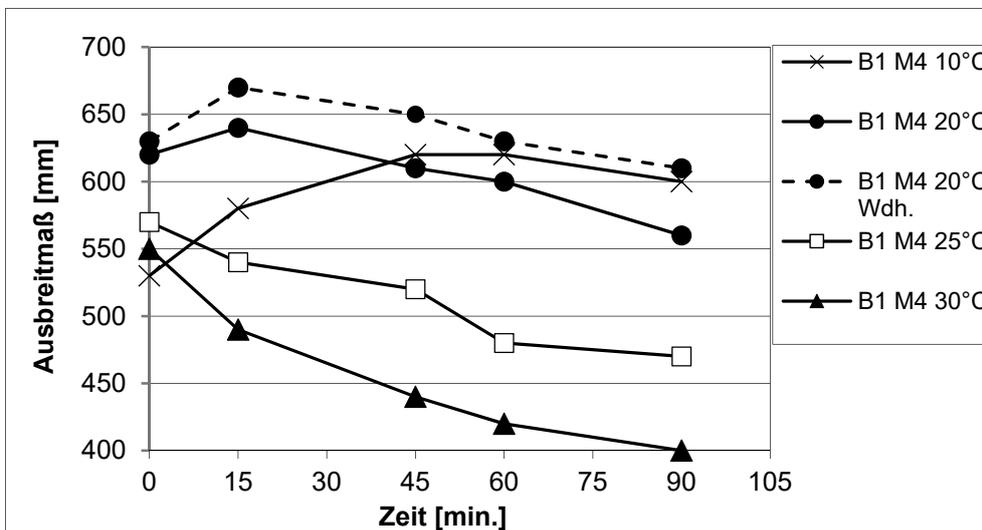
Fig. 2.3: Consistency of fresh concrete using FM 2 (universal-superplasticizer) and FM 5 (superplasticizer for ready mixed concrete, containing air-entraining agent and stabilizer) at a fresh concrete temperature of 10, 20 and 30 °C [145].

Zur Einhaltung der Zielkonsistenz (F5) musste für das Fließmittel FM 2 bei 30 °C die bei 20 °C verwendete Dosierung verdoppelt werden, während bei 10 °C keine Anpassung erforderlich war. Darüber hinaus wurde keine Nachverflüssigung festgestellt und das Ansteifen fiel bei 10 °C etwas niedriger als bei 20 und 30 °C aus. Die Wirkung des Fließmittels FM 5 zeigte sich wenig temperaturabhängig, es konnte keine Nachverflüssigung festgestellt werden. Das Ansteifen war bei 10 °C etwas niedriger als bei 20 und 30 °C.

Bild 2.4 a) zeigt die Ergebnisse an einem Referenzbeton (B1) für verschiedene Frischbetontemperaturen unter Berücksichtigung der verwendeten Mischregime, mit Mischregime M2 (Gesteinskörnungen 20 s, Wasser inkl. FM 10 s, Zement 30 s, Nassmischzeit 120 s) und Mischregime M4 (Zement + Gesteinskörnungen 20 s, Wasser 10 s, Nassmischzeit 50 s, FM 10 s, Nassmischzeit 120 s (Bild 2.4 b)).



a)



b)

Bild 2.4: Ausbreitmaße mit Betonrezeptur B1 (Referenz, Leimgehalt 300 l/m³) in Abhängigkeit der Frischbetontemperatur für a) Mischregime 2 und b) Mischregime 4 [146].

Fig. 2.4: Flow values of concrete composition B1 (reference, paste content 300 l/m³) depending on the fresh concrete temperature for a) mixing procedure 2 and b) mixing procedure 4 [146].

Anhand der Ergebnisse wird deutlich, dass bei einer Frischbetontemperatur von 10 °C eine deutliche Nachverflüssigung der Betone bis 45 bis 60 Minuten nach Herstellung auftrat. Bei einer Frischbetontemperatur von 20 °C verflüssigten die Betone ebenfalls nach, wobei hier die maximalen Ausbreitmaße nach rund 15 Minuten nach Herstellung gemessen wurden.

Bei Frischbetontemperaturen von 25 und 30 °C war mit beiden Mischregimen der Nachverflüssigungseffekt nicht mehr vorhanden. Mit M4 (Gesamtmişhdauer 210 s) lagen die Ausbreitmaße unmittelbar nach Herstellung der Betone tendenziell etwas höher als mit M2 (Gesamtmişhdauer 180 s). Das Ansteifverhalten mit beiden Mischregime war bei 30 °C etwas höher als bei einer Frischbetontemperatur von 25 °C. Die Veränderung der Frischbetontemperatur von 10 bis 30 °C zeigte nach 90 Minuten Unterschiede im Ausbreitmaß von bis zu 210 mm auf.

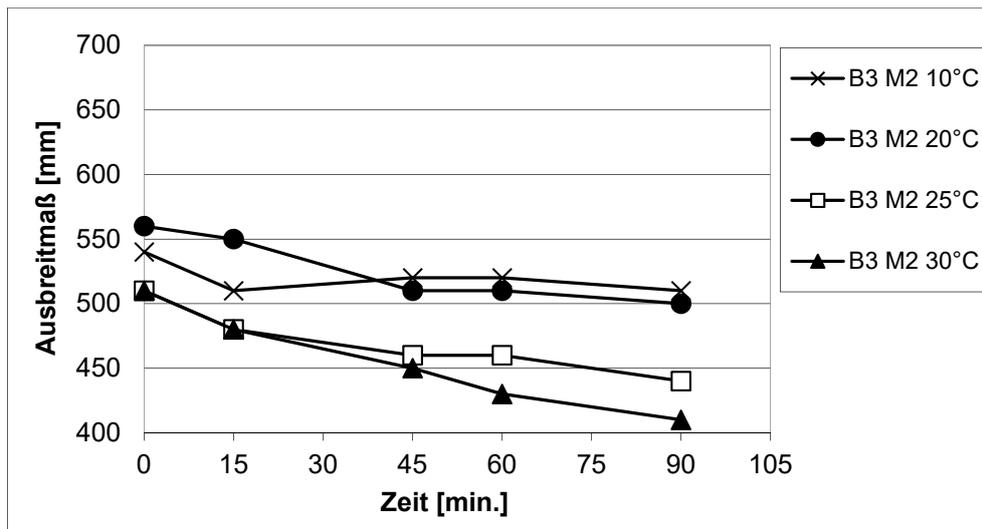


Bild 2.5: Ausbreitmaße von Betonmischung B3 (Leimgehalt 331 l/m^3) in Abhängigkeit der Frischbetontemperatur – Mischregime M2: Gesteinskörnungen 20 s, Wasser inkl. FM 10 s, Zement 30 s, Nassmischzeit 120 s [146].

Fig. 2.5: Flow values of concrete composition B3 (paste content 331 l/m^3) depending on the fresh concrete temperature – mixing procedure M2: aggregates 20 sec. water incl. plasticizer 10 sec, cement 30 sec. [146].

Bild 2.5 zeigt das temperaturabhängige Verhalten der Betonkonsistenz bei Erhöhung des Leimgehaltes um circa 30 l/m^3 mit Verringerung des FM-Gehaltes von 0,7 auf 0,2 M.-% v.Z. [146].

Anhand der Konsistenzverläufe von Beton B3 mit einem Leimgehalt von 331 l/m^3 (s. Bild 2.5) wird deutlich, dass keine Nachverflüssigung im untersuchten Temperaturbereich festgestellt werden konnte. Die Betone zeigten über 90 min eine praxisübliche gute Konsistenzhaltung mit geringen Schwankungen innerhalb der Streubreite der Ausbreitmaßprüfung.

2.1.3 Einflüsse aus Dosierreihenfolge, Mischintensität und Mischdauer

Beim Mischen werden die Ausgangsstoffe miteinander vermengt. Die Ausgangsstoffe sollen nach Abschluss des Mischvorgangs möglichst gleichmäßig im Frischbeton verteilt sein [113]. Die Reihenfolge der Zugabe der Ausgangsstoffe ist zusammen mit dem Mischertyp und der Mischzeit verantwortlich für die Homogenität des Gemisches und die Wirkung der Zusatzmittel. Beim Mischen werden die Ausgangsstoffe üblicherweise in der folgenden Reihenfolge dosiert:

- Gesteinskörnungen,
- Zement,
- Zusatzstoffe,
- Zugabewasser und Zusatzmittel.

Die Steuerung der Anlage muss so ausgelegt sein, dass bei Änderung der Eigenschaften der Ausgangsstoffe, wie zum Beispiel der Oberflächenfeuchte der Gesteinskörnungen, eine Anpassung der zugegebenen Menge erfolgt und damit die Konsistenz nicht beeinflusst wird. Je nach Anlagentechnik erfolgt die Zugabe von Zusätzen entweder gemeinsam mit dem Anmachwasser oder direkt danach. Zusatzmittel müssen während des Hauptmischgangs zugegeben werden. Eine Ausnahme bilden Fließmittel (FM) und Verzögerer (VZ), die auch zu einem späteren Zeitpunkt zugegeben werden dürfen. Die Wirkung der Zusatzmittel hängt vom Zeitpunkt der Zugabe ab. Deshalb sollte bei der Betonherstellung entweder der Dosierzeitpunkt aus der Erstprüfung übernommen werden oder wenn dies anlagentechnisch nicht umsetzbar ist, der mögliche Dosierzeitpunkt bei der vorhandenen Mischanlage schon in der