

Einfluß chemisch-mineralogischer Reaktionen des Zements auf das Ansteifen von Zementleim und Beton

Von Jürgen Krell, Düsseldorf

Übersicht

Ein sachgerechter Einbau von Beton erfordert eine den örtlichen Gegebenheiten angepaßte Verarbeitbarkeit. Als Maß der Verarbeitbarkeit dient die Frischbetonkonsistenz. Beton für Baustellen wird meist nicht unmittelbar nach seiner Herstellung eingebaut, sondern erfährt zwischen Mischen und Einbau Transport- und Förderzeiten von mindestens 10 Minuten. Da die Konsistenz mit der Zeit steifer wird, muß bei der Betonherstellung die im Einzelfall zu erwartende Konsistenzänderung abgeschätzt und durch ein entsprechendes Konsistenzvorhaltemaß berücksichtigt werden.

Ursache der Konsistenzveränderung sind chemisch-mineralogische Reaktionen des Zements mit dem Anmachwasser, die unmittelbar nach Wasserzugabe beginnen. Dabei kommt der Optimierung des Zements durch das als Erstarrungsregler zugesetzte Calciumsulfat eine besondere Bedeutung zu, jedoch wirken sich darauf auch in starkem Maße die Temperatur und in geringerem Maße die Mischintensität aus. Mit der Zeit auftretende Veränderungen des rheologischen Verhaltens von Zementleim gestatten keine zuverlässigen Aussagen über die zu erwartenden Konsistenzänderungen von Beton, was vermutlich durch die physikalisch unterschiedlich wirkenden Prüfverfahren bedingt ist.

1. Einleitung

Beton erfährt nach seiner Herstellung, d. h. dem Mischen von Zement, Zuschlag und Wasser sowie ggf. Betonzusätzen, eine Veränderung seiner Konsistenz vom „weichen“, verarbeitbaren Gemisch in Richtung steiferer Konsistenz. Diesem völlig normalen und für die Erhärtung des Betons unerläßlichen Vorgang des Ansteifens wurde seit Ende der 60er Jahre durch das verstärkte Aufkommen von Transportbeton und damit längeren Zeiträumen zwischen Herstellung und Verarbeitung des Betons zunehmend Beachtung geschenkt.

Das Ansteifen des Betons ist maßgeblich auf die chemischen Reaktionen im Zementleim, die wiederum durch Temperatur und Zusätze beeinflusst werden, zurückzuführen. Zur Abklärung der zugehörigen Zusammenhänge wurden im Forschungsinstitut der Zementindu-

strie ab 1972 umfangreiche Untersuchungen an Zementleimen durchgeführt, deren Ergebnisse in [1 bis 12] veröffentlicht worden sind. Ab 1980 wurden die Untersuchungen auch auf das Betonverhalten erweitert, um den Zusammenhang zwischen Zementleim- und Betonverhalten erfassen zu können [13 bis 15]. Die hieraus abzuleitenden betontechnologischen Empfehlungen und Maßnahmen sind in den Bericht des VDZ-Arbeitskreises Frischbeton „Ansteifen von Beton“ [16] eingeflossen.

Über die Betonversuche im Forschungsinstitut wurde in [17] ausführlich berichtet. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Betonversuche sollen zudem in mehreren Einzelberichten in einer für die Praxis aufbereiteten Form innerhalb der Betontechnischen Berichte veröffentlicht werden. Der nachfolgende Bericht faßt die bisherigen Erkenntnisse über die chemisch-mineralogischen Vorgänge bei den Anfangsreaktionen des Zements mit dem Anmachwasser zusammen und geht anhand gezielter Untersuchungen auf deren Auswirkungen auf das rheologische Verhalten des Zementleims sowie auf die Frischbetonkonsistenz und deren Veränderung mit der Zeit näher ein.

2. Literaturlauswertung

2.1 Reaktionen im Zementleim

Das Erstarren und Erhärten von Zement beruht auf der Bildung von wasserhaltigen Verbindungen (Hydratphasen), die bei der Reaktion zwischen Zement und Wasser entstehen [18]. Unmittelbar nach dem Wasserkontakt kommt es zu einer heftigen Anfangsreaktion, bei der im wesentlichen Tricalciumaluminat (C_3A) und Sulfat (SO_3) zu Trisulfat (Ettringit) reagieren. Diese erste Reaktion kommt nach wenigen Minuten zum Stillstand und setzt erst nach einer „Ruheperiode“ von rd. 6 Stunden, in der keine weitere chemische Umsetzung erfolgt, wieder ein [3 bis 7 sowie 18 und 19]. Das normgemäße Erstarren des Zementleims findet in dieser Ruheperiode statt und wird üblicherweise durch Sammel- oder Umkristallisation von kleineren Reaktionsprodukten zu gefügebildenden Kristallen erklärt.

Die Art der bei der anfänglichen Hydratation gebildeten Reaktionsprodukte wird maßgeblich durch das Verhältnis des C_3A -Umsatzes und des zugegebenen Sulfates (SO_3) bestimmt. Nach [5] ergeben sich dabei drei Grundfälle der Reaktion (Bild 1):

1. Abstimmung von C_3A und SO_3

Hierbei wird überwiegend feinkörniger Ettringit gebildet, der sich auf den Zementpartikeln als dünner „Pelz“ niederschlägt. Aufgrund dieser kleinen Einzelkristalle ergibt sich ein günstiges Ansteifverhalten und die relativ längste Zeit bis zum Erstarrungsbeginn.

2. Hoher Sulfatüberschuß

Hierbei fallen neben Ettringit zusätzlich größere Mengen von sekundärem Gips in relativ langen dünnen Leisten aus, die stark gefügebildend wirken.

3. Großer Sulfatmangel

Hierbei wird wenig Ettringit, dafür aber eine größere Menge von Monosulfat gebildet, das aufgrund seiner sandrosenartigen Blättchenstruktur stark gefügebildend wirkt.

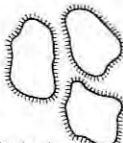
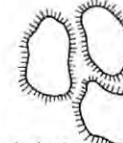
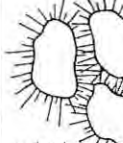

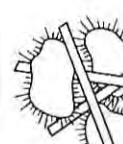
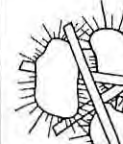



Sulfatangebot in der Lösung bezogen auf C_3A -Umsatz	Hydrationszeit		
	10 Minuten	1 Stunde	3 Stunden
	Rekristallisation des Ettringits →		
abgestimmt	Ettringithülle  plastisch	 plastisch	 erstarrt
zu hoch	Ettringithülle sek Gips im Porenraum  erstarrt	 erstarrt	 erstarrt
zu gering	Ettringithülle C_4AH_{13} -Monosulfat im Porenraum  erstarrt	 erstarrt	 erstarrt

Bild 1 Gefügebildung im Zementleim in den ersten drei Stunden nach dem Anmachen in Abhängigkeit von der Abstimmung des Sulfatangebots in der Lösung auf den C_3A -Umsatz nach [5]

Die Konsistenzänderung des Zementleims wird neben der Art der Reaktionsprodukte auch maßgeblich durch deren Menge bestimmt. Prinzipiell wird das Ansteifen mit zunehmender Menge an Reaktionsprodukten beschleunigt.

Bei der Zementherstellung wird die Abstimmung der Sulfatkomponente üblicherweise über die zugegebene Menge und deren Reaktivität durch Verwendung von Gemischen aus reaktionsträgem Anhydrit und reaktionsschnellem Halbhydrat erreicht. Die maßgebenden großtechnischen Steuerungsparameter werden in [8 bis 12] erörtert.

2.2 Konsistenzänderungen am Beton

Für Beton wurden in der Literatur bislang die gemessenen Konsistenzänderungen überwiegend phänomenologisch beschrieben. Nach der Literaturlauswertung in [16] ergaben sich für Betone mit Zementgehalten zwischen 230 und 400 kg/m³, Wasserzementwer-

ten zwischen 0,40 und 0,72 bei Frischbetontemperaturen von rd. 20 °C Konsistenzänderungen von 3 bis 10 cm Verminderung im Ausbreitmaß im Zeitintervall 10 bis 60 min nach der Herstellung. Dabei wurden die zum Teil als Slump-Werte angegebenen Konsistenzen gemäß [20] in entsprechende Ausbreitmaße übertragen.

Eine systematische Zuordnung von Kenngrößen der Betonzusammensetzung zum Ansteifverhalten des Betons liegt in der Literatur nicht vor. Aus den Literaturergebnissen ist tendenziell abzuleiten, daß die größten beobachteten Konsistenzänderungen bei erhöhter Frischbetontemperatur und/oder Verwendung von Verzögerern bzw. Verflüssigern aufgetreten sind.

3. Ziel und Umfang der Versuche

Der Zusammenhang zwischen der nach dem Anmachen entstehenden Gefügestruktur im Zementleim und deren Auswirkung auf das rheologische Verhalten des Zementleims sowie auf die Frischbetonkonsistenz und deren zeitliche Änderung sind bislang noch nicht systematisch untersucht worden. Hierzu sollen die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen einen Beitrag liefern und zumindest qualitativ klären, ob und welche Korrelationen bestehen. Dazu dienten Parallelversuche an Zementleim und Beton mit 8 Zementen der Festigkeitsklasse Z 35 unterschiedlicher anfänglicher Gefügebildung, deren Konsistenzverlauf sowohl am Zementleim als auch am Beton über den Zeitraum von einer Stunde gemessen wurde. Zusätzlich wurde orientierend dem Einfluß der Mischdauer des Betons auf die Konsistenz nachgegangen.

4. Durchführung und Ergebnisse der Versuche

4.1 Ausgangsstoffe

Zur Erfassung des Gefügeeinflusses wurden 7 Laborzemente gleicher Kornverteilung durch labormäßiges Homogenisieren eines Betriebsklinkermehles mit verschiedenen Anhydrit/Halbhydrat-Gemischen hergestellt. Das Anhydrit/Halbhydrat-Verhältnis (gerechnet als SO_3) wurde dabei in Stufen von 10 Gew.-% von 20/80 auf 80/20 Gew.-% so verändert, daß der Gesamtsulfatgehalt konstant 3,5 Gew.-% SO_3 betrug.

Für diese Zemente wurden am Zementleim die Erstarrungszeiten bei 20 und 30 °C Leimtemperatur für die w/z-Werte 0,28 und 0,30 ermittelt. Die Erstarrungszeit wurde in Anlehnung an DIN 1164 Teil 5 geprüft; sie ist die Zeit, die bei vorgegebenem konstanten w/z-Wert von der Herstellung des Leims bis zum Erreichen einer Vicat-Eindringtiefe gemäß DIN 1164 von 36 ± 1 mm verstreicht. Die zugehörigen Ergebnisse sind in Bild 2 aufgetragen.

Für die weiteren Untersuchungen wurden aus den oben beschriebenen 7 Laborzementen die 3 Zemente L 1, L 2 und L 3 ausgewählt (Bild 2), die jeweils unterschiedliche Anfangs-Reaktionsprodukte liefern (Abschn. 5.1). Darüber hinaus wurden 5 Handelszemente der Festigkeitsklasse Z 35 (2 Portland-, 1 Eisenportland- und 2 Hochofenzemente) in die Untersuchungen einbezogen. Die Kenndaten

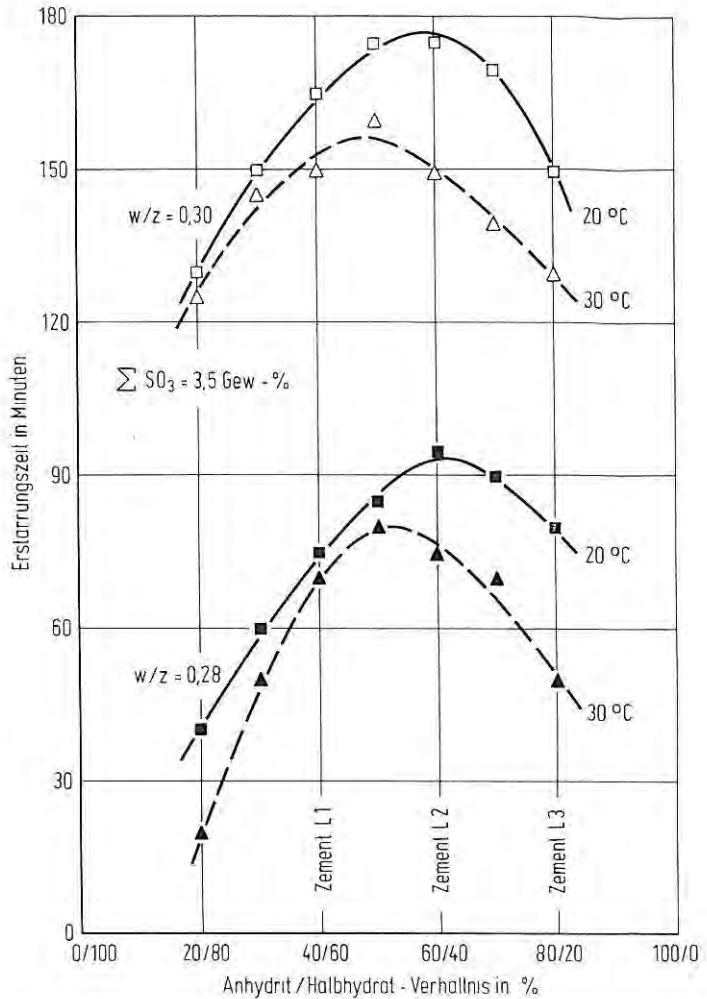


Bild 2 Erstarrungszeit von Laborzementen aus einem Betriebsklinker für die w/z-Werte 0,28 und 0,30 in Abhängigkeit von dem Sulfatträgerverhältnis und der Temperatur des Zementleims

der Zemente sowie die vorwiegende Art der Gefügebildung, beurteilt anhand rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen von Zementleim mit einem w/z-Wert von $\cong 0,40$ nach 45minütiger Hydrationsdauer bei 20 °C, sind in Tafel 1 angeben.

Für die Betonversuche wurde Rheinkiessandzuschlag der Korngruppen 0/2, 1/2, 2/4, 4/8, 8/16 und 16/32 mm aus dem Bereich Düsseldorf verwendet. Die Sieblinie wurde auf etwa B 32 nach DIN 1045 eingestellt, der erforderliche Mehlkornanteil wurde durch Zugabe von Quarzmehl 0/0,2 mm erhalten.

Tafel 1 Kenndaten der verwendeten Zemente (3 Labor- und 5 Handelszemente)

Zement	Kurzbez. nach DIN 1164	Wasser- anspruch nach DIN 1164 Gew.-%	spez. Oberfl. nach Blaine cm ² /g	Erstarrungs		28-Tage- Druck- festigkeit N/mm ²	Hütten- sand- gehalt Gew.-%	SO ₃ Gew.-%	Klinkerphasen nach Bogue				Art der in den ersten 45 min ent- standenen Reaktions- produkte*)
				-beginn h:min	-ende h:min				C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
L 1	} Labor- zemente PZ 35 F	26,0	3700	1:30	2:40	54	—	} 3,5	} 62,3	15,5	8,3	7,6	Ettringit und viel sek. Gips Ettringit
L 2		24,5	3700	1:20	2:30	55	—						
L 3		24,5	3700	1:00	2:00	54	—						
													wenig Ettringit und Monosulfat
1	PZ 35 F	27,0	3180	2:00	3:20	52	—	3,1	56,0	17,9	8,5	9,5	Ettringit
2	PZ 35 F	25,5	2940	2:10	3:40	53	—	2,8	44,7	27,9	12,2	8,3	Ettringit und viel sek. Gips
3	EPZ 35 F	30,5	3080	3:20	4:20	45	14	2,8	—	—	—	—	Ettringit
4	HOZ 35 L	29,0	3650	3:00	4:20	50	59	2,7	—	—	—	—	Ettringit und geringfügig Gips
5	HOZ 35 L	30,5	3150	4:30	6:20	45	75	2,7	—	—	—	—	Ettringit und geringfügig Gips

*) Qualitative Beurteilung mittels Rasterelektronenmikroskop an Zementleim mit w/z \cong 0,40 nach 45 min Hydratation bei 20°C

Als Zugabewasser kam Leitungswasser aus dem Trinkwassernetz der Stadt Düsseldorf zur Anwendung.

4.2 Versuchsanordnung und Ergebnisse

Das Ansteifverhalten von Zementleim mit einem w/z-Wert von 0,28 wurde für die 8 Zemente nach Tafel 1 anhand von Penetrometereindringtiefen-Messungen über den Zeitraum von 2 Stunden erfaßt. Hierzu wurde der Leim in einem Laborkleinmischer mit einer Mischdauer von 60 Sekunden hergestellt, in einen 25 mm hohen Gumming eingefüllt und durch Klopfen – analog zur Vorbereitung einer Erstarrungsprobe nach DIN 1164 – verdichtet.

Der Überstand wurde glatt abgestrichen und die Eindringtiefe der Prüfnadel (Durchmesser 3 mm, Auflagegewicht 102 g) in 10-Minuten-Intervallen bestimmt. Die Versuche wurden bei einer Leimtemperatur von rd. 20 °C in einem Feuchtkasten mit rd. 100 % relativer Feuchte durchgeführt. Die Eindringtiefen sind für die Prüfzeitpunkte 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 und 120 min nach der Herstellung in Tafel 2 zusammengestellt.

Tafel 2 Änderung der rheologischen Eigenschaften (Penetrometereindringtiefe) von Zementleimen mit der Zeit (w/z = 0,28; t \approx 20 °C)

Zement nach Tafel 1	Penetrometereindringtiefe in mm Zeit nach Herstellung								
	sofort	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	90 min	120 min
L 1	25,0	24,5	23,5	23,0	22,0	20,5	16,5	6,0	1,0
L 2	25,0	25,0	24,5	23,5	23,0	22,0	19,0	7,0	2,5
L 3	25,0	25,0	23,5	23,0	21,5	18,0	10,5	4,0	0
1	25,0	24,0	23,0	22,0	21,0	20,0	19,0	8,5	3,5
2	25,0	24,5	24,5	24,0	23,5	22,5	21,5	13,0	4,0
3	25,0	19,0	15,0	13,5	12,0	8,0	6,0	3,5	2,0
4	25,0	22,5	19,5	18,0	18,0	18,0	17,5	15,5	10,5
5	25,0	22,0	18,0	13,0	12,0	10,0	9,5	7,0	4,5

Für die Betonversuche wurde stets Beton gleicher Zusammensetzung mit einem Zementgehalt von 300 kg/m³ und einem Wasserzementwert von 0,60 gewählt. In der Mehrzahl der Fälle wiesen die Betone rd. 10 min nach der Herstellung Regelkonsistenz auf, d. h. ein Ausbreitmaß von 45 \pm 3 cm. In Anlehnung an die Praxis wurde der Beton in Chargen von 60 l in einem 100-l-Trommelmischer (Freifallmischer) hergestellt. Zuschlag und Zement wurden 10 s trocken vorgemischt, das Wasser innerhalb von 10 s in den laufenden Mischer zugegeben und anschließend 1 min gemischt. Die Frischbetonkonsistenz wurde mit Hilfe des Ausbreitmaßes nach DIN 1048 unmittelbar nach Mischende sowie 5, 10, 20, 30, 40, 50 und 60 min nach der Betonherstellung bestimmt. Nach jeder Konsistenzbestimmung wurde der Beton vollständig in den Mischer zurückgegeben und die Mischeröffnung mit feuchten Tüchern bedeckt, um ein Austrocknen zu verhindern. Unmittelbar vor jeder weiteren Aus-

Tafel 3 Änderung der Konsistenz (Ausbreitmaß) von Beton bei rd. 20 °C Frischbetontemperatur mit der Zeit ($z = 300 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,60$)

Beton mit Zement nach Tafel 1	Ausbreitmaß nach DIN 1048 in cm Zeit nach der Betonherstellung							
	sofort	5 min	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
L 1	48	42	37	37	37	37	37	37
L 2	55	49	46	45	44	44	46	43
L 3	54	47	47	44	45	43	40	40
1	53	49	48	46	47	44	43	44
2	35	36	36	34	37	36	35	35
3	47	48	45	44	44	42	42	42
4	40	39	39	37	36	36	36	37
5	46	46	41	41	41	40	39	40

Tafel 4 Änderung der Konsistenz (Ausbreitmaß) von Beton bei etwa 34 °C Frischbetontemperatur mit der Zeit ($z = 300 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,60$)

Beton mit Zement nach Tafel 1	Ausbreitmaß nach DIN 1048 in cm Zeit nach der Betonherstellung							
	sofort	5 min	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
L 1	44	38	38	38	37	38	38	38
L 2	48	45	42	41	39	39	39	39
L 3	47	41	38	37	36	35	35	35

breitmaßbestimmung wurde der Beton zur Einmischung möglicher Wasserabsonderungen 10 s aufgemischt. Die Ergebnisse der Ausbreitmaßbestimmungen für eine Frischbetontemperatur von $20 \pm 1 \text{ °C}$ sind in Tafel 3 zusammengestellt.

Zur Erfassung des Temperatureinflusses wurden die Betone mit den Laborzementen L 1, L 2 und L 3 zusätzlich mit erhöhter Frischbetontemperatur hergestellt. Hierfür wurden die Versuche mit auf 30 °C vortemperierten Ausgangsstoffen in einem 30 °C-Raum durchgeführt. Dabei ergab sich eine Frischbetontemperatur von $34 \pm 2 \text{ °C}$ über den gesamten Versuchszeitraum. Die zugehörigen Konsistenzergebnisse zeigt Tafel 4.

Zur Erfassung eines möglichen Mischeinflusses wurde die Frischbetonkonsistenz für die Betone mit den Laborzementen L 1, L 2 und L 3 unmittelbar nach der Herstellung sowie 5 und 10 Minuten danach für die Mischzeiten 30, 60 und 120 s geprüft. Die Ergebnisse sind in Tafel 5 zusammengefaßt.

5. Erörterung der Ergebnisse

5.1 Auswahl der Laborzemente

Die in Bild 2 dargestellten Erstarrungszeiten für die 7 Laborzemente, die sich nur in der Sulfatträgerkombination unterschieden, zeigten je Versuchsserie ein deutliches Optimum. Unabhängig vom ge-

Tafel 5 Einfluß der Mischdauer auf die Anfangskonsistenz des Betons ($z = 300 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,60$)

Beton mit Zement nach Tafel 1	Mischdauer in Sekunden	Ausbreitmaß nach DIN 1048 in cm Zeit nach der Betonherstellung		
		sofort	5 min	10 min
L 1	30	55	36	37
	60	48	42	37
	120	45	43	39
L 2	30	57	50	48
	60	55	49	48
	120	53	49	47
L 3	30	57	50	46
	60	54	48	47
	90	52	47	47

wählten w/z -Wert (0,28 und 0,30) lag dieses Optimum für 20°C Leimtemperatur bei einem Anhydrit/Halbhydrat-Verhältnis von 60/40 und bei 30°C Leimtemperatur bei 50/50 %.

Dieses Verhalten ist auf die unterschiedliche Gefügebildung in Abhängigkeit von der Sulfatabstimmung (Bild 1) zurückzuführen. Die Zemente mit erhöhtem Halbhydratanteil (links vom Optimum) bildeten aufgrund des höheren Anteils an reaktivem Halbhydrat sekundären Gips. Je nach Menge des Gipses wurde dadurch die Erstarrungszeit mehr oder weniger deutlich reduziert. Die Zemente im Bereich des Optimums wiesen eine gute Abstimmung zwischen SO_3 und C_3A auf und bildeten überwiegend feinkörnigen Ettringit, wodurch das günstige Ansteifen und damit die längste Erstarrungszeit erklärt werden kann. Die Zemente mit erhöhtem Anhydritgehalt (rechts vom Optimum) bildeten aufgrund des hohen Anteils an reaktionsträgem Anhydrit deutliche Monosulfatstrukturen, die mit steigender Menge stark gefügebildend wirkten.

Die Lage des Optimums war dabei auch direkt temperaturabhängig (Abschn. 5.2.6); sie kann auch durch Betonzusätze, die in den Erstarrungsablauf eingreifen wie z. B. Verflüssiger, verschoben werden [21]. Dadurch kann die Art der Gefügebildung und damit das Ansteifverhalten zum Teil deutlich verändert werden.

Für die weiteren Untersuchungen wurde für jeden Gefügetyp nach Bild 1 ein Laborzement ausgewählt. Der Laborzement L 2 wurde als für 20°C optimierter Zement gewählt, während die Zemente L 1 und L 3 jeweils 20 Gew.-% mehr bzw. weniger Halbhydrat aufwiesen und damit den Gefügetypen „Sekundärgips“ bzw. „Monosulfat“ zuzuordnen sind. Alle drei Laborzemente entsprachen hinsichtlich ihrer Eigenschaften DIN 1164 (Tafel 1).

5.2 Ansteifen von Zementleim und Beton bei 20°C

5.2.1 Vergleich von Zementleim- und Betonverhalten

Der Ansteifverlauf für den Zementleim mit einem w/z -Wert von 0,28 ist für die 8 Zemente nach Tafel 1 in Bild 3 und für den zugehörigen Beton in Bild 4 aufgetragen. Für die Penetrometereindringtiefen

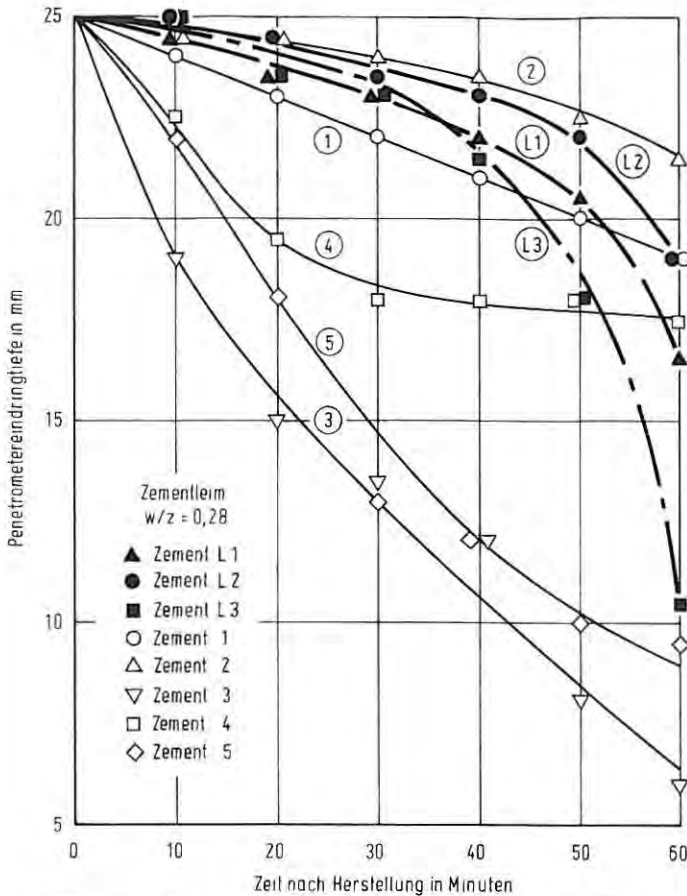


Bild 3 Änderung der rheologischen Eigenschaften (Penetrometer Eindringtiefe) von Zementleimen mit der Zeit ($w/z = 0,28$; $t \cong 20^\circ\text{C}$)

60 min nach der Herstellung des Leims (P_{60}) ergaben sich Meßwerte zwischen 6,0 und 21,5 mm. Die zugehörigen Betonausbreitmaße (a_{60}) lagen zwischen 35 und 44 cm. Dabei ergaben sich für die Zemente, die im Leim ein geringes Ansteifen zeigten (große Eindringtiefen P_{60}), nicht gleichzeitig auch günstige Ansteifwerte im Beton (großes Ausbreitmaß a_{60}). Dies wird beim Betrachten der Zemente 2 und 3 besonders deutlich. Während der Zement 2 im Leim das günstigste Verhalten aufwies, ergab sich im Beton die vergleichsweise steifste Konsistenz praktisch zu jedem Prüfzeitpunkt. Andererseits wurde der Zement 3, der im Beton eine relativ weiche Endkonsistenz (a_{60}) von 42 cm aufwies, beim Leimversuch mit w/z -Wert 0,28 sehr ungünstig beurteilt.

Die Ursache für die zum Teil völlig unterschiedliche Beurteilung des Zementverhaltens im Leim und Beton dürfte insbesondere auf die unterschiedliche Beanspruchung durch die Eindringnadel bzw. das

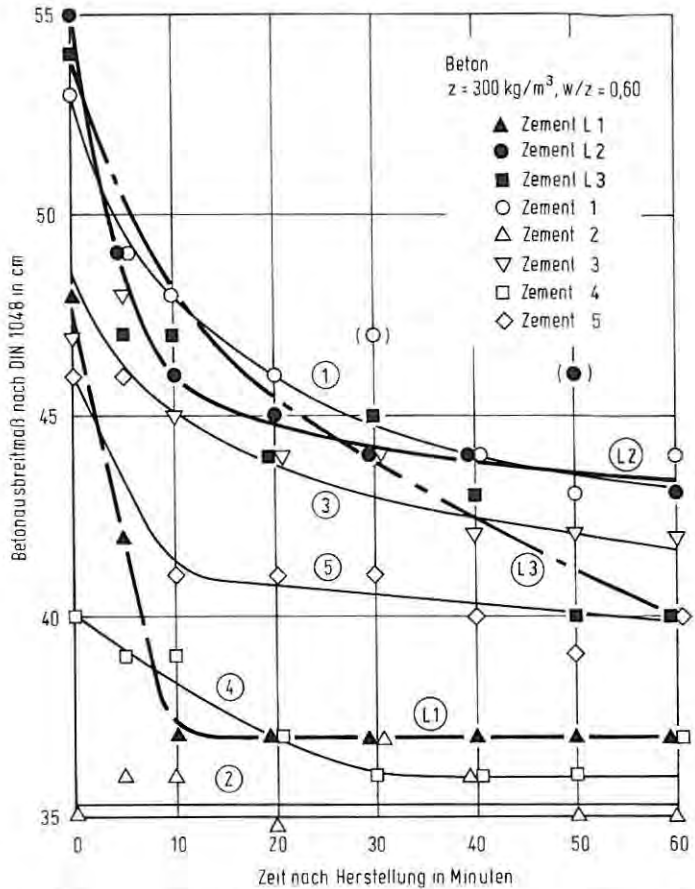


Bild 4 Änderung der Konsistenz (Ausbreitmaß) von Beton mit der Zeit (z = 300 kg/m³; w/z = 0,60; t ≈ 20 °C)

Ausbreiten unter Schlagbeanspruchung zurückzuführen sein. Zudem ergibt sich infolge unterschiedlichen Wasseranspruchs der Zemente im Leim mit einem konstanten w/z-Wert von 0,28 eine sehr unterschiedliche Ausgangskonsistenz, die maßgeblich das Ergebnis der Leimprüfung bestimmt.

Der Zement 2 zeigte im Leim aufgrund seines geringen Wasseranspruchs von 25,5 Gew.-% eine relativ weiche Ausgangskonsistenz, d. h. die Zementpartikel lagen relativ weit auseinander. Die Reaktionsprodukte – hier lange dünne sekundäre Gipskristalle (Tafel 1) – hatten offenbar genügend Raum, so daß sie bei der Penetrometerprüfung praktisch ohne Verminderung der Eindringtiefe in Freiräume verdrängt wurden. Im Beton reichten die langen Gipskristalle anscheinend in den Größenbereich der Zementleimschichtdicke um die Zuschläge; somit konnten diese Kristalle, trotz des insgesamt größeren w/z-Wertes im Beton, die Beweglichkeit der Zu-

schläge deutlich behindern, was zu geringeren Ausbreitmaßen führte.

Umgekehrt ergab der Zement 3 aufgrund seines hohen Wasseranspruchs von 30,5 Gew.-% im Leim mit einem w/z-Wert von 0,28 schon zu Versuchsbeginn eine Konsistenz, die deutlich steifer war als Normsteife. Dadurch wurden alle weiteren Gefügebildungen – auch die hier aufgetretene überwiegende Ettringitbildung (Tafel 1) – vom Penetrometerverfahren sehr deutlich erfaßt, während im Beton bei insgesamt größerem w/z-Wert das Fließverhalten durch den feinkörnigen Ettringitniederschlag deutlich weniger beeinflusst wurde.

Die beiden Beispiele zeigen, daß das Ansteifverhalten von Beton nicht am Leimversuch mit konstantem w/z-Wert für unterschiedliche Zemente abgeschätzt werden kann.

Die Laborzemente L 1 bis L 3 wiesen gleiche Feinheit und Kornverteilung auf, d. h. Unterschiede in ihrer Zementleimkonsistenz lassen sich nur durch unterschiedliche Gefügebildungen erklären. In solchen Fällen ist eine gewisse Übertragbarkeit der Leim- und Betonergebnisse möglich. Sowohl im Leim- als auch im Betonversuch zeigte der für 20 °C optimierte Laborzement L 2 das günstigste Ansteifverhalten im Vergleich zu den beiden nicht optimierten Zementen L 1 und L 3, deren Ansteifverhalten im Leim und Beton jedoch wiederum zu unterschiedlicher Beurteilung führte.

5.2.2 Ansteifverlauf der Betone

5.2.2.1 Einfluß des Gefüges

Aus Bild 4 ist zu erkennen, daß die Mehrzahl der Betone ein anfänglich ausgeprägtes Ansteifen bis rd. 10 cm Ausbreitmaßverringering in den ersten 10 min und danach ein relativ geringes weiteres Ansteifen im Bereich von rd. 4 cm Verringerung des Ausbreitmaßes aufwiesen.

Die erste rasche Konsistenzänderung kann durch die Bildung erster Hydratationsprodukte noch vor der Ruheperiode der Hydratation erklärt werden. Einerseits wird bei dieser Reaktion Wasser chemisch gebunden, das dann nicht mehr als „schmierende Wasserschicht“ zwischen den Partikeln zur Verfügung steht, andererseits behindern die gebildeten Reaktionsprodukte je nach Menge und Größe die Beweglichkeit deutlich.

Zur Veranschaulichung soll der „Wasserverlust“ durch Hydratation des Zements für den Beton mit dem für 20 °C optimierten Laborzement L 2 rechnerisch erfaßt werden. Dieser Zement bildet anfänglich rd. 5 Gew.-% Ettringit, der zu rd. 50 Gew.-% aus Wasser besteht. Hieraus ergab sich für den Beton eine Minderung des „freien Wassers“ um $(300 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,05 \cdot 0,50 =)$ rd. $7,5 \text{ l/m}^3$. Nach [22] entspricht eine derartige Reduzierung des Zubewassergehalts für den betrachteten Beton einer Ausbreitmaßverminderung um 4 bis 5 cm. Die beobachtete Konsistenzänderung von rd. 9 cm ging also zur Hälfte auf die chemische Wasserbindung und den dadurch verursachten Wasserverlust und zur Hälfte auf die Bildung des relativ feinkörnigen Ettringitniederschlags auf den Zementpartikeln zu-

rück. Nach [23] liegen die anfänglich gebildeten Ettringitkristalle im Größenbereich von 0,2 µm; diese Größe reicht offenbar aus, die Fließfähigkeit des Betons deutlich zu reduzieren. (Die physikalische Wirkung der Reaktionsprodukte auf die Fließfähigkeit wird in einer späteren Veröffentlichung ausführlich diskutiert.)

Die weitere relativ langsame Konsistenzänderung des Betons ist nach bisheriger Kenntnis auf Umkristallisation der Ettringitkristalle zu größeren Kristallen zurückzuführen, wodurch die Beweglichkeit des Zementleims weiter eingeschränkt wird. Einflußgrößen auf die Wachstumsgeschwindigkeit der Kristalle während der Ruheperiode sind derzeit Gegenstand weiterer Untersuchungen [7].

Werden neben Ettringit anfänglich auch größere Mengen an sekundärem Gips gebildet (z. B. Zement L 1, 2, 4 und 5), wird die Konsistenz maßgeblich durch die relativ langen dünnen Gipskristalle bestimmt, die die Abstände zwischen den Partikeln überbrücken. Je nach Menge und Bildungsgeschwindigkeit des Gipses wird die relativ steife Konsistenz unmittelbar nach Mischende (z. B. Beton mit Zement 2) oder erst rd. 10 min danach (z. B. Beton mit Zement L 1) erreicht. Die aufgrund von Gipsbildung sich ergebende relativ steife Konsistenz rd. 10 min nach der Herstellung änderte sich im weiteren betrachteten Versuchszeitraum praktisch nicht mehr. Dies kann durch ein relativ stabiles konsistenzbestimmendes Gipsgefüge erklärt werden. Die infolge Umkristallisation langsam nachwachsenden Ettringitkristalle füllen dann nur „leere“ Zwischenräume aus und verändern die Konsistenz praktisch nicht. Eine weitere Konsistenzänderung ist erst nach dem Auffüllen der Hohlräume zu erwarten.

Bei Sulfatmangel in der Porenlösung des Betons wird weniger Ettringit, dafür aber Monosulfat gebildet (z. B. Beton mit Zement L 3). Die Wasserbindung beim Monosulfat ist deutlich geringer als beim Ettringit, wodurch die anfänglich etwas weichere Konsistenz der Leime und Betone mit Zement L 3 im Vergleich zum optimierten Zement L 2 erklärt werden kann. Aufgrund der langsam wachsenden, sehr stark gefügebildenden, großen Monosulfatstruktur ergab sich ein kontinuierliches Ansteifen, das dem absoluten Betrag nach deutlich über dem der Betone mit weitgehend optimierten Zementen lag.

5.2.2.2 Beurteilung des Ansteifens

Die Verarbeitbarkeit von Beton – beurteilt am Ausbreitmaß – erfährt üblicherweise in den ersten Minuten nach der Herstellung durch die oben beschriebenen Reaktionsabläufe eine zum Teil deutliche Veränderung. Die Anfangskonsistenz (a_0) unmittelbar nach der Herstellung charakterisiert demnach für Beton, der auf Baustellen verarbeitet wird, nicht die praxisrelevante Einbaukonsistenz. Das Frischbetonverhalten wird durch die Ausgangskonsistenz (a_{10}) 10 min nach der Herstellung für die Praxis deutlich treffender beurteilt. Das weitere üblicherweise geringe Ansteifen (Δa) kann als Konsistenzänderung, bezogen auf die Ausgangskonsistenz, angegeben werden (z. B. $\Delta a = a_{10} - a_{60}$).

Der Differenzwert a_{10} bis a_{60} wird häufig als „Ansteifen“ bezeichnet; er ist jedoch ohne Angabe des Bezugswertes a_{10} nicht aussagekräftig.

tig für den Beton. Beispielsweise zeigt der Beton mit Zement 2 im Zeitintervall 10 bis 60 min keine mit dem Ausbreitmaß meßbare Konsistenzänderung. Man könnte daraus ableiten, daß „kein Ansteifen“ aufgetreten ist. Der Vergleich mit den anderen Betonen gleicher Zusammensetzung zeigt jedoch, daß dieser Beton infolge Gipsbildung im Zementleim bereits vor der ersten Konsistenzmessung sehr stark angesteift war und sich daher zu jedem Prüfzeitpunkt eine vergleichsweise steife Konsistenz ergab.

Grundsätzlich können alle Betone, d. h. auch solche mit großen Konsistenzänderungen a_0 bis a_{10} und/oder a_{10} bis a_{60} , in der Praxis verwendet werden. Hierbei muß die allgemeine Forderung der einbaugerechten Verarbeitbarkeit durch entsprechend größere Vorhaltemaße in der Konsistenz (z. B. Erhöhung der Zementleimenge oder Verwendung wirksamer Verflüssiger) erfüllt werden.

Einige in der Vergangenheit aufgetretenen Schwierigkeiten hinsichtlich der Verarbeitbarkeit von Beton auf der Baustelle sind vermutlich auf unterschiedliche Prüfzeitpunkte der Konsistenz zurückzuführen. Wurde beispielsweise bei der Betoneignungsprüfung im Labor das üblicherweise frühestmögliche Ausbreitmaß a_0 dem Mischungsentwurf zugrunde gelegt, so ist beim Einbau des Betons, der häufig erst 10 min nach der Betonherstellung oder später erfolgt, eine zu steife Konsistenz fast zwingend zu erwarten. Die Neufassung von DIN 1045 wird diesem Gesichtspunkt Rechnung tragen und bereits in der Eignungsprüfung die Konsistenzbestimmung 10 und 45 min nach der Herstellung vorschreiben.

5.2.3 *Einfluß der Mischdauer*

Der Einfluß unterschiedlicher Mischzeiten (30, 60 und 90 s) auf die anfängliche Konsistenzentwicklung ist für die Betone mit den drei von der Gefügeart unterschiedlichen Laborzementen L 1 bis L 3 der Tafel 5 zu entnehmen. Unabhängig vom gebildeten Gefüge ergab sich mit zunehmender Mischdauer eine steifere Anfangskonsistenz (a_0), während die Ausgangskonsistenz (a_{10}) praktisch unverändert blieb.

Unterschiede in der Durchmischung des Betons können als Ursache hierfür ausgeschlossen werden, da bei dem gewählten Mischerfüllungsgrad von rd. 60 % bei allen gewählten Mischzeiten ein homogener, gut zusammenhängender Beton erzielt wurde. Die beobachteten Konsistenzänderungen dürften primär auf die unterschiedlichen Prüfzeitpunkte der Konsistenz, bezogen auf die Wasserzugabe und damit Erfassung unterschiedlicher Mengen der bis dahin gebildeten ersten Hydratationsprodukte, zurückzuführen sein, wie Bild 5 für den Beton mit Zement L 2 verdeutlicht.

Bei dem Beton mit dem sekundärgipsbildenden Laborzement L 1 zeigte sich mit steigender Mischdauer eine Änderung der Ansteifcharakteristik. Bei 30 s Mischdauer ergab sich nach einer sehr weichen Anfangskonsistenz ein deutliches Ansteifen mit einem sehr geringen a_5 , anschließend konnte ein geringfügiges Weicherwerden beobachtet werden. Bei den längeren Mischzeiten ergab sich eine steifere Anfangskonsistenz und ein insgesamt deutlich langsameres Ansteifen des Betons. Eine denkbare Erklärung hierfür ist,

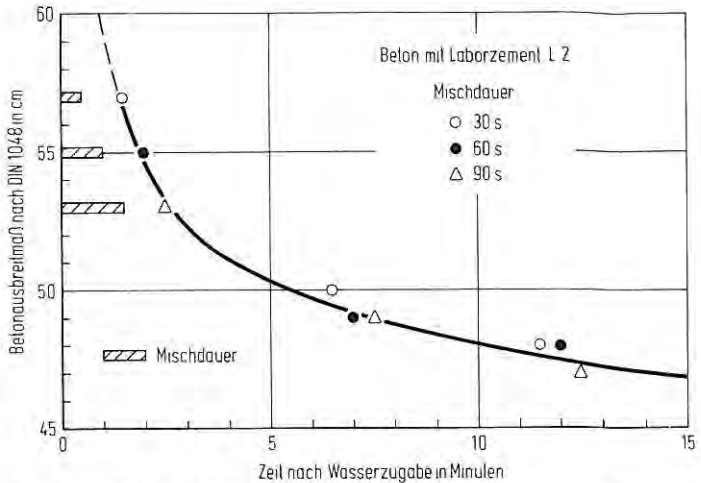


Bild 5 Einfluß des Prüfzeitpunktes auf die Anfangskonsistenz von Beton bei unterschiedlichen Mischzeiten ($z = 300 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,60$; $t \cong 20 \text{ }^\circ\text{C}$)

daß sich die gefügebildenden Gipskristalle innerhalb der ersten 2 min nach Wasserzugabe bilden und mit steigender Mischzeit der Anteil der Gipskristalle, die bereits im Mischer wieder „zerkleinert“ werden, steigt, wodurch sich die weichere spätere Konsistenz ergibt.

Eine Anregung des C_3A -Umsatzes des Zements durch längeres intensives Mischen, die zum Teil an steifen Zementleimen in schnelllaufenden Labormischern beobachtet wurde, kann für praxisübliche Mischzeiten und -intensitäten für Beton weitgehend ausgeschlossen werden.

Bei Mischgeräten, bei denen die Frischbetonkonsistenz über die Leistungsaufnahme beim Mischvorgang kontrolliert und ggf. nachgesteuert wird, können sich infolge von Nachdosieren von bestimmten Betonausgangsstoffen unterschiedlich lange Mischzeiten und damit unterschiedliche Zeitpunkte der Bestimmung der Leistungsaufnahme ergeben. Hierdurch könnte sich eine Abweichung von der vorher bestimmten Relation zwischen Leistungsaufnahme im Mischer und Ausgangskonsistenz (a_{10}) ergeben.

5.2.4 Einfluß der Temperatur

Die Temperatur des frischen Zementleims bzw. Betons bestimmt maßgeblich das gebildete Hydratationsgefüge. Die in Bild 2 für Zementleim dargestellten Erstarrungszeiten für 20 und 30 °C machen deutlich, daß sich mit steigender Temperatur zum einen die absolute Erstarrungszeit verringerte, zum anderen das Optimum in den Bereich von größerem Anteil an Halbhydrat verschob. Als Ursache hierfür kann die in der Literatur [5 bis 7] beschriebene Anregung des C_3A -Umsatzes bei gleichzeitiger Verminderung der SO_3 -Reaktivität

infolge der Temperaturerhöhung angesehen werden. Dadurch wird die Gesamtreaktionsmenge erhöht und die Gefügebildung geringfügig in Richtung Sulfatmangel, d. h. Monosulfatbildung, verschoben.

Bei den zugehörigen Betonversuchen bei 34 °C Betontemperatur (Tafel 4) ergab sich für den Beton mit dem für 20 °C optimierten Laborzement L 2 eine verstärkte Gefügebildung, d. h. die Ausgangskonsistenz (a_{10}) wurde im Vergleich zu dem Beton bei 20 °C um rund 4 cm im Ausbreitmaß steifer, während die weitere Konsistenzänderung, bezogen auf das jeweilige a_{10} , konstant blieb. Die Umkristallisationsgeschwindigkeit der Einzelkristalle wurde offenbar im betrachteten Zeitintervall (10 bis 60 min nach der Herstellung) nicht nennenswert durch die Temperatur beeinflusst.

Für den Beton mit dem bei 20 °C leicht gipsbildenden Zement L 1 ergab sich bei 34 °C eine steifere Anfangskonsistenz, jedoch dann eine praktisch gleiche (bzw. geringfügig weichere) Ausgangskonsistenz (a_{10}). Der Konsistenzverlauf im Zeitintervall 10 bis 60 min nach der Herstellung wurde von der Temperatur nicht beeinflusst. Dies kann durch die Veränderung der Reaktionsprodukte erklärt werden. Durch die erhöhte Temperatur steigt die Gesamtmenge an Reaktionsprodukten, wodurch ein Steiferwerden bedingt würde; gleichzeitig wird aber die bei 20 °C auftretende gefügebildende Gipsbildung reduziert, was einem Weicherwerden entsprechen würde. Im vorliegenden Fall gleichen sich diese gegenläufigen Wirkungen offenbar gerade aus.

Für den Beton mit dem bei 20 °C leicht monosulfatbildenden Zement L 3 ergab sich bei 34 °C die nach Bild 2 zu erwartende deutliche Verstärkung des Ansteifens. Die Ausgangskonsistenz (a_{10}) wies mit 38 cm ein um rd. 10 cm geringeres Ausbreitmaß auf als der Vergleichsbeton bei 20 °C. Die insgesamt große Konsistenzänderung in den ersten Minuten kann durch das ausgeprägte Monosulfatgefüge, das durch die erhöhte Temperatur noch verstärkt wurde, erklärt werden. Der weitere Konsistenzverlauf dieses Betons im Ausbreitmaßbereich von 38 bis 35 cm kann nur bedingt beurteilt werden, da damit für die betrachtete Betonzusammensetzung die Grenze der Anwendbarkeit des Ausbreitmaßes erreicht wurde.

Die gefundenen Ergebnisse über den Temperatureinfluss stimmen mit den rein beschreibenden Literaturergebnissen [24 bis 31] überein, wonach bei einer Temperaturerhöhung von 20 auf 30 °C für die überwiegende Anzahl der untersuchten Betone eine steifere Ausgangskonsistenz beobachtet wurde. In [30 und 31] wurde für einzelne Betone ein geringfügiges Weicherwerden bei der o. g. Temperaturerhöhung gefunden. Dieses als „ungewöhnlich“ bezeichnete Verhalten wurde in den genannten Arbeiten nicht erklärt. Nach den vorliegenden Untersuchungen dürfte dieses Verhalten auf eine Gipsbildung im Beton bei rd. 20 °C zurückzuführen sein, deren gefügebildender Einfluß mit steigender Temperatur geringer wurde (vgl. Beton mit Laborzement L 1).

Die Art des Temperatureinflusses auf die Ausgangskonsistenz wird stets von zwei unabhängigen Reaktionsabläufen geprägt, einerseits der Erhöhung der Gesamtmenge an Reaktionsprodukten und andererseits der Veränderung der Gefügeart durch die Temperatur. In

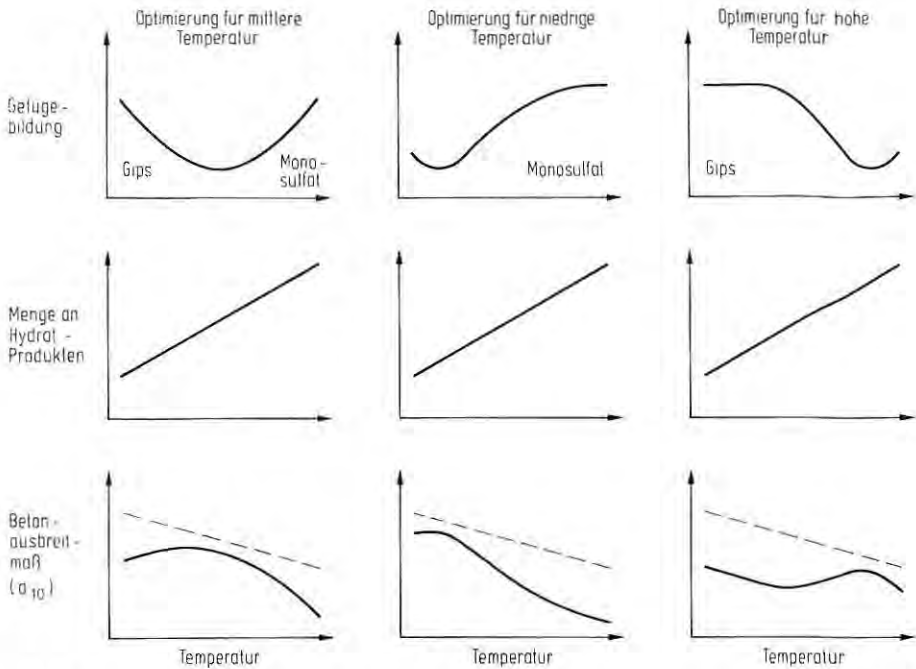


Bild 6 Qualitativer Temperatureinfluß auf Menge und Art der Reaktionsprodukte und damit auf die Betonkonsistenz a_{10} für unterschiedliche Optimierungstemperaturen des Zements

Bild 6 sind diese Einflüsse qualitativ für 3 unterschiedliche Zementabstimmungen dargestellt.

In der oberen Bildreihe sind 3 unterschiedliche Zementoptimierungen aufgetragen, die sich im Prinzip nur von der jeweiligen Lage des Gefügeoptimums (mittlere, tiefe und hohe Temperatur) unterscheiden. Bei geringer Temperatur tritt eine Gefügebildung infolge Sulfatüberschuß und damit Gipsbildung auf. In dem Temperaturbereich, für den die „Erstarrungsoptimierung“ erfolgt ist, ergibt sich die geringste Gefügebildung, hier dargestellt durch das relative Minimum der Gefügekurve, und im hohen Temperaturbereich ist eine Gefügebildung infolge Sulfatmangels und damit Monosulfatbildung zu beobachten. Die Gefügeänderung in Abhängigkeit von der Temperatur ist für alle Zemente prinzipiell gleich, die Ausprägung der einzelnen Gefügearten kann jedoch rohstoffbedingt unterschiedlich sein. In der mittleren Bildreihe ist die steigende Menge an Reaktionsprodukten für alle 3 Zemente in gleicher Weise vereinfachend dargestellt.

In der unteren Bildreihe sind die Einflüsse aus Menge und Gefügeart der Reaktionsprodukte auf das Fließverhalten des Betons, ausgedrückt durch das Betonausbreitmaß, dargestellt. Die fallende ge-

strichelte Linie soll dabei dem Einfluß der steigenden Menge an Hydrationsprodukten entsprechen. Der Einfluß der unterschiedlichen Gefügearart wurde für jede Temperatur durch „Abziehen“ des jeweiligen Gefügeeinflusses aus Zeile 1 berücksichtigt. Der Gesamttemperatureinfluß auf die Ausgangskonsistenz wird qualitativ durch die fett ausgezogenen Linien der unteren Bildreihe dargestellt.

Alle drei Kurven weisen ein mehr oder weniger stark ausgeprägtes Optimum der Ausgangskonsistenz im Bereich der „Optimierungstemperatur“ des Zements auf. Für die Optimierung auf hohe Temperaturen ergibt sich für den dargestellten Gefügeeinfluß mit steigender Temperatur zunächst eine Verringerung des Ausbreitmaßes, die auf konstante Gefügebildung, aber steigende Menge an Reaktionsprodukten zurückzuführen ist, danach eine Vergrößerung des Ausbreitmaßes infolge sinkenden Gefügeeinflusses bis hin zu dem oben beschriebenen relativen Optimum, nach dem das Ausbreitmaß wieder geringer wird, da sich dann die Einflüsse aus Gefüge und Menge an Reaktionsprodukten in gleicher Richtung überlagern.

Der hier theoretisch hergeleitete qualitative Zusammenhang zwischen Betonausgangskonsistenz und Temperatur stimmt gut mit den in [24] versuchsmäßig ermittelten Kurvenverläufen überein, wobei in [24] der Fall der Abstimmung für hohe Temperaturen nur bis zum Optimum gemessen wurde.

Die Handelszemente sind üblicherweise für einen Temperaturbereich von 10 bis 30 °C „erstarrungsoptimiert“ [15], so daß der überwiegende baupraktische Anwendungsbereich im Bereich möglichst geringer Temperaturabhängigkeiten liegt.

6. Zusammenfassung und Folgerungen

6.1 Das Ansteifen von Beton wird direkt von der Art und Menge der mit Beginn der Hydratation des Zements gebildeten Reaktionsprodukte bestimmt. Das Ansteifen ist dabei ein notwendiger Vorgang, der den Frischbeton in den Festbeton mit den gewünschten Gebrauchseigenschaften überführt. Die Gefügebildung im Zementleim wird im wesentlichen durch die Abstimmung von Menge und Reaktivität des Tricalciumaluminats (C_3A) im Zementklinker und des zur Erstarrungsregelung zugesetzten Sulfats (SO_3) bestimmt. Hierbei können drei Grundfälle der Abstimmung unterschieden werden:

- Weitgehende Abstimmung, d. h. überwiegende Bildung von feinkörnigem Ettringit, der sich als dünner Belag auf den Zementpartikeln niederschlägt und nur wenig gefügebildend wirkt.
- Sulfatüberschuß, d. h. zusätzlich zum Ettringit Bildung von sekundärem Gips, der aufgrund seiner relativ langen Kristalle deutlich gefügebildend wirkt.
- Sulfatmangel, d. h. Bildung von Monosulfat und etwas weniger Ettringit, wobei das Monosulfat aufgrund seiner sehr hohlraumreichen Blättchenstruktur stark gefügebildend wirkt.

6.2 Die im Zementwerk eingestellte Optimierung hinsichtlich des Erstarrungsverhaltens kann durch die spätere Temperatur des

Leims oder Betons verändert werden, da sich die Reaktionsfähigkeiten von C_3A und SO_3 mit der Temperatur gegenläufig ändern. Eine Abstimmung ist demnach nur für einen bestimmten Temperaturbereich möglich, der für übliche Zemente im Bereich von 10 bis 30 °C liegt.

6.3 Frischbeton verändert üblicherweise in den ersten Minuten nach dem Kontakt von Zement und Wasser seine Konsistenz relativ rasch, was auf die erste Bildung von Reaktionsprodukten zurückzuführen ist. Die Konsistenzänderung korreliert dabei direkt mit der Menge und der Art der Gefügebildung, wobei sowohl der Gefügeeinfluß als auch die Menge an chemisch gebundenem Wasser die Konsistenz beeinflussen. In den ersten 10 Minuten wurden Änderungen des Ausbreitmaßes von bis zu 10 cm Konsistenzänderung beobachtet.

6.4 Das weitere Ansteifen des Betons erfolgt relativ langsam und fällt in den Zeitbereich der chemischen Ruheperiode der Hydratation. Es wird auf die Sammelkristallisation von einzelnen kleineren Kristallen zu größeren gefügebildenden „Leisten“ zurückgeführt. Für die untersuchten Betone lagen die Änderungen im Ausbreitmaß im Zeitintervall 10 bis 60 min nach der Herstellung im Mittel bei rd. 3 cm.

6.5 Aufgrund der raschen anfänglichen Konsistenzentwicklung, nach der sich ein relativ stabiles Konsistenzniveau einstellt, ist es zweckmäßig, die Ausgangskonsistenz (10 min nach der Betonherstellung) als charakteristische Betonkonsistenz zu bestimmen. Die weiteren Konsistenzänderungen sind auf diese Ausgangskonsistenz zu beziehen.

6.6 Die Mischdauer hat bei den üblichen Mischgeräten und Mischzeiten keinen wesentlichen Einfluß auf das Ansteifen und die Konsistenzentwicklung im Zeitbereich 10 bis 60 min nach der Herstellung. Die frühestmöglich meßbare Konsistenz wird mit steigender Mischzeit etwas steifer, was aber auf den zeitlich späteren Prüfzeitpunkt, bezogen auf die Wasserzugabe, erklärt werden kann. Über den Umfang des Einflusses verschiedener Prüfzeitpunkte auf die Konsistenzbestimmung sollte sich der Betonhersteller insbesondere bei der Konsistenzsteuerung über die Leistungsaufnahme des Mischers für unterschiedliche Mischzeiten Aufschluß verschaffen.

6.7 Ferner sollte der Betonhersteller den Ansteifverlauf des Betons bereits bei der Eignungsprüfung erfassen und die Konsistenzänderungen durch ein entsprechendes Vorhaltemaß berücksichtigen.

6.8 Bei deutlich von 20 °C abweichenden Betontemperaturen und/oder Verwendung von verzögernden [32] und/oder verflüssigenden Zusatzmitteln sollte das Ansteifverhalten kontrolliert werden und ggf. das Konsistenzvorhaltemaß entsprechend geändert werden.

6.9 Eine Korrelation zwischen Ansteifverhalten des Zementleims, beurteilt an Penetrometermessungen bei konstantem Wasserzementwert, und zugehörigem Beton, beurteilt an Ausbreitmaßbestimmungen nach DIN 1048, wurde nicht gefunden. Dies kann durch die unterschiedliche Art der Gefügeeinfassung der genannten Verfahren erklärt werden.

SCHRIFTTUM

- [1] Verein Deutscher Zementwerke e. V. – Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf: Erstarren und Erhärten. Tätigkeitsbericht 1972/74, S. 63/68.
- [2] Verein Deutscher Zementwerke e. V. – Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf: Erstarren und Erhärten. Tätigkeitsbericht 1975/78, S. 38/48.
- [3] Locher, F. W., und S. Sprung: Einflüsse auf das Erstarren von Zement. TIZ-Fachberichte 98 (1974) H. 10, S. 273/276.
- [4] Locher, F. W., W. Richartz und S. Sprung: Erstarren von Zement, Teil I: Reaktion und Gefügeentwicklung. Zement-Kalk-Gips 29 (1976) H. 10, S. 435/442.
- [5] Locher, F. W., W. Richartz und S. Sprung: Erstarren von Zement, Teil II: Einfluß des Calciumsulfat-Zusatzes. Zement-Kalk-Gips 33 (1980) H. 6, S. 271/277.
- [6] Locher, F. W., W. Richartz, S. Sprung und H.-M. Sylla: Erstarren von Zement, Teil III: Einfluß der Klinkerherstellung. Zement-Kalk-Gips 35 (1982) H. 12, S. 669/670.
- [7] Locher, F. W., W. Richartz, S. Sprung und W. Rechenberg: Erstarren von Zement, Teil IV: Einfluß der Lösungszusammensetzung. Zement-Kalk-Gips 36 (1983) H. 4, S. 224/231.
- [8] Locher, F. W.: Erstarren und Anfangsfestigkeit von Zement. Zement-Kalk-Gips 26 (1973) H. 2, S. 53/62.
- [9] Locher, F. W.: Einfluß der Klinkerherstellung auf die Eigenschaften des Zementes. Zement-Kalk-Gips 28 (1975) H. 7, S. 265/272.
- [10] Sylla, H.-M.: Einfluß der Klinkerkühlung auf Erstarren und Festigkeit von Zement. Zement-Kalk-Gips 28 (1975) H. 9, S. 357/362.
- [11] Locher, F. W.: Verfahrenstechnik und Zementeigenschaften. Zement-Kalk-Gips 31 (1978) H. 6, S. 269/277.
- [12] Sylla, H.-M.: Einfluß reduzierenden Brennens auf die Eigenschaften des Zementklinkers. Zement-Kalk-Gips 34 (1981) H. 12, S. 618/630.
- [13] Verein Deutscher Zementwerke e. V. – Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf: Ansteifen, Erstarren und Erhärten. Tätigkeitsbericht 1978/81, S. 33 und 61/67.
- [14] Verein Deutscher Zementwerke e. V. – Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf: Erstarren und Erhärten, Ansteifen des Betons. Tätigkeitsbericht 1981/84, S. 34/40 und 92/93.
- [15] Wischers, G.: Ansteifen und Erstarren von Zement und Beton. beton 31 (1981) H. 9, S. 337/340, und H. 10, S. 385/389; ebenso Betontechnische Berichte 1980/81, Beton-Verlag, Düsseldorf 1982, S. 147/167.
- [16] Ansteifen von Beton – Bericht des VDZ-Arbeitskreises Frischbeton. beton 35 (1985) H. 4, S. 151/155.
- [17] Krell, J.: Die Konsistenz von Zementleim, Mörtel und Beton und ihre zeitliche Veränderung, Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 46, Beton-Verlag, Düsseldorf 1985; ebenso Dissertation an der RWTH-Aachen, 1985.
- [18] Zement-Taschenbuch 48 (1984) Abschn. 3.2, S. 62 ff. Bauverlag, Wiesbaden 1984.
- [19] Odler, I., und J. Schüppstuhl: Early Hydration of Tricalcium Silicate, Teil III: Control of the Induction Period. Cement and Concrete Research 11 (1981) S. 5/6, S. 765/774.
- [20] Bonzel, J., und J. Krell: Konsistenzprüfung von Frischbeton. beton 34 (1984) H. 2, S. 61/66, und H. 3, S. 101/104.

- [21] Richartz, W.: Einfluß von Zusätzen auf das Erstarrungsverhalten von Zement. *beton* 33 (1983) H. 11, S. 425/429, und H. 12, S. 465/471; ebenso *Betontechnische Berichte* 1982/1983, Beton-Verlag, Düsseldorf 1984, S. 169/198.
- [22] Bonzel, J., und J. Dahms: Über den Wasseranspruch des Frischbetons. *beton* 28 (1978) H. 9, S. 331/336, H. 10, S. 362/367, und H. 11, S. 413/416; ebenso *Betontechnische Berichte* 1978, Beton-Verlag, Düsseldorf 1979, S. 121/156.
- [23] Pratt, P. L., und A. Ghose: Electron Microscope Studies of Portland Cement Microstructures During Setting and Hardening. *Technology in the 1990s: Developments in Hydraulic Cements. Meeting Proceedings* 16.-17. Febr. 1983, Royal Society, London 1983, S. 93/103.
- [24] Wierig, H.-J., E. Scholz und H. Nelskamp: Zu offenen Fragen der Frischbetontechnologie. *Betonwerk + Fertigteil-Technik* 50 (1984) H. 11, S. 733/741.
- [25] Lewandowski, R., und G. Wolter: Zum Ansteifverhalten von Zement und Beton. *Betonwerk + Fertigteil-Technik* 47 (1981) H. 5, S. 266/272, und H. 6, S. 341/348.
- [26] Dulieu, C.: Rhéologie des bétons frais et sa variation dans le temps – méthodes d'essais. *Revue des Matériaux de Construction – Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux* (1981/82) Nr. 737 – 4/82, S. 230/235.
- [27] Whiting, D.: Effect of Mixing Temperature on Slump Loss and Setting Time of Concrete Containing High-Range Water Reducers. *Cement, Concrete and Aggregates* 2 (1980) Nr. 1, S. 31/38.
- [28] Tuthill, L. H.: Slump loss. *Concrete International* 1 (1979) S. 30/35.
- [29] Wiebenga, J. G.: Invloed van de waterbehoefte van cement en de temperatuur opt de betonkwaliteit. *Cement* 23 (1981) Nr. 5, S. 306/310; ebenso zugehörige Übersetzung ins Deutsche von Tegelaar, R. in *beton* 33 (1983) H. 2, S. 62/63.
- [30] Wandschneider, R., und R. Pick: Transportbeton aus Abnehmersicht – Anforderungen und Erfahrungen. *Beton- und Stahlbetonbau* 76 (1981) H. 3, S. 58/62.
- [31] Hot Weather Concreting, ACI-Committee 305, *ACI-Journal* 74 (1977) Nr. 8, S. 317/322.
- [32] Vorläufige Richtlinie für Beton mit verlängerter Verarbeitbarkeitszeit (Verzögerter Beton), Fassung März 1985. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Berlin.