

ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurde das rheologische Verhalten (d.h. das Fließverhalten) von drei Hochleistungsbetonverflüssigern (HBV: Polymelaminsulfonat, Polynaphthalensulfonat, Polyacrylat) in Kombination mit verschiedenen Zementen (CEM I 42.5) aus der Schweiz eingehend untersucht. Ziel war es, die Wechselwirkungen zwischen Zement und Hochleistungsbetonverflüssiger zu bestimmen, sowie die wichtigsten Parameter zu ermitteln, die das rheologische Verhalten während der ersten zwei Stunden beeinflussen. Während dieser Zeit wird Beton üblicherweise angemacht, transportiert und eingebaut. Die rheologischen Untersuchungen an Zementleim, Mörtel und Beton wurden durch XRD, Porenwasseranalysen, Hydratationswärmemessungen und DSC-Messungen ergänzt.

Die Hydratation von Zement beinhaltet verschiedenste Reaktionen, welche hauptsächlich von der Zementzusammensetzung, dem w/z-Wert und der Temperatur abhängen. Sowohl das Fließverhalten von Mörtel und Beton zu Beginn der Hydratation, als auch das Erhärten des Zementleims (oder des Betons) wird dadurch massgeblich beeinflusst. Heutzutage verwendet man verschiedenste chemische Zusatzmittel, welche gewollt oder ungewollt den Hydratationsprozess beeinflussen. Aufgrund der Komplexität der ablaufenden Hydratationsreaktionen und dem noch ungenügenden Verständnis ist es nicht immer möglich, das Hydratationsverhalten wunschgemäss zu beeinflussen.

Als wichtigste Parameter ergaben sich folgende Kenngrössen:

- **Gehalt an C_3A**
- **Gehalt an wasserlöslichen Alkalien (Na^+ , K^+)**
- **HBV-Art und -Dosierung**
- **Mörtel- resp. Zementleimtemperatur**
- **W/Z-Wert**

Der Einfluss der Temperatur ist in der Literatur bis anhin kaum beschrieben worden, obwohl in der Praxis die Frischbetontemperatur ohne weiteres zwischen 5 und 30°C variieren kann.

Der Gehalt an C_3A und an wasserlöslichen Alkalien hängt vom Zement ab. Für die untersuchten Zemente variierten diese Werte von 1.5 bis 12 Gew.-% C_3A , sowie von 0.22 bis 0.96 Gew.-% Na_2O-eq_{sol} . Der Einfluss dieser Parameter kann nur an unterschiedlichen Zementen verglichen werden oder muss durch Zugabe ähnlicher Stoffe simuliert werden. Eine solche Simulation erfolgte für den Gehalt an wasserlöslichen Alkalien durch Zugabe von Na_2SO_4 zum Anmachwasser.

Porenwasseranalysen haben gezeigt, dass die Menge an adsorbiertem und eingebauten HBV stark vom C_3A -Gehalt eines Zementes abhängt. Zudem ist diese Menge bei gleicher HBV-Konzentration bei den drei untersuchten HBV unterschiedlich. Beim Polyacrylat war sie am kleinsten, beim Polynaphthalensulfonat am grössten. Eine Zugabe von Na_2SO_4 zum Anmachwasser erhöhte den Anteil an HBV, welcher im Porenwasser verbleibt, d.h. welcher nicht adsorbiert oder eingebaut wurde.

Es hat sich gezeigt, dass der Gehalt an SO_3 im Klinker mit dem wasserlöslichen Alkaligehalt im Zement korreliert ($r^2=0.81$). Daraus geht hervor, dass der Gehalt an SO_3 im Klinker vor allem von leicht löslichen Alkalisulfaten stammt. Es hat sich zudem gezeigt, dass wasserlösliche Alkalien in den ersten 30 Minuten bei einem w/z-Wert von 0.35, resp. 50, zu mindestens 50, resp. 66% aufgelöst werden. Zu dieser Zeit sind erst wenige Prozente des Zements hydratisiert. Um eine derart hohe Auflösung zu erreichen, **müssen die Alkalisulfate vorzugsweise monomineralisch und/oder an der Oberfläche der polymineralischen Zementpartikel vorliegen. Diese Ergebnisse bestätigen, dass wasserlösliche Alkalien nebst dem zugemahlenem Gipsstein sehr wichtige Sulfatlieferanten vor allem bei niedrigen w/z-Werten sind.** Diese Erkenntnis ist für das Verständnis von Wechselwirkungen zwischen Zement und HBV besonders wichtig, da Sulfationen im Porenwasser nebst dem C_3A -Gehalt hauptverantwortlich für das HBV-Adsorptionsverhalten sind.

Die rheologischen Untersuchungen an Zementleim und Mörtel wurden bei konstanten Temperaturen (8, 20, 30°C) mit einem Rotationsviskosimeter durchgeführt. Dadurch konnte der Einfluss der Zementleim- und Mörteltemperatur auf die Fliesseigenschaften untersucht werden. Dabei verhielten sich die Zementsuspensionen im untersuchten Drehmomentbereich wie Bingham-Flüssigkeiten. Von den drei untersuchten Parametern (relativer Fließwiderstand, relativer Viskositätskoeffizient und Ansteifen) erwies sich der relative Fließwiderstand als die Kenngrösse, mit der die Betonkonsistenz am besten vorhergesagt werden konnte. Ohne HBV stieg der relative Fließwiderstand mit steigender Temperatur an. Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten ist der Ettringitgehalt, welcher in den untersuchten Zementproben von 10 bis 30°C anstieg.

Ohne HBV zu verwenden, ergab sich für die 10 untersuchten Zemente ein linearer Zusammenhang zwischen dem relativen Fließwiderstand und dem Produkt aus C_3A und Zementmahlfeinheit ($r^2=0.65$). Unter Berücksichtigung von C_3S verbesserte sich der Korrelationskoeffizient auf 0.74. Bei der Verwendung von HBV ist der Korrelationskoeffizient abhängig von der HBV-Dosierung. Nebst dem Produkt aus C_3A und Zementmahlfeinheit konnte kein weiterer Einflussparameter gefunden werden. Keinen Einfluss auf den Korrelationskoeffizienten hatte der C_2S -Gehalt.

Mit steigendem HBV-Gehalt sank der Fließwiderstand, wobei die verflüssigende Wirkung beim Polyacrylat besonders ausgeprägt ist. Die Zugabe von Na_2SO_4 ins Anmachwasser hatte je nach untersuchtem System (d.h. Zement-HBV-Temperatur) unterschiedliche Wirkung. **Generell kann davon ausgegangen werden, dass der relative Fließwiderstand bei einer bestimmten Konzentration an Na_2SO_4 einen minimalen Wert aufweist (parabelförmige Kurve).** Bei höherer oder tieferer Konzentration ist der Na_2SO_4 -Gehalt bezüglich des relativen Fließwiderstandes nicht optimiert (Konzept der Na_2SO_4 -Über- und Unterdosierung). Der optimale Gehalt an Na_2SO_4 kann sich abhängig von HBV, Mörteltemperatur und Zement beträchtlich verschieben. Es kann somit vorkommen, dass mit steigendem Gehalt an Na_2SO_4 nur der aufsteigende Ast der parabelförmigen Kurve gemessen wird.

Der Einfluss des Na_2SO_4 -Gehaltes auf den relativen Fließwiderstand konnte anhand eines HBV-Adsorptionsmodells erklärt werden. Dabei wird die Fließfähigkeit von dem an der Zementoberfläche haftenden HBV-Anteil bestimmt. Dieser Anteil wird vom C_3A -Gehalt des Zementes, von den in den Hydraten eingebauten HBV-Molekülen und vom Sulfationengehalt in der Porenlösung beeinflusst.

Der Einfluss der Temperatur auf HBV-enthaltende Mörtel ist sehr variabel und nicht vergleichbar mit Systemen ohne HBV. **Trotzdem konnten die Temperaturcharakteristiken der relativen Fließwiderstände von 4 der 5 untersuchten Zemente (Zement A, C, D, E) mit dem oben erwähnten HBV-Adsorptionsmodell erklärt werden.** Ein Zement-HBV-System bewegte sich mit steigender Temperatur entweder in Richtung Überdosierung oder Unterdosierung. Diese Verschiebung scheint lediglich vom Zement abhängig zu sein. Sie erfolgte unabhängig vom verwendeten HBV.

Abschliessend werden die aus der Arbeit gewonnenen, praxisrelevanten Hinweise zusammengestellt und ein Ausblick auf weiterführende Untersuchungen gegeben.

