

S. Weisheit, D. Waldmann, M. Greger

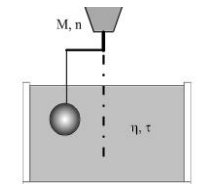
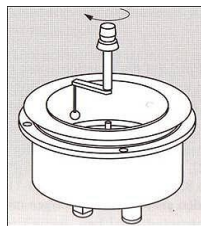
# RHEOLOGIE VON SVB - Untersuchungen am Leim, Mörtel und Beton

## 1 EINLEITUNG

Eine Beschreibung der Verarbeitbarkeit von SVB kann durch die rheologischen Kenngrößen Viskosität und Fließgrenze erfolgen. Es werden zwei Messmethoden vorgestellt, welche nach dem Prinzip arbeiten, dass die zu untersuchende Probe während des gesamten Versuches nur einmal geschert wird. Eine Zerstörung einer bereits aufgebauten Struktur infolge einer permanenten Scherung kann hierdurch verhindert werden. Zum einen erfolgt ein Vergleich der beiden Messmethoden. Zum anderen werden die Ergebnisse von aufeinander aufbauenden Leim-, Mörtel- und Betonversuchen dargestellt.

## 2 ANGEWANDTE MESSMETHODEN

Kugelmesssystem nach Tyrach & Müller: Das Kugelmesssystem nach Tyrach & Müller (**Abb. 1**) umgeht das Problem, dass bei Messverfahren mit Zylinder- oder Paddelgeometrien gegen Ende der Messung eine stark gescherte Probe getestet wird. Sie lässt aber trotzdem eine Berechnung der rheologischen Stoffgrößen zu, da eine exzentrisch rotierende Kugel eine Verdrängungsströmung ausbildet, durch welche eine zwangsweise Scherung der zu untersuchenden Probe initiiert wird. Der Ansatz zur Berechnung der rheologischen Stoffgrößen aus den Messgrößen Drehzahl und Drehmoment geht wie bei der Zylindergeometrie von einem laminaren Strömungsfeld aus. Wenn die Messung auf eine Umdrehung der Kugel in der Probe beschränkt wird, kann die Belastungsabhängigkeit vollkommen unabhängig von dem Zeitpunkt der Scherung untersucht werden. Der Grund hierfür ist, dass durch die Beschränkung auf nur 1 Umdrehung nur noch nicht geschertes Material gemessen wird. Infolge dessen ist es möglich, das Abbindeverhalten eines Baustoffs sozusagen ohne den Einfluss einer Scherkraft zu erfassen <sup>/2/</sup>. Die Umrechnung der gemessenen Drehmomente in eine Schubspannung und der Drehzahl in eine Schergeschwindigkeit erfolgt mittels einer Gerätekonstante, welche in Abhängigkeit von der Versuchsgeometrie bestimmt werden kann. Die Versuche wurden mit einem Rheometer der Firma Anton Paar GmbH [Paar Physica UDS 200] durchgeführt.



**Abb. 1:** Kugelmesssystem nach Tyrach & Müller <sup>/1/</sup>

Betonrheometer BT2: Bei dem Rheometer der Firma Schleibinger GmbH wird ebenfalls die zu untersuchende Probe nur einmal geschert. Allerdings tauchen hier 2 Stifte mit unterschiedlichen Radien zur Drehachse in die Probe ein, wodurch unterschiedliche Umfangsgeschwindigkeiten erzeugt werden (**Abb. 2**). Im Messgerät befinden sich ein Messaufnehmer für die Winkelgeschwindigkeit und je ein Messfühler für den Rührwi-

derstand gegen die Drehrichtung für jeden einzelnen Rührkörper. Die Daten der Rührkörper werden unter Berücksichtigung der Winkelgeschwindigkeit, und der Entfernung zur Zentrierstange zu einer Fließkurve aufbereitet. Bedingt durch die zwei verschiedenen Radien wird der Rührwiderstand gleichzeitig bei zwei verschiedenen Fließgeschwindigkeiten erfasst <sup>/3/</sup>. Bei der Auswertung der Daten wird davon ausgegangen, dass sich Frischbeton wie ein Bingham-Fluid verhält, was bedeutet, dass der Beton erst ab einer bestimmten Grenzschubspannung zu fließen beginnt. Die Fließkurve ist deshalb eine Gerade, welche sich durch Regressionsrechnung ermitteln lässt. Die aus der Fließkurve abgeleiteten Kennwerte sind die relative Fließgrenze und die relative Viskosität.

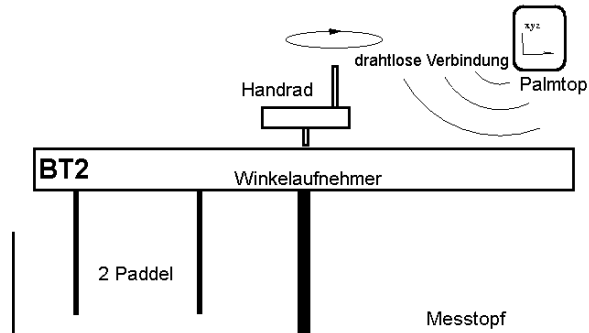


Abb. 2: Schematische Darstellung des BT2 <sup>/3/</sup>

### 3 UNTERSUCHUNGEN

Für die Untersuchungen wurde ein Mörtel gewählt, der sich zur Herstellung von SVB eignet. Es wurde ein Hochofenzement CEM III/A 52,5 eingesetzt. Ein Zusatzstoff wurde nicht zugegeben. Es kam ein Sand mit einem Größtkorn von 2 mm zum Einsatz. Da der Feinststoffgehalt in einem niedrigen Bereich lag, wurde zusätzlich zu einem Hochleistungsfließmittel ein Stabilisierer zugegeben. Der Mörtel wurde auf eine Ausgangskonsistenz mit einem Setzfließmaß von 28 cm eingestellt.

#### 3.1 PRINZIPIELLE VERSUCHSAUSWERTUNG

Die Trichterauslaufzeit dient als Messgröße für die Beschreibung der Viskosität des Selbstverdichtenden Mörtels. Je schneller der Beton aus dem Trichter ausläuft, desto geringer ist seine Viskosität. Das Setzfließmaß hingegen dient als Messgröße für die Beschreibung der Fließgrenze. Je größer sich der Mörtelkuchen ausbreitet, desto geringer ist die Fließgrenze <sup>/4/</sup>. Dementsprechend werden die Setzfließmaße mit den jeweiligen Fließgrenzen und die Trichterauslaufzeiten mit den jeweiligen Viskositäten in einem Diagramm gegenübergestellt. Zur Beurteilung des Rückstifverhaltens erfolgten die Messungen in einem Alter von 7, 30, 60, 90 und 120 Minuten nach Mischbeginn. Die idealen Kurvenverläufe der miteinander verglichenen Werte sind in Abb. 3 dargestellt. Während die Kurven im oberen Diagramm gegenläufig sein müssen, sollten die Kurven für den Vergleich der Trichterauslaufzeit mit der jeweiligen Viskosität den gleichen Verlauf aufweisen.

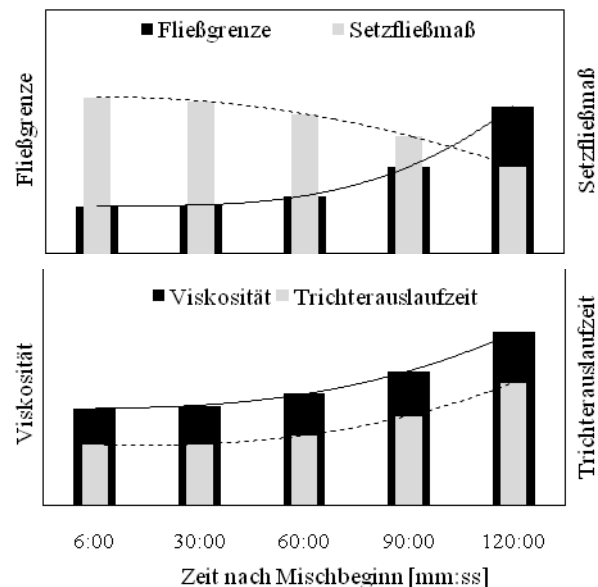
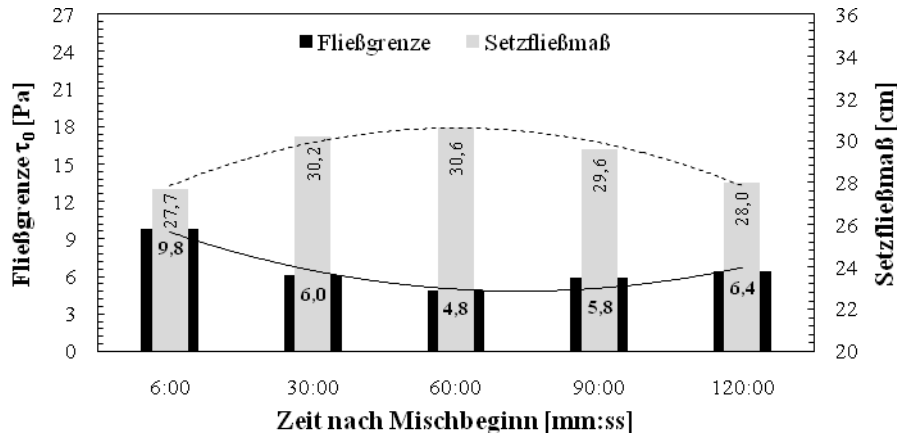


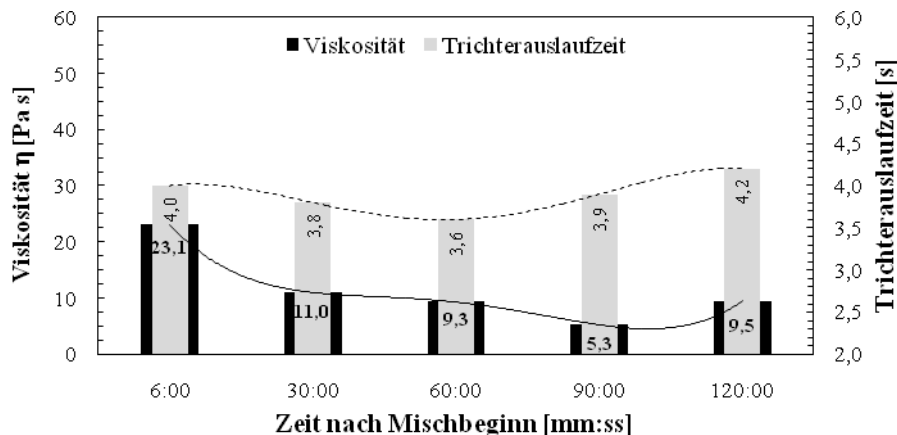
Abb. 3: Idealkurven, SFM-Fließgr./TAZ-Viskosität

### 3.2 AUSWERTUNG DER BEIDEN MESSMETHODEN

Kugelmesssystem nach Tyrach & Müller: **Abb.4** zeigt den Verlauf der Fließgrenze  $\tau_0$  sowie des Setzfließmaßes (SFM) als Funktion der Zeit nach Mischbeginn. Das Setzfließmaß steigt hervorgerufen durch eine Nachverflüssigung des Fließmittels zunächst an, durchläuft ein Maximum und fällt dann wiederum ab.  $\tau_0$  verhält sich umgekehrt. Der Vergleich von  $\tau_0$  und dem Setzfließmaß kann als zufriedenstellend eingestuft werden.



**Abb. 4:**  
Fließgrenze vs.  
Setzfließmaß  
UDS 200 - Mörtel

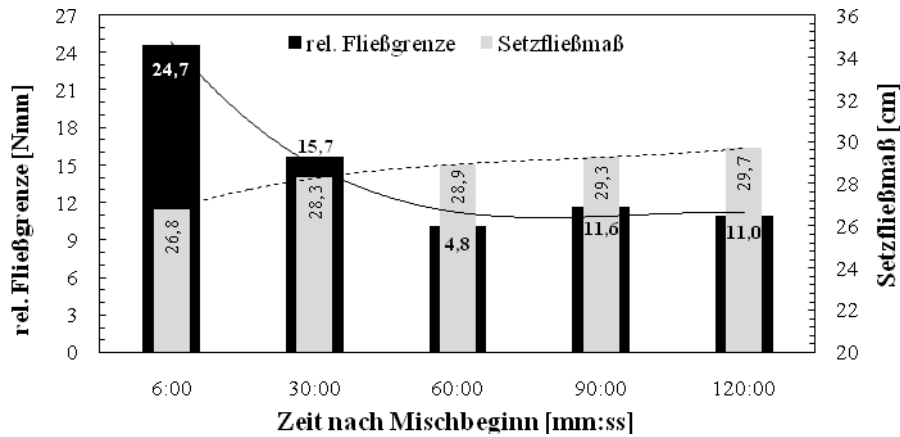


**Abb. 5:**  
Viskosität vs.  
Trichterauslaufzeit  
UDS 200 - Mörtel

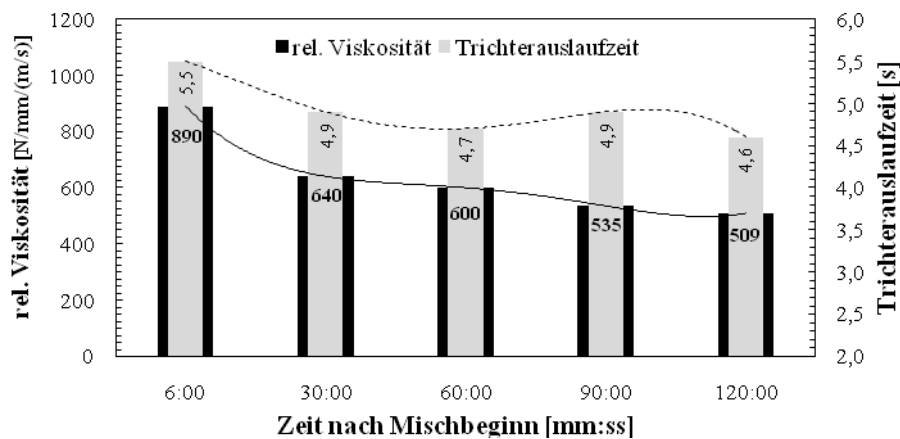
In **Abb. 5** ist die Viskosität bzw. die Trichterauslaufzeit als Funktion der Zeit dargestellt. Die gemessene Viskosität fällt stetig ab und steigt zum Versuchsende leicht an. Die Trichterauslaufzeit bleibt hingegen nahezu konstant. Die gewünschte Abhängigkeit ist hier nur tendenziell erkennbar. Die Kurven sind zum Teil eher als gegenläufig einzuordnen. Ein Grund hierfür ist zum einen darin zu suchen, dass die Trichterauslaufzeiten des Mörtels mit ca. 4 Sekunden sehr gering sind. Eine exakte Messung mit der Stoppuhr ist relativ schwierig. Zum anderen waren die einzelnen Werte für die Trichterauslaufzeiten über dem gesamten Messzeitraum nahezu identisch (3,6 s bis 4,2 s).

Betonrheometer BT2: **Abb. 6** zeigt die zeitliche Entwicklung der relativen Fließgrenze und des Setzfließmaßes der BT2-Versuche. Die Kurven weisen ebenfalls entgegengesetzte Verläufe auf. Allerdings ist bei diesem Versuch kein Ansteifen des Mörtels nach 90 Minuten erkennbar. Dieses unterschiedliche Rücksteifverhalten ist mit den benötigten Mörtelvolumen für die jeweiligen Testmethoden zu erklären. Während bei den UDS-Versuchen nur eine Mischung mit ca. 5 Litern Volumen hergestellt werden musste, war die Mischung für die Messung am BT2 mit ca. 50 Litern wesentlich größer. Eine

langsame Bewegung (Rotation) des Mischgutes zur Simulation eines Transportbetonmischers während der Versuchspausen bewirkte bei den größeren Mischvolumen ein besseres Rückstifverhalten als bei den kleineren Mischvolumen.



**Abb. 6:**  
rel. Fließgrenze  
vs. Setzfließmaß  
BT2 - Mörtel



**Abb. 7:**  
rel. Viskosität vs.  
Trichterauslaufzeit  
BT2 - Mörtel

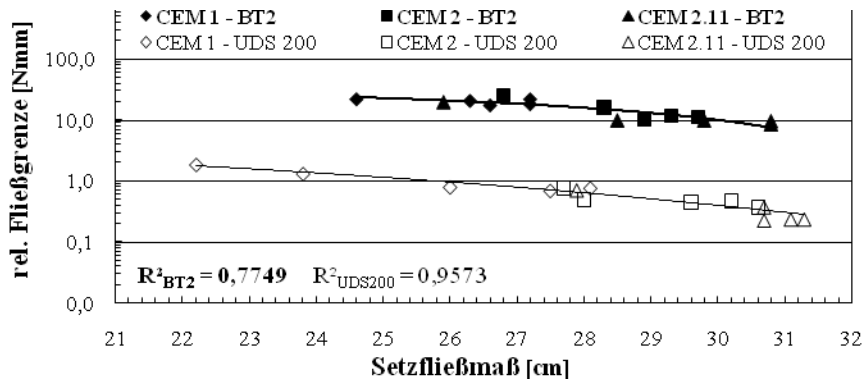
In **Abb. 7** sind die relativen Viskositäten und die Trichterauslaufzeiten gegenübergestellt. Mit sinkenden Trichterauslaufzeiten fallen auch die dazugehörigen Werte für die relativen Viskositäten. Die Messungen bezüglich der relativen Viskosität können mit dieser Methode als genauer eingestuft werden, als die Ergebnisse der Untersuchungen mit dem UDS 200.

### 3.3 VERGLEICH DER BEIDEN MESSMETHODEN

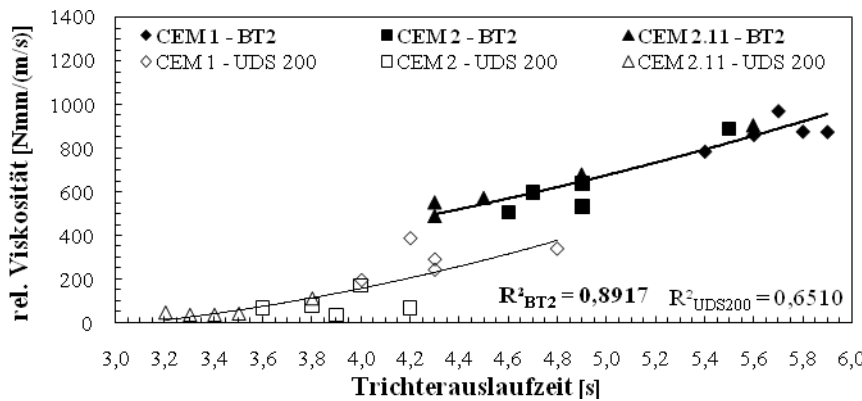
Um die beiden Messmethoden miteinander vergleichen zu können, werden aus den rheologischen Kennwerten der UDS 200-Messung Relativgrößen berechnet.

In **Abb. 8** sind die relativen Fließgrenzen in Abhängigkeit von den Setzfließmaßen aller untersuchten Mörtel dargestellt. Die Trendlinien der beiden Verfahren liegen weit voneinander entfernt. Die Tendenzen stimmen zwar überein, aber die Ordinate musste zum Vergleich logarithmisch eingeteilt werden. Die Messung mit dem BT2 ergaben um ca. zwei Zehnerpotenzen höhere relative Fließgrenzen als die Messungen mittels UDS 200. Ein Grund hierfür liegt in den wesentlich höheren Umfangsgeschwindigkeiten beim BT2. So treten beim BT2 Geschwindigkeiten von 0,01 m/s bis 0,14 m/s auf, während bei den UDS 200-Untersuchungen nur Geschwindigkeiten zwischen 0,0008 m/s und 0,0039 m/s vorliegen. Je größer die Geschwindigkeit ist, mit der ein Körper durch eine

Flüssigkeit bewegt wird, desto größer sind auch die auftretenden Schermomente. Dem entsprechend liegen auch die daraus berechneten relativen Fließgrenzen in einem höheren Bereich.



**Abb. 8:**  
Vergleich  
BT2 - UDS 200

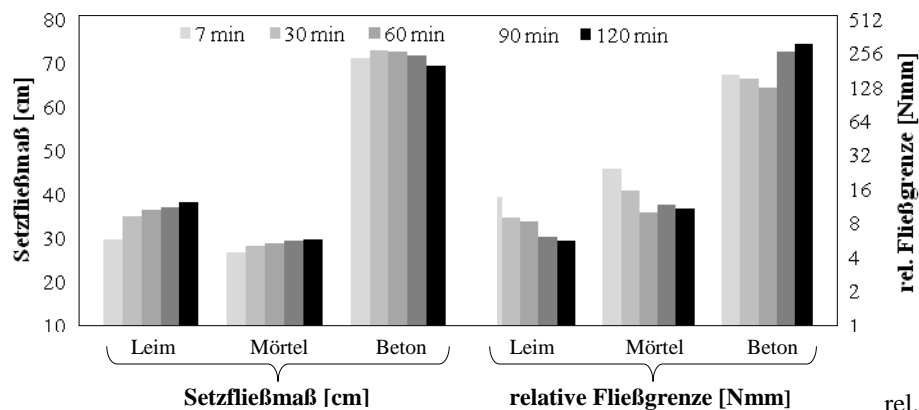


**Abb. 9:**  
Vergleich  
BT2 - UDS 200

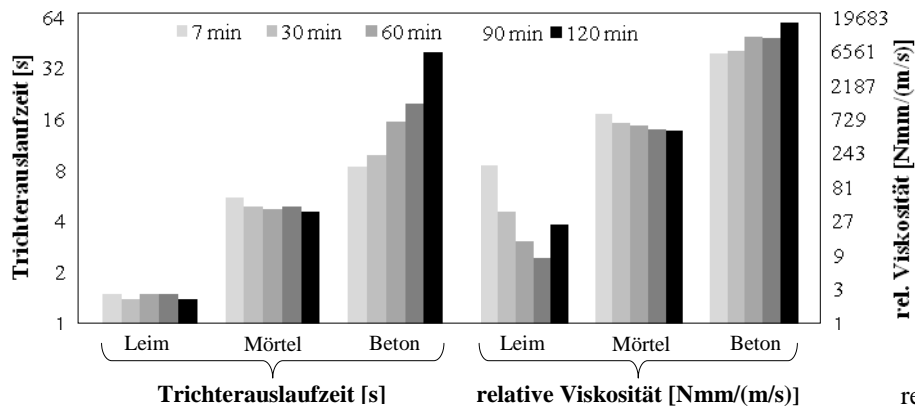
In **Abb. 9** sind die relativen Viskositäten im Bezug auf die Trichterauslaufzeiten aller getesteten Mörtel dargestellt. Es sind ebenfalls die gleichen Tendenzen der Trendlinienverläufe erkennbar. Der Abstand zwischen den beiden Messverfahren ist hier nicht mehr so groß wie bei den Kurven der relativen Fließgrenzen.

### 3.4 UNTERSUCHUNG AM LEIM, MÖRTEL UND BETON

In **Abb. 10** und **Abb. 11** sind die am BT2 gemessenen rheologischen Kennwerte aus den aufeinander aufbauenden Untersuchungen an einem Leim, Mörtel und Beton (die 3 Entwicklungsstufen eines SVB) graphisch dargestellt. Es erfolgt wiederum ein Ver-



**Abb. 10:**  
Vergleich  
Leim/Mörtel/Beton  
rel. Fließgrenze - SFM



**Abb. 11:**  
Vergleich  
Leim/Mörtel/Beton  
rel. Viskosität - TAZ

gleich der Setzfließmaße mit den relativen Fließgrenzen und der Trichterauslaufzeiten mit den relativen Viskositäten. Der Leim war flüssiger als der Mörtel. Dementsprechend wurden beim Leim höhere Setzfließmaße und niedrigere Trichterauslaufzeiten als beim Mörtel gemessen. Die aufgezeichneten Kennwerte aus den BT2-Messungen spiegeln dies sehr gut wieder. Da ein größerer Kegelstumpf zur Bestimmung der Setzfließmaße des Betons verwendet wurde, liegen diese viel höher als beim Mörtel. Auch die anderen Kennwerte (rel. Fließgrenze, rel. Viskosität und Trichterauslaufzeit) sind bei dem Beton wesentlich höher als beim Mörtel und Leim (logarithmische Skalierung). Die Betonkennwerte zur Bestimmung des Rückstifverhaltens nach 30, 60, 90 und 120 min korrelieren wie bei den Leim- und Mörteluntersuchungen sehr gut miteinander.

#### 4 ZUSAMMENFASSUNG

Die rheologischen Eigenschaften der untersuchten Mörtel konnten mit beiden Messmethoden gut wiedergespiegelt werden. Während beim UDS 200 die Setzfließmaße mit den rel. Fließgrenzen besser korrelierten, stimmten die Trichterauslaufzeiten beim BT2 besser mit den rel. Viskositäten überein (siehe Abb. 8 + Abb. 9).

Bei den BT2-Untersuchungen konnte eine wesentliche Erhöhung aller rheologischen Kennwerte des Betons gegenüber dem Leim und dem Mörtel festgestellt werden.

#### Literatur

- /1/ **Tyrach, J.:** „Rheologische Charakterisierung von zementären Baustoffsystemen“; Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, April 2001.
- /2/ **Blask, O.:** „Zur Rheologie von polymermodifizierten Bindemittelleimen und Mörtelsystemen“; Dissertation, Uni Essen (GH), Fachbereich 8, Juni 2002.
- /3/ **Schleibinger:** „Handbuch Frischbetonrheometer BT2“; Schleibinger Geräte Teubert und Greim GmbH, Buchbach 2002.
- /4/ **DafStb:** „Sachstandsbericht Selbstverdichtender Beton (SVB)“; Heft 516, Beuth-Verlag GmbH, Berlin 2001.

#### Autoren

Prof. Dr.-Ing. Danièle Waldmann (e-mail: [daniele.waldmann@uni.lu](mailto:daniele.waldmann@uni.lu))  
 Prof. Dr.-Ing. Manfred Greger (e-mail: [manfred.greger@uni.lu](mailto:manfred.greger@uni.lu))  
 Dipl.-Ing. Sandro Weisheit (e-mail: [sandro.weisheit@uni.lu](mailto:sandro.weisheit@uni.lu))

Universität Luxemburg - Campus Kirchberg  
 Fakultät für Naturwissenschaften, Technologie und Kommunikation  
 6, rue Richard Coudenhove-Kalergi, L-1359 Luxemburg