

Verfahren zur Ermittlung der rheologischen Eigenschaften zementbasierter Injektionssuspensionen

A. Kainrath¹, D. Adam¹, H. Krenn²

¹ Institut für Geotechnik, Technische Universität Wien, Österreich

² ZÜBLIN Spezialtiefbau Ges.m.b.H., Wien, Österreich

Kurzfassung. Zementbasierte Suspensionen zählen zu den in der Injektionstechnik am häufigsten verwendeten Injektionsmitteln. Dabei kommen in der Regel Normzemente oder Mischbinder unter Verwendung spezieller Beimischungen (Tone, Verflüssiger u.dgl.) zum Einsatz. Speziell bei den in der Injektionstechnik benötigten hohen Wasser-Zementwerten ($> 0,8$) verändern sich die Eigenschaften der Suspension sowohl im flüssigen als auch im festen Zustand in Abhängigkeit einer Vielzahl von teilweise nicht kontrollierbaren Faktoren (Zementhersteller, Mahlfeinheit, Zusatzstoffe im Zement, Dispergierungsgrad). Zur Vermeidung von Fehlschlägen und zur Auswahl einer an den Boden bzw. das Kluftsystem angepassten Injektionsmischung ist eine Eignungsprüfung und Optimierung des Injektionsgutes unumgänglich. Dabei ist speziell Augenmerk auf die Bestimmung der wichtigsten rheologischen Eigenschaften der Injektionssuspensionen zu legen. Anhand dieser Eigenschaften können grundlegende Aussagen über die Eignung (Penetrierbarkeit, Reichweite, Fließverhalten) des Injektionsgutes für die Injektionsmaßnahme getroffen werden. Derzeit erfolgt die Eignungsprüfung und Qualitätssicherung für Injektionssuspensionen anhand veralteter und teils ungenauer Verfahren (Marsh-Trichter, Kugelharfe, Vicat-Nadel). In dem Beitrag wird im Speziellen auf neue Verfahren zur Bestimmung der Fließgrenze und des Erstarrungsbeginns eingegangen. Neben einer detaillierten Verfahrensbeschreibung und Anführung der Einflussfaktoren und Randbedingungen auf die Prüfung, werden die Ergebnisse von Untersuchungen an typischen Injektionssuspensionen diskutiert.

Schlagwörter: Injektion; Zementsuspension; Rheologie, Qualitätssicherung, Prüfung

1 EINLEITUNG

Bei Injektionen im Allgemeinen handelt es sich um ein Bauverfahren, bei dem der Erfolg und das Ergebnis stark vom verwendeten Injektionsgut abhängig sind. Speziell im Bereich der Zementinjektionen, dem am häufigsten verwendeten Injektionsgut, gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Materialien und Zementen mit jeweils unterschiedlichen Eigenschaften. Zemente sind mittlerweile High-Tech Produkte, deren genaue Inhaltsstoffe nur dem Hersteller bekannt sind und deren Zusammensetzung produktions- und herstellerabhängig schwankt. Somit ist jede Zementart im Grunde ein Unikat. Die Zementnorm EN196 regelt die Anforderungen, die an die jeweilige Normzementart gesetzt werden, begründet auf eine Normsand-Zementmischung und Wasser-Bindemittelwert von 0,5. In der Injektionstechnik werden jedoch meistens reine Suspensionen verwendet, deren Wasser-Bindemittelwerte deutlich höher im Bereich von 0,8 – 2 liegen. Speziell bei diesen hohen Wasser-Bindemittelwerten sind die physikalischen und rheologischen Eigenschaften der Zementsuspensionen sehr ausgeprägt. Somit ist es besonders wichtig, die physikalischen und rheologischen Eigenschaften der verwendeten Suspensionen zu kennen, um eine Eignung für die jeweilige Anwendung bestimmen zu können.

2 BESTIMMUNG DER RHEOLOGISCHEN EIGENSCHAFTEN VON SUSPENSIONEN

2.1 Auswahlkriterien und Anforderungen an die Suspension

Injektionen sind ein Bauverfahren, das seit jeher sehr stark durch Erfahrungswerte und empirische Erkenntnisse gekennzeichnet ist. Speziell die Auswahl und die Anpassung des zu injizierenden Mediums an die Injektionsaufgabe stellt in Anbetracht der Vielzahl an Zusatzstoffen und Zusatzmitteln keine Routineaufgabe dar, sondern erfordert Prüfmethoden und Verfahren, die die physikalischen Eigenschaften des Injektionsgutes aussagekräftig abbilden. Grundsätzlich können für die meisten Anwendungen folgende Auswahlkriterien festgelegt werden:

- Dichte
- Stabilität
 - Sedimentationsstabilität
 - Filtratwasserabgabe
 - Stabilität gegenüber Auswaschen
- Fließverhalten/Rheologie
 - Fließgrenze
 - Viskosität
 - Thixotropie
- Festigkeit/Festigkeitsentwicklung
 - Erstarrungsbeginn
 - Frühfestigkeit
 - Endfestigkeit
- Beständigkeit
 - Stabilität gegenüber chemischen Angriffen
 - Erosionsstabilität
 - Dauerhaftigkeit

2.2 Ablaufschema zur Auswahl

Die Auswahl eines geeigneten Injektionsmittels kann nicht allgemein anhand einiger Grundsätze festgelegt werden, sondern steht immer im Kontext zwischen dem Projektziel, den Anforderungen und den Eigenschaften des Materials. Somit ist die Anpassung des Injektionsgutes immer ein iterativer Prozess, bei dem erst im Zuge der Prüfung eine Optimierung stattfinden kann. Dabei spielt die Materialauswahl, die Dosierung von Zusatzmitteln (Stabilisierer, Verflüssiger u.dgl.) eine große Rolle. Abbildung 1 zeigt den typischen Prozess zur Auswahl und Anpassung des Injektionsgutes an das Injektionsziel und die Anforderungen.

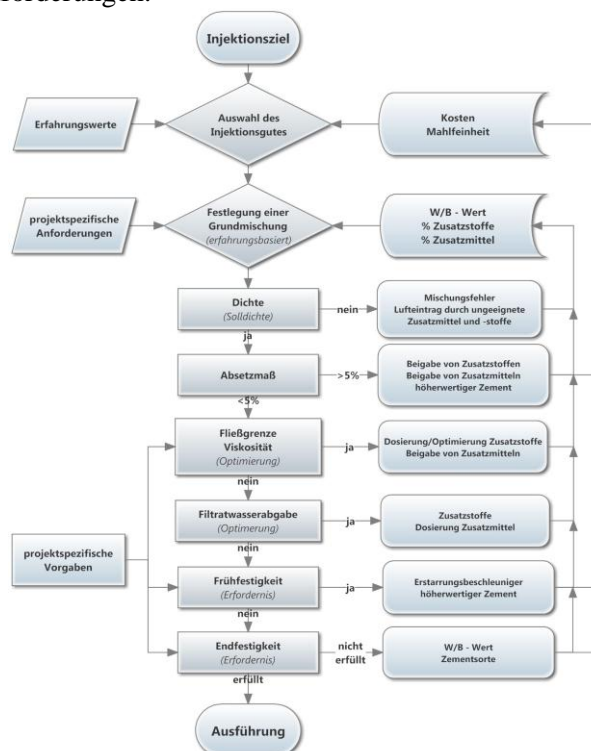


Abbildung 1. Auswahl und Anpassung von Injektionsgut an das Injektionsziel

2.3 Rheologische Eigenschaften (zementbasierter) Suspensionen

Bei Suspensionen handelt es sich um Stoffgemische mit darin fein verteilten Feststoffen (Zement, Ton, Füllstoffe), die über mechanische Beanspruchung in der Flüssigkeit aufgeschlämmt werden. Anzahl, Größe, Benetzung, Wasseraufnahmefähigkeit und Verteilung dieser aufgeschlämmten Partikel entscheiden maßgeblich über das Fließverhalten der Suspension. Suspensionen verfügen im Gegensatz zu Newton'schen Flüssigkeiten (z.B. Wasser) über eine Fließgrenze und weisen ein strukturviskoses (scherverdünnendes) Verhalten auf. Alle diese Eigenschaften sind in Abhängigkeit der aufgeschlämmten Stoffe unterschiedlich ausgeprägt, beeinflussen jedoch den individuellen „Charakter“ und das Verhalten der Mischung. Die Viskosität gilt als Maß für die Zähigkeit eines Stoffes. Kommt es zum Fließen eines Stoffes, so werden Moleküle gegeneinander verschoben und es treten innere Reibungskräfte auf, deren Größe durch die Viskosität beziffert wird. Ist die Viskosität unabhängig von der mechanischen Belastung (Schergefälle) auf das Fluid, so spricht man von Newton'schen Fluiden. Wasser ist ein typischer Hauptvertreter eines solchen Fluides. Weitaus häufiger kommen jedoch nicht-Newton'sche Fluide vor. Bei diesen Fluiden verändert sich die Viskosität des Fluides in Abhängigkeit von der mechanischen Beanspruchung. D.h. mit zunehmender mechanischer Beanspruchung sinkt oder steigt die Viskosität an. Man spricht hier von einer scheinbaren Viskosität η' , da die Viskosität von der mechanischen Beanspruchung auf das Fluid abhängt. Suspensionen haben zudem, im Gegensatz zu Newton'schen Fluiden eine Fließgrenze, was bedeutet, dass erst eine Schubspannung τ_0 überschritten werden muss, um Fließen einzuleiten. Unter dieser Grenze verhält sich das Fluid wie ein Feststoff, darüber wie eine Flüssigkeit.

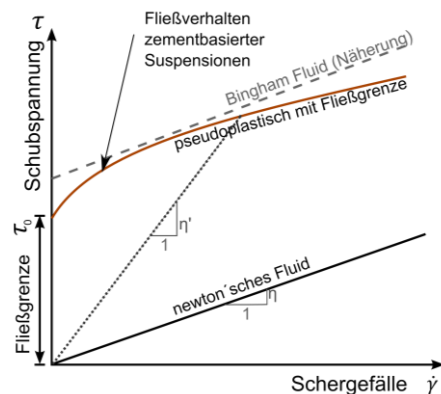


Abbildung 2. Fließverhalten von Suspensionen.

2.4 Verfahren zur Ermittlung der Fließgrenze zementbasierter Injektionssuspensionen mittels Messflügel

Die Ermittlung der Fließgrenze in der Injektionstechnik erfolgt bis dato in der Regel anhand der Kugelharfe, welche im Bereich der Schlitzwandtechnologie zur Prüfung dickflüssiger Bentonitsuspensionen eingesetzt wird. Die Anwendung der Kugelharfe für Injektionssuspensionen, insbesondere wenn mit Zusatzstoffen und Zusatzmitteln gearbeitet wird, ist durchwegs problematisch. Einerseits liegen die Werte der Kugelharfe deutlich höher als die tatsächliche Fließgrenze, andererseits kann es zufolge Sedimentation und Thixotropie zu sehr starken Streuungen im Ergebnis kommen. Speziell für die Auswahl und Dosierung von Zusatzstoffen sind die Ergebnisse ungenau und nur bedingt brauchbar. Das von Lombardi entworfene Plattenkohäsionsmeter sowie das Kasurometer bieten ebenfalls keinen praxistauglichen Ersatz zur einfachen und genauen Ermittlung der Fließgrenze. Am Institut für Geotechnik an der Technischen Universität Wien wurden daher, angelehnt an die Fließgrenzenprüfung bei Lebensmitteln, Versuche zur Bestimmung der Fließgrenze anhand eines Messflügels durchgeführt. Dieses in der Lebensmitteltechnologie erfolgreich eingesetzte Prüfverfahren hat sich auch im Zuge der Prüfung unterschiedlichster Injektionssuspensionen bewährt. Bei dem Verfahren zur Ermittlung der Fließgrenze mittels Messflügel wird ein 6-flügeliger Messflügel an einem Viskosimeter befestigt und unter geringer Umdrehungsgeschwindigkeit in der Suspension gedreht. Dabei wird laufend das zur Aufrechterhaltung der vorgegebenen Umdrehungsgeschwindigkeit benötigte Drehmoment aufgezeichnet.

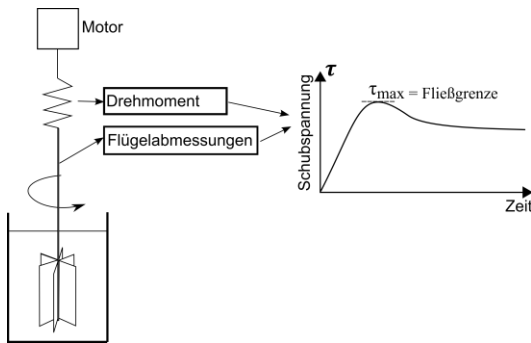


Abbildung 3. Systemprinzip der Fließgrenzenbestimmung mittels Messflügel.

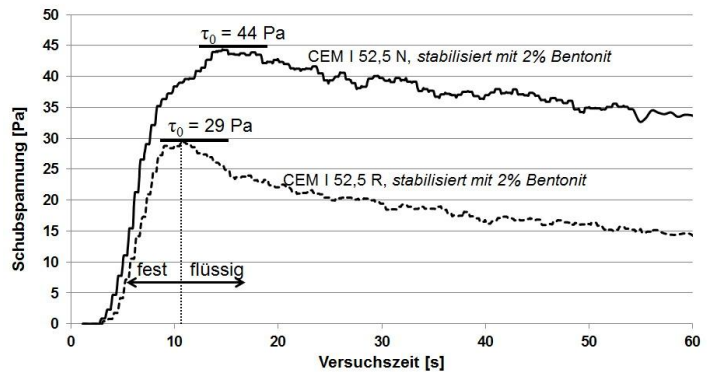


Abbildung 4. Zeit-Schubspannungsdiagramm zur Ermittlung der Fließgrenze.

Anhand der Flügelabmessungen und des aufgezeichneten Drehmomentes kann die auf das Fluid aufgebrauchte Schubspannung gemäß Formel (1) errechnet werden. Abbildung 3 zeigt ein typisches Messdiagramm von zwei unterschiedlichen Zementsuspensionen. Der Maximalwert der Schubspannung stellt den Übergang vom Ruhezustand zum Fließen dar. Die für die Überwindung des Ruhezustandes benötigte Schubspannung (Peak-Schubspannung) wird dabei als Wert für die Fließgrenze herangezogen.

$$\tau = \left(\frac{2 \cdot M}{\pi \cdot d^3} \right) \cdot \left(\frac{h}{d} + \frac{1}{3} \right)^{-1} \quad (1)$$

mit

M = gemessenes Drehmoment [Nm]

d = Flügeldurchmesser [m]

h = Flügelhöhe [m]

τ = Schubspannung [Pa]

τ₀ = Fließgrenze / Peak-Schubspannung [Pa]

Im Zuge der am Institut für Geotechnik durchgeführten Versuche wurde ein Viskosimeter VT-550 der Firma HAAKE verwendet. Über ein Kardangelenke wurde ein 6-flügeliger Messflügel (FL10) derselben Firma mit den Abmessungen D/H = 40/60 mm angeschlossen. Aufgrund der großen Oberfläche des Messflügels wurde speziell bei dünnflüssigen Suspensionen mit einer Fließgrenze unter 10 Pa eine sehr hohe Messgenauigkeit erzielt. Selbst Fließgrenzen unter 2 Pa konnten sehr genau erfasst werden. Um vergleichbare und präzise Ergebnisse zu erzielen, sollte bei der Versuchsdurchführung auf die Einhaltung konstanter Randbedingungen geachtet werden. Mischreihenfolge, Anmachtemperatur, Mischzeit und die Umgebungstemperatur beeinflussen die Messergebnisse, was speziell bei vergleichenden Untersuchungen durchaus von Relevanz ist.

Für die Versuchsdurchführung selbst bietet es sich an, ein softwaregesteuertes Viskosimeter mit automatischer Datenaufzeichnung zu verwenden. Der am Viskosimeter befestigte Messflügel wird langsam in die vorbereitete und zuvor aufgemischte Suspension eingetaucht. Dabei ist es von besonderer Bedeutung, dass nach Eintauchen des Messflügels zirka 20 Sekunden gewartet wird, um allfällige Verspannungen des Flügels in der Suspension abzubauen. Danach wird der Messflügel mit einer Scherrate von 0,02 1/s bzw. 0,911 Umdrehungen pro Minute für 60 Sekunden lang betrieben und

kontinuierlich das benötigte Drehmoment mittels zugehöriger Messsoftware aufgezeichnet. Als Messintervall hat sich im Zuge der Vielzahl an durchgeführten Untersuchungen eine Aufzeichnungsrate von 20 Messwerten pro Sekunde bewährt. Anhand der Flügelabmessungen können aus dem Maximalwert des gemessenen Drehmomentes die zugehörige Schubspannung, welche die Fließgrenze darstellt, ermittelt werden. In der Regel erfolgt dieser Schritt bei Eingabe des Messflügeltyps in die Software bereits automatisch, so dass der Maximalwert der Schubspannung nur mehr aus dem Diagramm abgelesen werden muss.

Abbildung 5 zeigt die Fließgrenze einer Vielzahl am Markt üblicher Normzemente. Es zeigt sich dabei ein deutlicher Unterschied in Abhängigkeit der verwendeten Zementsorte. Selbst bei gleicher Zementsorte variiert die Fließgrenze in Abhängigkeit der verwendeten Produktions-Charge und des Herstellers. Diese Abweichungen begründen sich in den, gemäß Norm zulässigen Schwankungsbreiten, der vom Zementhersteller verwendeten Zumahlstoffe aber auch in der unterschiedlichen Mahlfeinheit zwischen den Zementwerken.

Anhand des gewählten Zementes und der für die Injektionsmaßnahme beigemischten Zusatzstoffe (i.d.R. Tonminerale, Steinmehle u.dgl.) kann die Fließgrenze der Suspension gut gesteuert und die Reichweite, Penetrierbarkeit und das Ausbreitverhalten im Boden bzw. Kluftsystem verbessert werden.

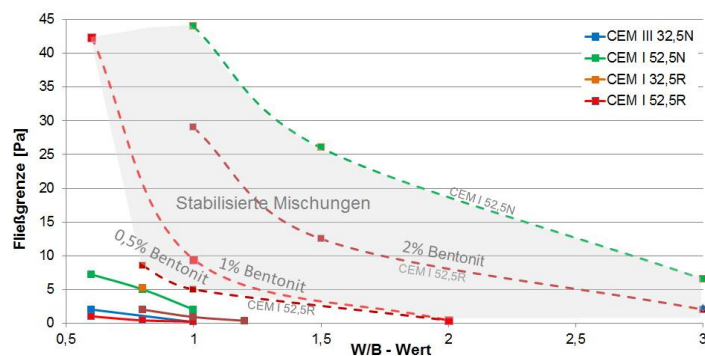


Abbildung 5. Fließgrenzen unterschiedlicher Injektionssuspensionen mit und ohne Bentonitstabilisierung.

2.5 Verfahren zur Ermittlung des Erstarrungsbeginns an Injektionssuspensionen mittels Messflügel

Der Erstarrungsbeginn zementbasierter Injektionssuspensionen stellt ein wesentliches Verarbeitungskriterium im Bereich der Injektionstechnik dar. Insbesondere die Beimischung von Additiven (Beschleuniger, Verflüssiger u. dgl.) kann den Erhärtungsverlauf zementbasierter Suspensionen stark verändern. Aus diesem Grund ist die Kenntnis über den Zeitpunkt des Erstarrungsbeginns von Relevanz. In der Betontechnik wird nach EN 196-3 der Erstarrungsbeginn über die Eindringtiefe einer Nadel (Vicatnadel) ermittelt. Der Erstarrungsbeginn ist somit in der Betontechnik nicht über den Grad der Gefügeentwicklung, sondern über die Eindringtiefe einer genormten Nadel definiert. Aufgrund der im Allgemeinen geringen Viskosität der in der Injektionstechnik verwendeten Suspensionen ist diese Versuchsdurchführung nur bedingt bis überhaupt nicht geeignet. Am Institut für Geotechnik an der Technischen Universität Wien wurde der Ansatz weiterverfolgt, den Erstarrungsbeginn über die Scherfestigkeit zu ermitteln. Da die Ermittlung der Scherfestigkeit der erhärtenden Suspension mittels Laborflügelsonde in Vorversuchen gut funktionierte, die Versuchsdurchführung jedoch relativ umständlich war und der Erstarrungsbeginn nicht hinreichend genau erfasst werden konnte, wurde versucht, das mit einem Messflügel bestückte Viskosimeter zur Bestimmung des Erstarrungsbeginns heranzuziehen. Das Systemprinzip entspricht im Wesentlichen dem Verfahren zur Bestimmung der Fließgrenze (Abbildung 3). Wesentlicher Unterschied ist jedoch, dass die Scherung zeitlich intermittierend bei äußerst geringen Umdrehungsgeschwindigkeiten aufgebracht wird. Durch die geringe Deformation und die kurze

Scherdauer (10 Sekunden) kommt es daher nur zu elastischen Verformungen und zu keiner Störung der Struktur der erhärtenden Suspension. Der zeitliche Verlauf der Fließgrenze bzw. der Scherfestigkeit der erhärtenden Suspension kann anhand dieses Versuchs vollständig automatisch und zuverlässig bestimmt werden. Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen zur Bestimmung des Erstarrungsbeginns an unterschiedlichen Injektionssuspensionen.

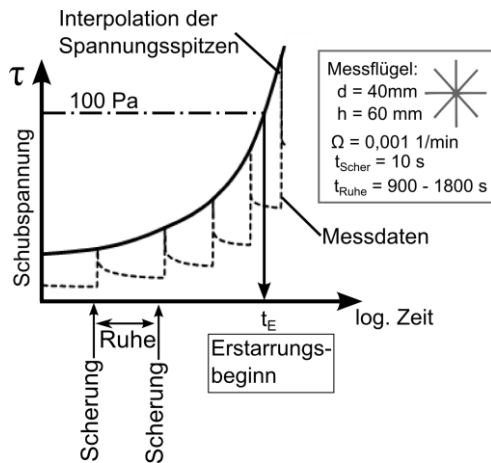


Abbildung 6. Prinzip zur Ermittlung des Erstarrungsbeginns zementbasierter Injektionssuspensionen

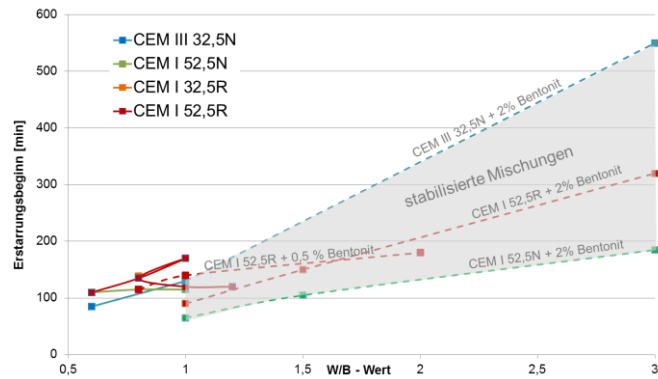


Abbildung 7. Erstarrungsbeginn unterschiedlicher Normzementsuspensionen in Abhängigkeit des Wasser-Bindemittelwertes

3 ZUSAMMENFASSUNG

Die Auswahl und Prüfung zementbasierter Suspensionen für Injektionsmaßnahmen bedarf speziellen Wissens, um das Injektionsgut an die Anforderungen des Projektes (Reichweiten, Festigkeit...) und die vorhandenen Randbedingungen (Drücke, Poren/Kluftsystem, Grundwasserverhältnisse...) anzupassen. Um jedoch unterschiedliche Injektionsmischungen zu parametrisieren, benötigt es genauer aber auch praxistauglicher Prüfmethoden und Verfahren, um vergleichbare Suspensionskennwerte zu generieren. Die im Beitrag vorgestellten Verfahren ermöglichen eine einfache und reproduzierbare Bestimmung der Fließgrenze und des Erstarrungsbeginnes bei zementbasierten Suspensionen.

DANKSAGUNG

Die im Beitrag vorgestellten Ergebnisse und Prüfverfahren entstanden im Rahmen eines Forschungsprojektes in Kooperation mit der Firma ZÜBLIN Spezialtiefbau Ges.m.b.H. mit Fördermitteln der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG). Der Autor möchte dem gesamten Projektteam für die gute Zusammenarbeit danken.

LITERATUR

- Kainrath A., Krenn H., Adam D. (2012). Die Injektionstechnik auf dem Prüfstand. 2. Symposium Baugrundverbesserung in der Geotechnik, Wien: 295 – 297.
- Kainrath A. (2013). New Evaluation Methods for Grouts. In: Proc. 5th International Young Geotechnical Engineers Conference, Paris.
- Steffe, J. F. (1992). Rheological Methods in Food Process Engineering. Freeman Press, East Lansing, MI.