

Untersuchungen zur zeitlichen Viskositätsentwicklung von Acrylatgelen und Berechnungen zum Einfluss der Viskosität auf die Ausbreitung im Lockergestein

M.Sc. J. Braun ^{1), 2)}, Prof. Dr.-Ing. Ulrich Trunk ¹⁾,

¹⁾ Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz ²⁾ Ruhr-Universität, Bochum

Zur Abschätzung der erzielbaren Injektionsreichweite bei Lockergesteinsinjektionen mittels Acrylatgelen wurden Laborversuche zur Bestimmung der zeitlichen Viskositätsentwicklung von zwei Acrylatgelen mit unterschiedlichem Aufbau, Zusammensetzung und Gelierungsverhalten durchgeführt. Für die Laborversuche an den beiden Acrylatgelen wurde ein Rotationsviskosimeter (Kegel-Platte-System) mit Zirkulationskühlsystem verwendet. Hierbei wurden die Einflüsse aus unterschiedlichen Materialtemperaturen und Scherraten bei verschiedenen Reaktionszeiten auf die Viskositätsentwicklung untersucht. Die Ergebnisse zeigen deutliche Einflüsse von Geltemperatur und Scherrate auf die zeitliche Viskositätsentwicklung. Seitens Hersteller und Anwender wird ein möglicher Einfluss des Injektionsdrucks auf den Viskositätsverlauf angeführt, ohne hierzu Untersuchungsergebnisse vorzulegen. Der Einfluss des Injektionsdrucks auf den Viskositätsverlauf wurde mittels einer im Rotationsviskosimeter implementierten Druckzelle untersucht.

Für die Berechnungen zur Ausbreitung von chemischen Injektionsmitteln oder Fluiden mit zeitabhängiger Viskosität im Lockergestein werden Berechnungsansätze aufgezeigt, modifiziert und angewendet. Mit diesen Ansätzen werden Berechnungen mit frei wählbaren Injektionsparametern unter Berücksichtigung der zeitabhängigen Viskositätsentwicklung zu Ausbreitung, Reichweite und wirksamem Injektionsdruck durchgeführt. Zusätzlich wird der Einfluss der zeitlichen Viskositätsverläufe der untersuchten Acrylatgele auf den Injektionsverlauf und die erzielbare Reichweite verglichen und dargestellt.

1 Einleitung

Neben Suspensionen auf Basis mineralischer Bindemittel (z.B. Zementsuspensionen) erfahren chemische Injektionsmittel, wie Bio-Weichgele und Acrylatgele oder Polyacrylat-Injektionsharze mit ihren hervorragenden Fließeigenschaften für unterschiedliche Einsatzzwecke im Locker- und Festgestein immer mehr Bedeutung. Hierbei können die rheologischen Eigenschaften von Suspensionen mit mineralischen Bindemitteln als Bingham'sche oder thixotrope Flüssigkeiten und chemische Injektionsmittel (hier Acrylatgele) als Quasi-Newton'sche Fluide beschrieben werden. Für die Planung von erfolgreichen Injektionsmaßnahmen sind Informationen zu Materialparametern wie der dynamischen Viskosität und deren zeitlicher Verlauf von großem Interesse. Diese Parameter sind maßgebend für die mit dem Injektionsmittel erzielbare Penetration oder Reichweite.

2 Laboruntersuchungen zur Materialrheologie von Acrylatgelen

Die „Reaktionszeit“ und somit das Aushärten bzw. Gelieren eines Acrylatgels als Injektionsmaterial lässt sich je nach Material und Hersteller mittels

Menge der einzelnen Komponenten oder Zugabe von Beschleunigern oder Verzögerern beeinflussen. Einige Hersteller geben hierfür in den technischen Datenblättern oder Mischanleitungen Informationen zu Reaktions- oder Topfzeiten an. Diese Werte sind meist als Richtwerte aus eigenen Laborversuchen und teilweise ohne weitere Angaben zur Messgeometrie der Versuchsgeräte wie Rotationsviskosimeter und Versuchsdurchführung zu verstehen.

Neben der chemischen Zusammensetzung bzw. des pH-Wertes des Wassers, welches bei nicht polymerverstärkten Gelen den Hauptbestandteil der B-Komponente ausmacht, führen unter anderem Temperaturänderungen der Komponenten, als auch mechanische Eingriffe beim Anmischen unvermeidlich zu zeitlich voneinander abweichenden Viskositätsverläufen. So lässt sich beispielsweise die Reaktionszeit des Injektionsmittels durch herunterkühlen des Wassers der B-Komponente zeitlich verzögern.

Um einen besseren Eindruck und die Größenordnungen der einzelnen Einflüsse, auch unter Laborbedingungen und bei Untersuchungen zur Rheologie der Materialien zu gewinnen, wurden die zeitabhängigen Viskositätsentwicklungen von Acrylatgelen mit Hilfe eines Rotationsviskosimeters RheoStress 600 der

Firma Thermo Fischer Scientific (Kegel-Platte-System) untersucht (siehe Abbildung 2-1, hier mit montierter Druckzelle). Bei dem Gerät handelt es sich um ein modulares Rheometer mit Diffusionsluftlager zur Messung von viskosen und viskoelastischen Eigenschaften von Fluiden. Für die Temperierung der zu untersuchenden Materialien ist das Gerät mit einer Peltier-Temperierung ausgestattet, wobei ein externer Zirkulationswärmetauscher Phoenix II P1-C25P des gleichen Herstellers zum Einsatz kommt.

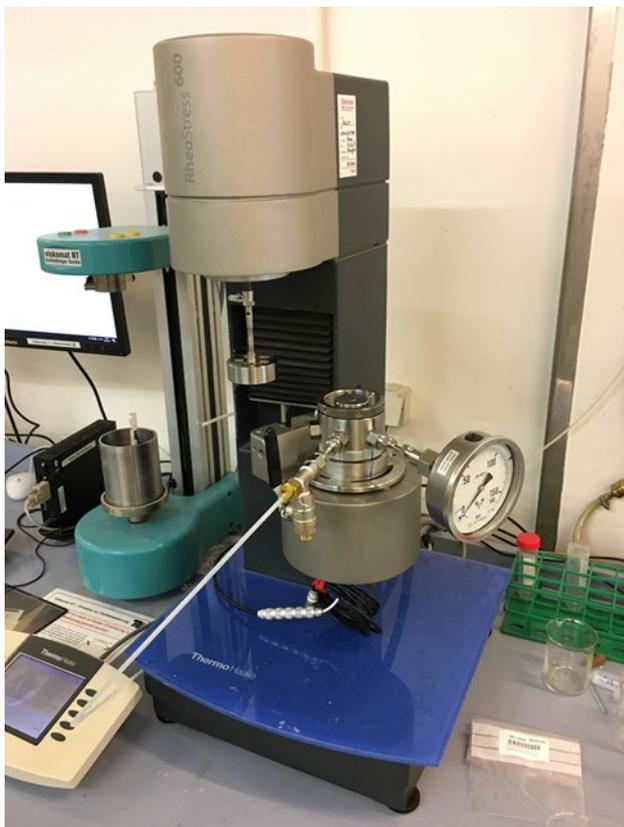


Abbildung 2-1: Rotationsviskosimeter Thermo Fischer Scientific HAAKE RheoStress 600 mit montierter Druckzelle Typ 222-2284

Das System wurde für umfangreichere Versuchsreihen um eine Druckzelle Typ 222-2284 und ein leistungsfähigere Temperiereinheit (externer Zirkulationswärmetauscher Arctic A25) erweitert. Die Druckzelle ermöglicht Untersuchungen zum Einfluss von Druck auf die Viskosität und deren zeitliche Entwicklung.

Der Wärmetauscher bietet eine schnelle Temperierung des Kühlwassers und dementsprechenden Kühlung des im Wasserbad zwischengelagerten Injektionsmaterials. Die Druckzelle ist zudem mit einem Temperatursensor ausgestattet, mit dem die Temperatur des zu messenden Materials direkt in der Druckkammer mit hoher Genauigkeit bestimmt werden kann.

2.1 Versuchsdurchführung und verwendete Injektionsmittel

Im Rahmen der Laboruntersuchungen wurden Versuche an zwei Acrylatgelen (Material A und Material B) von unterschiedlichen Herstellern durchgeführt. Bei den untersuchten Materialien handelt es sich um mehrkomponentige Injektionsmittel auf Acrylatbasis. Sie bestehen aus poly- und monomeren Acrylaten sowie Methacrylaten. Acrylatmonomere bilden dabei mittels Verbindungen gesättigte Makromoleküle, wobei die Erhärtung bzw. Gelbildung durch eine radikalische Redox-Polymerisation erfolgt. Hierbei werden die Acrylatmonomere zu Kettenmolekülen verknüpft.

Die Komponenten setzen sich aus der Stamm- oder A-Komponente, zusätzlichen Additiven und einer B-Komponente mit Härter zusammen (Material A: A1, AII-Katalysator; Material B: A-Komponente mit Katalysator sowie flüssigem Beschleuniger oder Verzögerer). Die B-Komponente besteht hier, im Gegensatz zu polymerverstärkten Gelen, aus Leitungswasser und einem Härtersalz oder Initiator als Feststoff in Pulverform (BII-Komponente). Je nach Konzentration der BII-Komponente (Härterpulver) in der Mischung mit Wasser (Material A) bzw. Zugabe eines Verzögerers zur A-Komponente beim Material B, reagiert das „Hydrogel“ unterschiedlich schnell als flexibles Endprodukt aus (siehe Abbildung 2-2).

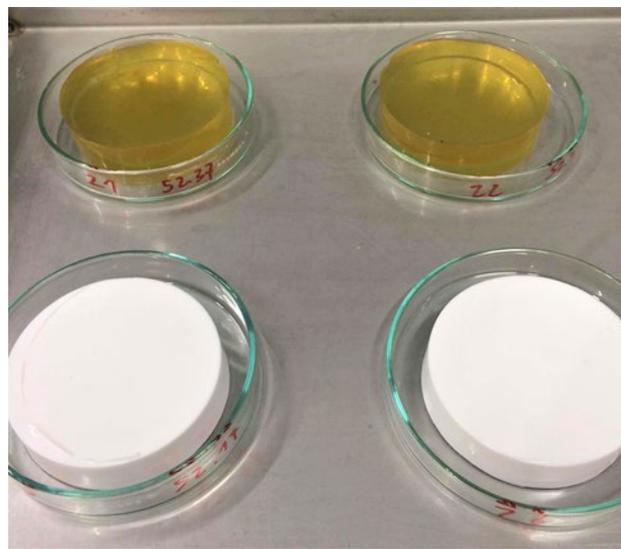


Abbildung 2-2: Untersuchte Injektionsmaterialien („gelierter“ Zustand) Material A (unten), Material B (oben)

Die Verarbeitung der einzelnen Komponenten wurde nach den technischen Datenblättern der Hersteller vorgenommen, wobei die anzumischenden Mengen gegenüber dem „Baustelleneinsatz“ für die Versuchsreihen entsprechend verringert wurden (bei Material A: 300 g gelöst in 20 Liter Wasser nach

Herstellerangaben entsprechen 0.3 g in 0.02 Liter Wasser - für Laborversuche verwendete Menge). Nach Vorbereitung und „Aktivierung“ der einzelnen Komponenten wurden die A- und B-Komponenten in einem Mischungsverhältnis von 1:1 (Volumenanteile) gemischt.

Für die Versuchsreihen wurde der Viskositätsverlauf bei unterschiedlichen BII-Konzentrationen für das Material A (70 g und 300 g Härterpulver gelöst in 20 Liter Wasser), Zugabe von flüssigem Verzögerer beim Material B, unterschiedliche Scherraten (100 1/s, 500 1/s) sowie unterschiedliche Temperaturen (12 °C, 15 °C, 20 °C) gemessen.

Um die Auswirkungen der Versuchsvorbereitung und den damit verbundenen möglichen Messfehlern sowie den Einfluss der erzielbaren Mischgenauigkeit bei Verwendung präziser Laborwaagen (Kühlung der Einzelkomponenten; Mischung der aktivierten Komponenten im Volumenverhältnis 1:1; Materialauftrag) auf die Messungen/Versuche möglichst gering zu halten, wurden die Einzelversuche nach einem zuvor in Voruntersuchungen bestimmten Versuchsablauf durchgeführt. Die Einzelkomponenten wurden zuvor im Wasserbad des Zirkulationskühlers auf die entsprechende Versuchstemperatur vorgekühlt. Aufgrund des zeitlich eingehaltenen Misch- und Versuchsvorbereitungsvorgangs (Mischung der einzelnen Komponenten in Reagenzbechern und Applikation des Injektionsmaterials mittels Automatikpipette auf die Messapparatur) wurden die Rotationsviskosimetermessungen jeweils nach ca. 2:30 min nach dem Vermischen der Komponenten gestartet. Alle Messungen wurden nach diesem Versuchskonzept durchgeführt. Aus diesem Grund sind in den Grafiken zu Beginn keine Messwerte dargestellt.

Die gemessenen Rohdaten/Versuchsdaten wurden mittels der Mess- und Auswertesoftware HAAKE RheoWin in eine xml-Datei umgewandelt und anschließend ausgewertet.

2.2 Einflüsse auf zeitliche Viskositätsentwicklung

Für eine erste Untersuchung des Einflusses der BII-Konzentration in der B-Komponente des Materials A sowie eines Verzögerers beim Material B auf die zeitabhängige Viskositätsentwicklung, und grundlegenden Unterschieden im Viskositätsverlauf zweier unterschiedlicher Acrylatgele, wurden Versuche bei unterschiedlichen Härterpulvermengen (70 und 300 g BII-Komponente bei Material A) bei 15 °C Materialtemperatur durchgeführt. Beim Material B wurde entsprechend den Herstellerangaben für eine Materialtemperatur von 15 °C und einer Reaktionszeit nach Mischtafel von 15 min ein flüssiger Verzögerer zur A-Komponente hinzugemischt.

Die Materialtemperatur wurde mit 15 °C gewählt, um einen möglichst langsamen Gelierungsprozess ohne Reduktion der BII-Komponente oder Hinzugabe eines Verzögerers zu erhalten.

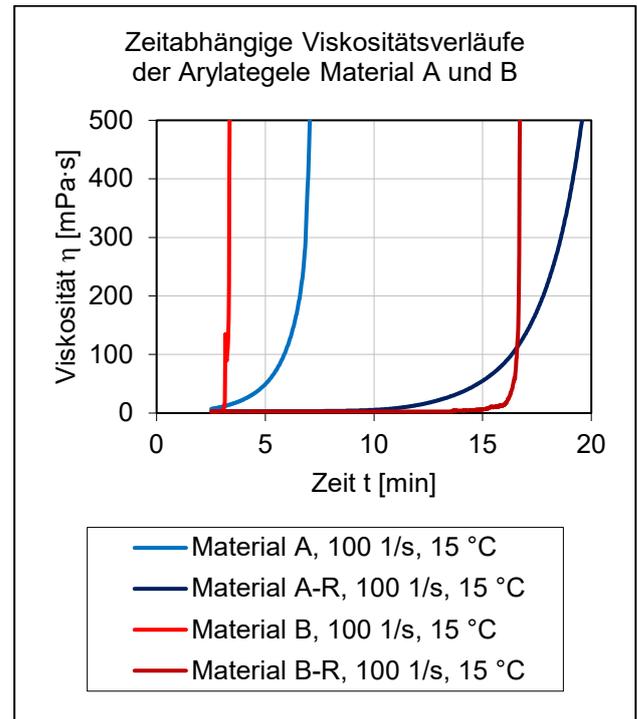


Abbildung 2-3: Gemessene zeitabhängige Viskositätsverläufe der untersuchten Injektionsmaterialien mit und ohne „verzögerter“ Reaktion bei einer Materialtemperatur von 15 °C und einer definierten Scherrate von 100 1/s

Die untersuchten Acrylatgele Material A und B zeigen in den Untersuchungsergebnissen zu den zeitabhängigen Viskositätsentwicklungen Unterschiede im Verlauf des Viskositätsanstiegs. Material B zeigt hier im Vergleich zu Material A bis zur Aushärtung bzw. Beginn der Gelbildung eine relativ konstante Mischviskosität von ca. 2.5-5 mPa·s. Der Gelierungsprozess erfolgt bei diesem Material im Vergleich zu Material A innerhalb von ca. 30 Sekunden ohne Verzögerer und bis ca. eine Minute bei zugemischtem Verzögerer für eine Reaktionszeit von ca. 15 min, ohne vorherigen messbaren Anstieg der Viskosität über den Anfangswert der Mischviskosität. Der Anstieg der Viskosität erfolgt hier sehr schnell, sodass je nach verwendeter Verzögerermenge der Viskositätsverlauf vereinfachend mit einem bilinearen Verlauf beschrieben werden kann, wie er z.B. dem Viskositätsverlauf von Acrylamid-Injektionsmitteln als Vorreiter der heutigen Acrylatgele ähnelt (siehe Abbildung 2-4).

Die unterschiedlichen Viskositätsverläufe sind neben weiteren Unterschieden zwischen den Materialien im ausreagierten Zustand, auf die verwendeten

Rohstoffe und die damit verbundene Polymerisation nach Mischung der Komponenten zurückzuführen. Aufgrund des sehr schnellen Gelierprozesses bei Material B kann man hier von einer Bildung von kurz-kettigen Polymerstrukturen ausgehen, wobei nach vollständiger Polymerisation ein flexibel ausgehärtetes Endprodukt entsteht.

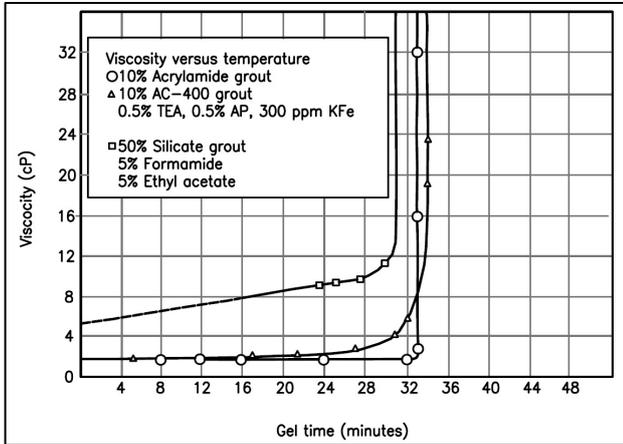


Abbildung 2-4: Darstellung unterschiedlicher zeitabhängiger Viskositätsverläufe von Acrylamid-, Acrylat- und Silikatgelen. Aus Powers et. al. (2007) nach Clarke (1982).

2.3 Thermische und mechanische Einflüsse

Wie auch bei anderen Injektionsmitteln bekannt (Bsp. Silikatgele), hängt die Reaktions- oder Gelzeit stark von der Materialtemperatur und somit auch von der Umgebungstemperatur oder Temperatur des zu injizierenden Körpers ab. Dies zeigte unter anderem Clarke (1982). Materialhersteller liefern hierzu z.T. Informationen in den technischen Datenblättern.

Die eigenen Messergebnisse zeigen eine Reduktion der Reaktionszeit von ca. 3 min bei einer Erhöhung der Materialtemperatur von ca. 8 °C bei Material A (Materialmischung nach Herstellerangaben). Es hat sich gezeigt, dass sich die Materialtemperatur auf die Reaktionszeit bei „verzögerten“ Acrylatgelen – Zugabe von Verzögerer zur A-Komponente oder Reduktion der BII-Komponente – teilweise stärker auswirkt. Bei einer Reduktion der BII-Komponente auf 70 g bei Material A führt eine Temperaturerhöhung von 12 °C auf 20 °C zu einer Reduktion der Reaktionszeit von ca. 8-9 min.

Eine Erhöhung der Scherrate als äußere Einwirkung wirkt sich auf die Reaktion der gemischten A- und B-Komponente und den damit verbundenen Gelierungsprozess verlangsamernd aus.

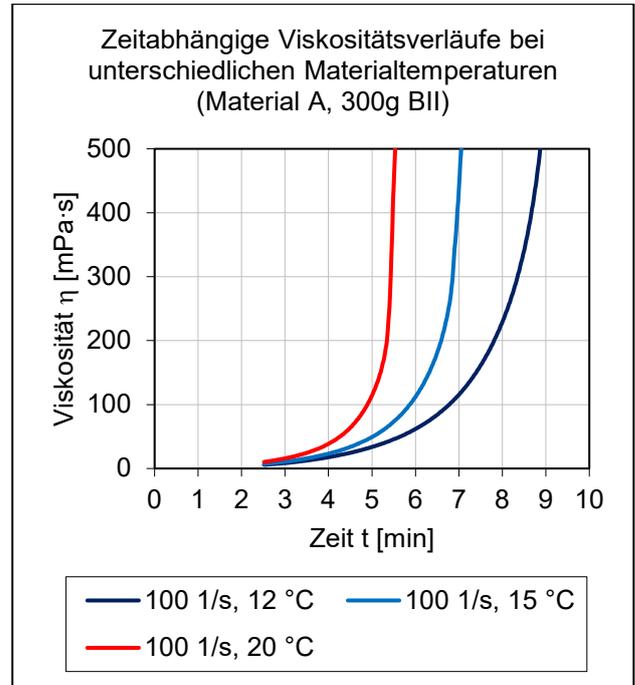


Abbildung 2-5: Gemessene zeitabhängige Viskositätsverläufe des Injektionsmaterials A bei unterschiedlichen Materialtemperaturen von 12 °C, 15 °C und 20 °C

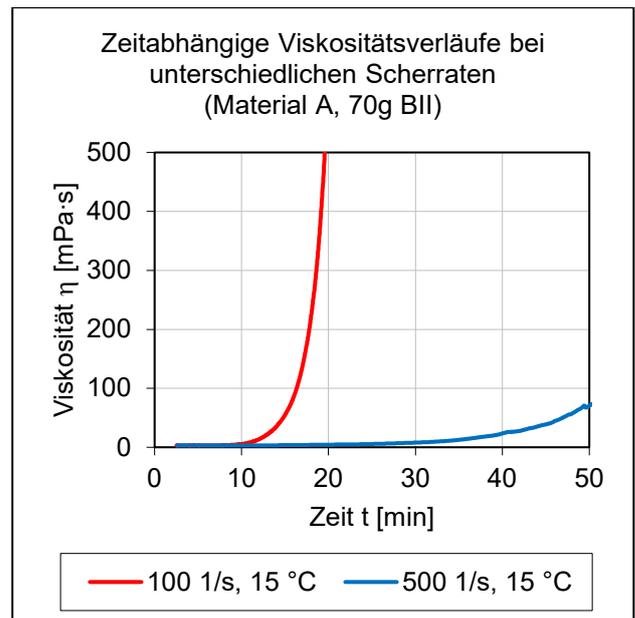


Abbildung 2-6: Gemessene zeitabhängige Viskositätsverläufe des Injektionsmaterials A mit reduzierter Menge der BII-Komponente und unterschiedlichen Scherraten von 100 1/s sowie 500 1/s bei einer Materialtemperatur von 15 °C

Bei einem langsamen Viskositätsanstieg aufgrund reduzierter BII-Komponente (Material A), kann es zu einem nicht gleichmäßigen Ausgelieren des Materials kommen. Die sich bei der Reaktion bildenden Polymerkettenstrukturen werden hierbei durch die

Rotation der Messapparatur im Rotationsviskosimeter wiederholend gestört und ein weiteres Anwachsen der Viskosität verhindert. Diese Beobachtung bezieht sich bei den Versuchen nur auf eine sehr kleine Materialmenge, welche für eine Messung im Kegel-Platte-System benötigt wird. Inwieweit diese Beobachtung bei insitu-Injektionen mittels verzögerten Acrylatgelen unter geringen Temperaturen auftritt, ist an größeren Injektionsmittelmengen mittels anderer Versuche zu analysieren.

2.4 Viskositätsverlauf unter Druck

Zusätzlich zu den durchgeführten Rotationsviskosimetermessungen zur Untersuchung der Einflüsse aus Temperatur und Scherrate bei Messungen mittels Kegel-Platte-System, wurde der zeitliche Viskositätsverlauf in einem Drucktopf bei 10 bar Luftdruckbeaufschlagung (angeschlossene Druckluftflasche inkl. Manometer) und einer Materialtemperatur von 12 °C für das Material A untersucht (70 g Härterpulver BII; Scherrate 300 1/s).

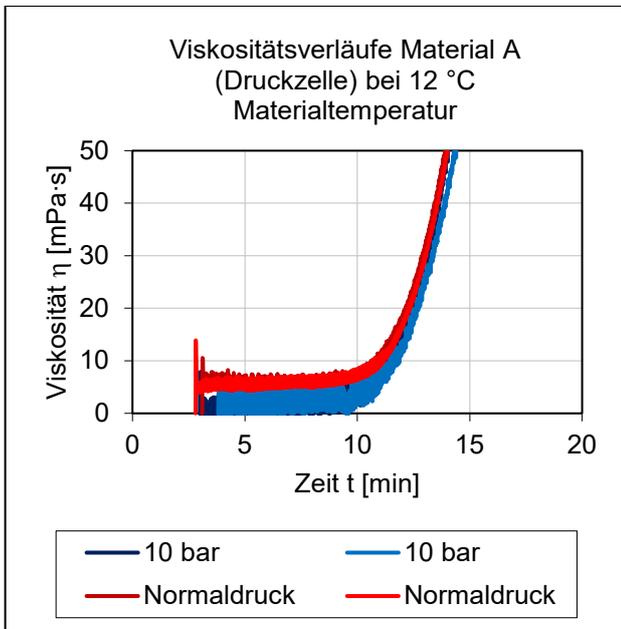


Abbildung 2-7: Gemessene zeitabhängige Viskositätsverläufe bei 10 bar Druckbeaufschlagung mittels Druckluft und unter atmosphärischem Druck (jeweils zwei Messungen)

Die Versuchsergebnisse der Laborversuche zur zeitlichen Viskositätsentwicklung unter Druck zeigen zunächst keinen direkten Einfluss des beaufschlagten Drucks auf den Gelierprozess des Materials. Aufgrund der Messgeometrie (Zylinder) können die Ergebnisse nicht direkt mit den Ergebnissen der Messungen mittels Kegel-Platte-System verglichen werden, jedoch lassen sich die Viskositätsverläufe auch unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Messgeometrie klar und eindeutig bewerten.

Das untersuchte Material A zeigt unter Druck von 10 bar nur eine erwartbare leicht geringere Mischviskosität von ca. 2 bis 4 mPas im Vergleich zur Mischviskosität unter atmosphärischem Druck. Aufgrund von Messtoleranzen und minimalen Unterschieden bei der Versuchsdurchführung aufgrund des höheren Zeitaufwands bei der Montage der Druckzelle, ergeben sich zeitlich versetzte Viskositätskurvenverläufe.

Die kurzzeitigen Viskositätsschwankungen bei Messungen mit Drucktopf lassen sich auf die Einflüsse aus dem Messsystem und auf Reibung in Dichtungen der Zylinderdurchführungen zurückführen. Diese sind bei höheren Scherraten und höheren Drücken geringer. Man kann hier von einer oszillierenden Streuung um einen Mittelwert der Anfangsviskosität ausgehen. Dieser Mittelwert entspricht bei den Messungen unter 10 bar Druck ca. 2.5 mPas und unter atmosphärischem Druck ca. 6.5 mPas.

3 Ausbreitung von Acrylatgelen als Quasi-Newtonsche Fluide im Lockergestein

Um die Ausbreitung von Acrylatgelen als Injektionsmittel für Poreninjektionen in rolligen Böden zu beschreiben und zu berechnen, sind Kenntnisse über die Materialeigenschaften des gewählten Injektionsmittels wie z.B. die dynamische Mischviskosität, zeitabhängige Viskositätsentwicklung, Anhaftungsverhalten, chemische/physikalische Einflüsse sowie Kenntnisse über den zu injizierenden Bodenkörper oder die Bodenschicht wie z.B. Kornverteilung, hydraulische Durchlässigkeit, Porosität und Schichtdicke notwendig. Im Vergleich zu Kluffinjektionen sind die Fließvorgänge in homogenen rolligen Böden besser kalkulierbar.

Geht man bei einer Poreninjektion von einer Punktquelle aus, bei der sich ein Newtonsches Fluid radial gleichmäßig im rolligen Boden ausbreitet und sich ein kugelförmiger Injektionskörper ausbildet, so lässt sich mit Hilfe der Förderrate q und des Porenanteils n der Bodenschicht für einen vorgegebenen Injektionskörperradius die theoretische Einpresszeit t oder für eine vorgegebene Einpresszeit t der Injektionskörperradius r berechnen.

$$t = \frac{4\pi \cdot n \cdot r^3}{3 \cdot q} \quad [s]$$

$$v = k \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad [m/s]$$

$$k_i = \frac{k_f \cdot \eta \cdot \rho_i}{\eta_i \cdot \rho} \quad [m/s]$$

Mit Hilfe des Gesetzes von Darcy und unter Berücksichtigung des viskositätsabhängigen Durchlässigkeitsbeiwertes k_i nach Wagner (2012) für das Injektionsmittel, lässt sich für einen Injektionskörperradius r mit definierter Einpresszeit t die Energiehöhe Δh berechnen.

3.1 Berechnungsmodell

Für eine Berechnung der theoretischen radialen Penetration von Newtonschen Injektionsmitteln wie Acrylatgele in homogene isotrope Bodenkörper bei laminarer Strömung, kann die zeitabhängige Viskositätsentwicklung und deren Einfluss auf die Widerstände berücksichtigt werden.

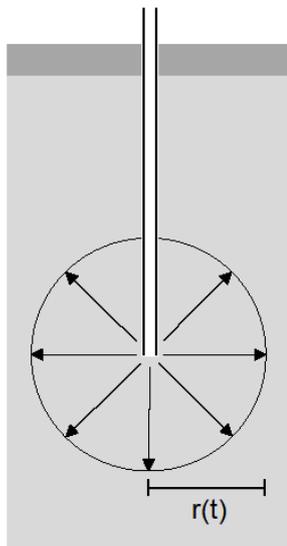


Abbildung 3-1: Ideale kugelförmige Ausbreitung eines Newtonschen Fluides im homogenen rolligen Boden

Um die Förderraten, Reichweiten und Verpressdrücke für eine kugelförmige Ausbreitung rechnerisch zu bestimmen, wurde von einem Schalenmodell für unterschiedliche Ausbreitungszeitpunkte ausgegangen (siehe Abbildung 3-1). Mittels eines Zeitschrittverfahrens können zu jedem Zeitpunkt t unter Berücksichtigung der Viskosität des Injektionsmittels zu diesem Zeitpunkt, die einzelnen Injektionsparameter berechnet werden.

Dem Berechnungsmodell können somit im Labor gemessene Viskositätsverläufe bei unterschiedlichen Materialmischungen für gewählte Reaktionszeiten oder Viskositätsverläufe von Injektionsmitteln bei unterschiedlichen Materialtemperaturen zugrunde gelegt werden. Die Berücksichtigung der Injektionsmittelviskosität erfolgt über eine entsprechende Anpassungsfunktion der Viskositätskurve für das gewählte

Injektionsmittel und dem Laborversuchsergebnis (hier Material A, A-R, B und B-R; siehe Kapitel 2).

Die Berechnungen wurden von Glatz (2020) in Python (Version 3.8.3) programmiert und die Ergebnisse sowohl als Injektions- bzw. Simulationsprotokoll, als auch in einer Excel-Datentabelle für eine spätere Auswertung ausgegeben (siehe Abbildung 3-3).

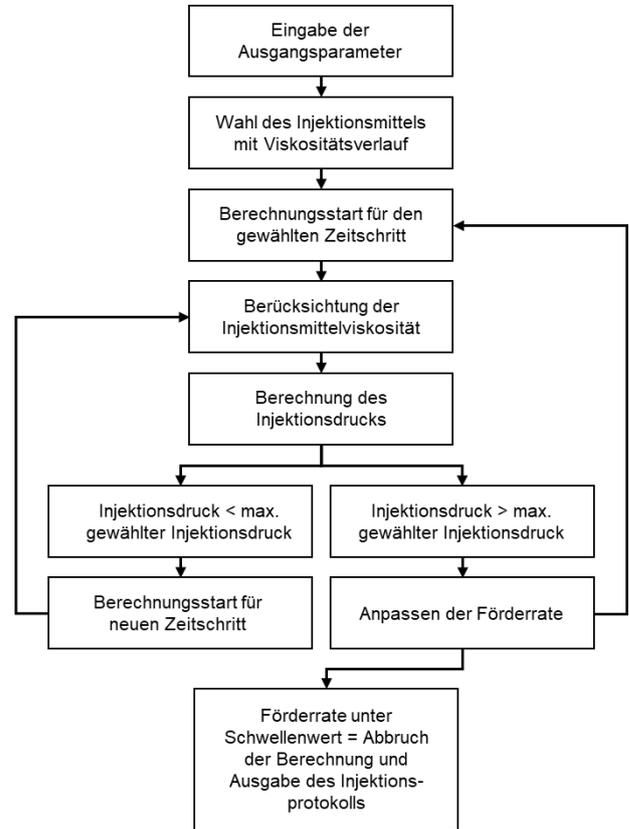


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung des programmierten Berechnungsmodells für eine ideal kugelförmige Injektionsmittelausbreitung (nach Glatz, 2020)

Für den Start einer Berechnung sind Voreinstellungen wie Verpressdruck oder Förderrate, Durchlässigkeitsbeiwert und Porenanteil des Bodenkörpers und der zu wählende Zeitschritt (Auflösung; hier eine Sekunde gewählt) notwendig. Das Abbruchkriterium für die Berechnung stellt das Unterschreiten der Förderate unter einem zuvor definierten geringen Schwellenwert dar. Der Ablauf einer Berechnung ist in Abbildung 3-2 schematisch dargestellt.

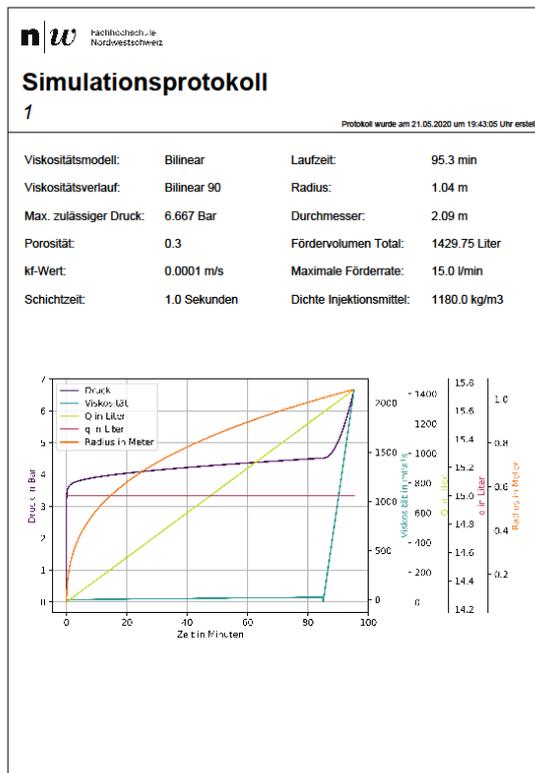


Abbildung 3-3: Simulationsprotokoll als Ausgabe der Berechnungsergebnisse neben einer Excel-Datentabelle (Beispielberechnung)

3.2 Berechnungsergebnisse für gewählte Randbedingungen

Für eine erste Reihe an Simulationsberechnungen wurde ein maximaler Injektionsdruck von 5 bar, eine Durchlässigkeit des Bodens von $k_f = 1 \times 10^{-4}$ m/s sowie ein Porenanteil von $n = 0.3$ gewählt. Dies entspricht einem durchlässigen bis starkdurchlässigen und mittel- bis feinkörnigen Sand. Den Berechnungen wurden Viskositätsverläufe der im Labor untersuchten Acrylatgele, hier bei einer Materialtemperatur von 15 °C (Scherrate 100 1/s im Versuch), zugrunde gelegt (siehe Abbildung 2-3 in Kapitel 2.2).

Die Grundparameter wurden zunächst so gewählt, um den Einfluss der zeitabhängigen Viskositätsentwicklung auf die berechnete theoretische Reichweite (Radius r) darzustellen und nicht die mögliche Ausbreitung eines Newtonschen Injektionsmittels durch die Vorgabe einer geringeren Durchlässigkeit von vornherein zu beschränken.

Die Ergebnisse der Simulationsberechnungen für Material A und Material A-R zeigen aufgrund der Reduktion der BII-Komponente bei Material A-R und der dementsprechend verzögerten Reaktionszeit eine erhöhte theoretische Materialpenetration von 50%

(ca. 0.3 m auf ca. 0.45 m, siehe Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5). Die Berechnungsergebnisse zeigen bei Material A und Material A-R eine Injektionszeit von ca. 7:30 min bzw. ca. 22:30 min und ein entsprechend höheres Gesamtfördervolumen Q von ca. 34 Liter (Material A) im Vergleich zu ca. 116 Liter (Material A-R).

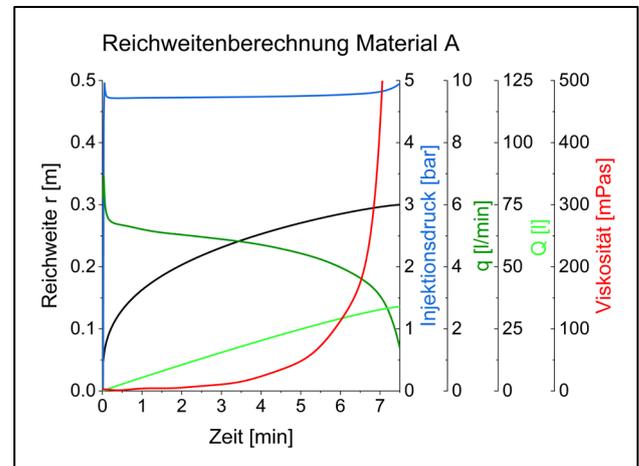


Abbildung 3-4: Simulationsergebnis einer Berechnung mit Material A (300 g BII); Vorgabe: $P_{inj.} = 5$ bar (max.), $k_f = 1 \times 10^{-4}$ m/s, $n = 0.3$

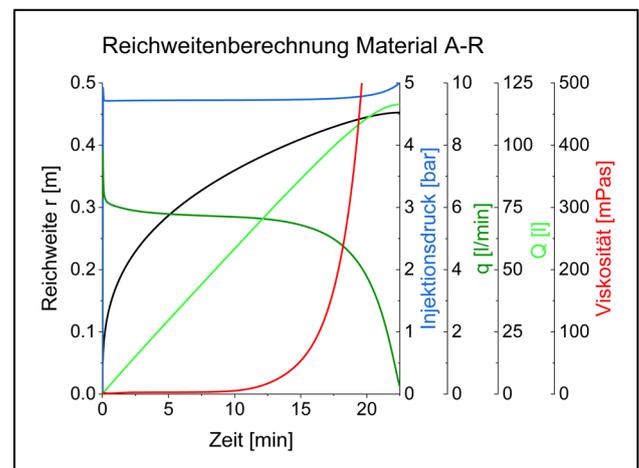


Abbildung 3-5: Simulationsergebnis einer Berechnung mit Material A (70 g BII); Vorgabe: $P_{inj.} = 5$ bar (max.), $k_f = 1 \times 10^{-4}$ m/s, $n = 0.3$

Die Verwendung der gemessenen Viskositätsverläufe des Materials B und B-R zeigen bei den Simulationsberechnungsergebnissen für das Material B aufgrund der schnell anwachsenden Viskosität nach ca. 3 Minuten eine maximale Reichweite r von ca. 0.25 m und bei Material B-R durch die verzögerte Reaktion eine berechnete Reichweite r von ca. 0.41 m. Auffällig sind hierbei im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen des Materials A und A-R die relativ konstante Förderrate aufgrund der gleichbleibenden und spät ansteigenden Viskosität.

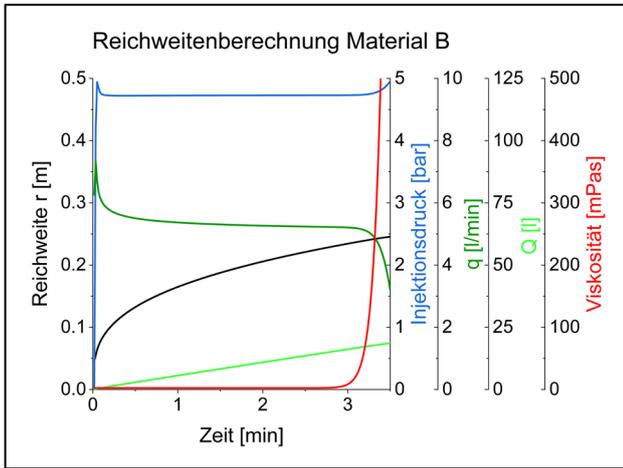


Abbildung 3-6: Simulationsergebnis einer Berechnung mit Material B; Vorgabe: $P_{inj.} = 5 \text{ bar (max.)}$, $k_f = 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, $n = 0.3$

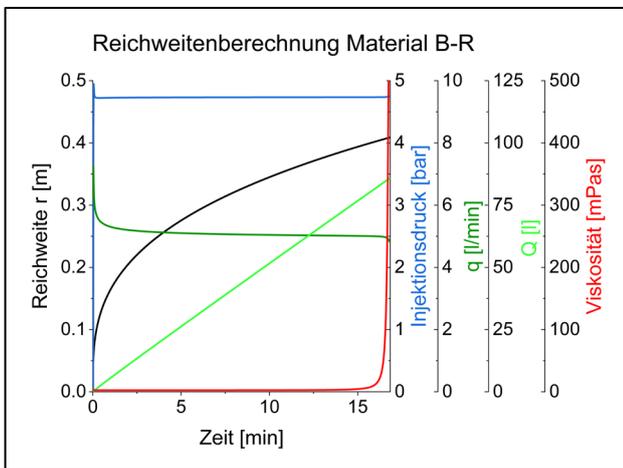


Abbildung 3-7: Simulationsergebnis einer Berechnung mit Material B-R; Vorgabe: $P_{inj.} = 5 \text{ bar (max.)}$, $k_f = 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, $n = 0.3$

Aufgrund der schnell ansteigenden Viskosität nach ca. 16 Minuten lässt sich für Material B-R im Vergleich zu Material A-R eine leicht geringere berechnete Reichweite erkennen. Hier führt die langsamer anwachsende Viskosität auch nach 16 Minuten zu einer minimal höheren Endreichweite (siehe Abbildung 3-5 und Abbildung 3-7).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Mittels Laboruntersuchungen zur Rheologie von zwei Acrylatgelen unterschiedlicher Hersteller, konnten Einflüsse aus Materialtemperatur und Versuchsdurchführung (Wahl der Scherrate) auf die zeitabhängige Viskositätsentwicklung auch bei „verzögerten“ Materialien gezeigt werden. Ein direkter Einfluss des Injektionsdrucks auf den Viskositätsverlauf konnte bei Acrylatgelen durch Messungen in einer Druckzelle nicht festgestellt werden.

Für eine Abschätzung der kugelförmigen Ausbreitung bzw. Reichweite von Quasi-Newtonschen Injektionsmitteln in einer homogenen Bodenschicht wurde unter Berücksichtigung der gemessenen Viskositätsverläufe eine Simulationsberechnung in Python programmiert. Die Berechnungsergebnisse zeigen den großen Einfluss der Viskosität auf die Penetration des Materials und die Förderrate. Die Berechnungen erfolgten ohne Beachtung von Material- und Bodenkörperinhomogenitäten, Schichtwechselln, vorhandenem Grundwasser und möglichen Vermischungen der Injektionsmittel aufgrund permanenter Injektion von „frischem“ Material (Verwendung von Statikmischelementen bei der Injektionsquelle).

Im weiteren Verlauf der Forschungsarbeiten werden die Laboruntersuchungen zu Einflussfaktoren bei Gelierungsprozessen von Acrylatgelen fortgeführt und weitere Rotationsviskosimeterversuche auch für Materialien anderer Hersteller durchgeführt.

Die Berechnungen zur Ausbreitung mittels Python werden um weitere Strömungsarten (Bsp. zylindrische Ausbreitung) und mehrere Bodenschichten mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten sowie vorhandenem hydrostatischem Gegendruck erweitert.

Literaturverzeichnis

Clarke, W.J. (1982): *Performance characteristics of acrylate polymer grout*. In: Baker, W. H. [Hrsg.]: *Proceeding of the Conference Grouting in Geotechnical Engineering*. American Society of Civil Engineers, S. 418 - 432, New York.

Glatz, T. (2020): *Master-Thesis*, Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz (unveröffentlicht).

Kolymbas, D. (2019): *Geotechnik - Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau, 5. Auflage*. Springer Verlag.

Powers J.B., Corwin A.B., Schmall P.C., Kaeck W.E. (2007): *Construction Dewatering and Groundwater Control: New Methods and Applications, 3rd Edition*. John Wiley & Sons, Inc.

Wagner W. (2012): *Strömung und Druckverlust, 7. Auflage*. Vogel Fachbuch - Vogel Communications Group GmbH & Co. KG.