



Berlin, 21.02.2019

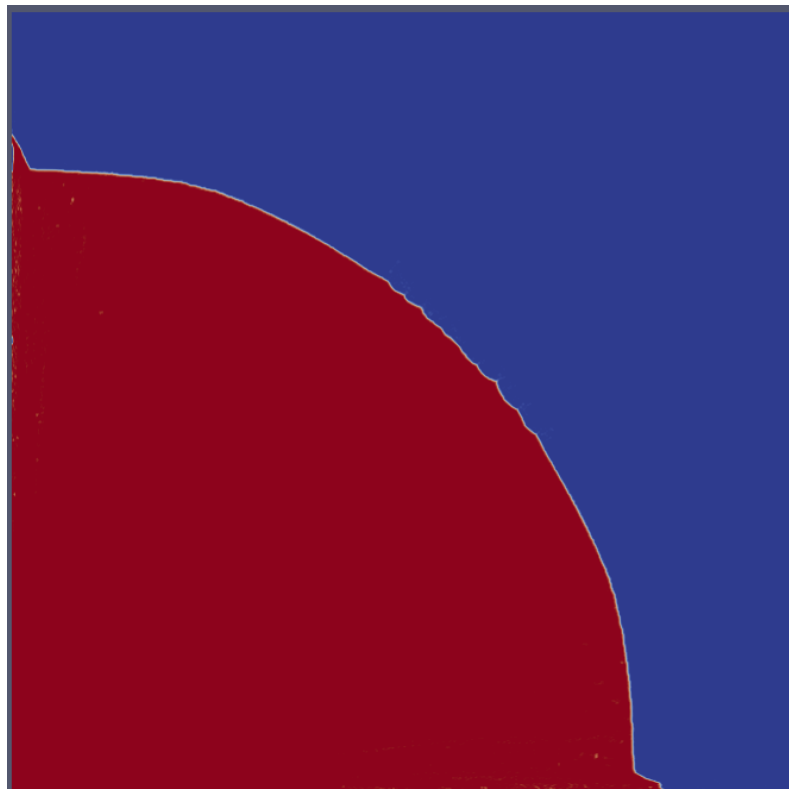
# **CFD-basierte Untersuchung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Acrylatgel in einem Spaltenmodell**

Verfasser:

Nicholas Ray Bowsher, B.Sc.

Katharina Teuber, M.Sc.

Prof. Dr-Ing. Reinhard Hinkelmann

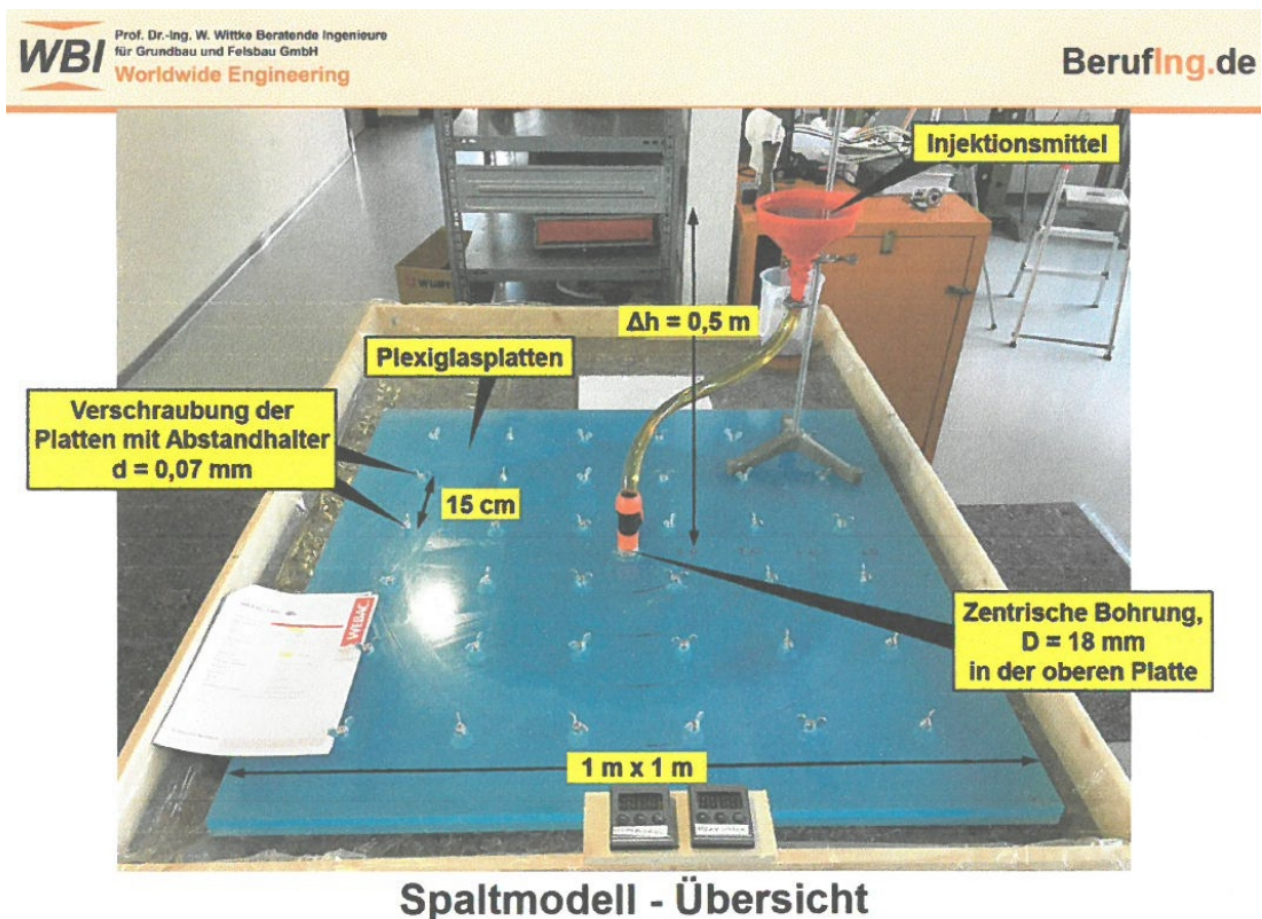


## Einführung

Momentan werden die Fluideigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten von Acrylatgel intensiv untersucht. In diesem Bericht wurden die Ergebnisse einer fluiddynamischen Simulation eines Experiments, in dem Acrylatgel in einem Plattenspalt injiziert wurde, dokumentiert.

Es handelt sich hierbei um ein dreidimensionales Modell. Die Modellerstellung und Simulation wurde mit der open-source Software für Finite-Volumen-Verfahren openFOAM© durchgeführt. Zur mathematischen Beschreibung des Modells wurden die Navier-Stokes-Gleichungen in openFOAM numerisch gelöst und anschließend visualisiert. Es wurde der interFoam Solver implementiert, welcher mehrphasige Simulationen von Fluiden erlaubt. Dies ermöglicht die Visualisierung der Phasengrenzfläche und ihrer zeitlichen Entwicklung.

Zur Beschreibung des modellierten Versuchs wird die folgende Abbildung herangezogen, in der zu sehen ist, dass es sich beim Experiment um die Injektion von Acrylatgel zwischen zwei Plexiglasplatten handelt. Das Acrylatgel wird von 0,5 m Höhe durch ein Rohr, welches an einer zentralen Bohrung mit einem Durchmesser von 18 mm angeschlossen ist, in den Plattenzwischenraum gepumpt. Der Abstand zwischen den Plexiglasplatten beträgt 0,07 mm.



## Methoden

Das Gitter für das Modell wurde mit der blockMesh Anwendung erzeugt. Da es sich beim Experiment um eine symmetrische Ausbreitung in allen Richtungen handelte, wurden zwei Symmetrieebenen „symmetryPlane“ im Model eingebaut. Somit konnte das Gitter auf ein Viertel der Platte reduziert werden und damit auch der Rechenaufwand. Zuerst wurde eine kleinere Version der Platte mit Abmessungen von 20X20 cm erstellt und in 31.200 Zellen diskretisiert. Mit der kleinen Testplatte wurden Probeläufe durchgeführt, um die Eignung der gewählten Randbedingungen für das Modell zu prüfen. Anschließend wurde die Gesamtplatte diskretisiert, wobei in X-Richtung ein Abstand von 830 Zellen, in Y-Richtung 830 Zellen und in Z-Richtung 6 Zellen gewählt wurde. Insgesamt wurde die Gesamtplatte in 3.562.200 Zellen diskretisiert.

Die Art der Strömung wurde mithilfe der in Gleichung 1 berechneten Re-Zahl ermittelt. Dabei wurde eine mittlere Geschwindigkeit  $u$  von 0,001 m/s verwendet. Die charakteristische Länge  $d$  entspricht dem Abstand zwischen beiden Platten.  $\nu$  steht für die kinematische Viskosität des Acrylatgels und ist mit  $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  vorgegeben. Die aus der Berechnung resultierende Re-Zahl von 0,028 weist auf einer laminaren Strömung hin.

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} = \frac{\frac{0,5 \text{ m}}{500 \text{ s}} \cdot 0,07 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}} = 2,8 \cdot 10^{-2} \quad (1)$$

Für laminare Fälle müssen bei interFoam-Simulationen an den offenen Systemrändern Randbedingungen gesetzt werden für ein Vektorfeld, nämlich die Geschwindigkeit  $U$ , und zwei Skalarfelder:  $p\_rgh$ , welches sich aus der Differenz zwischen Druck und hydrostatischer Druck berechnet, und  $\alpha.water$  zur Visualisierung der Phasengrenzfläche, welche als Zahl zwischen 0 und 1 liegt und den Flüssigkeitsanteil in einem Volumenelement angibt. In Tabelle 1 ist eine Übersicht der vorgeschriebenen Randbedingungen zu sehen.

An den Wänden der oberen und unteren Platte „Walls“ wurde für das Geschwindigkeitsfeld eine Haftbedingung „noSlip“ spezifiziert. Der Druckgradient wurde mit der Randbedingung „fixedFluxPressure“ gleich 0 gesetzt, sodass der Fluss am Rand mit der vorgeschriebenen Geschwindigkeitsrandbedingung bestimmt wird. Für  $\alpha.water$  wurde ein Gradient von 0 gesetzt.

Für den Eingang oder „inlet“ wurde, entsprechend der Flüssigkeitssäule von 0,5 m, ein konstanter Gesamtdruck „Total Pressure“ von 4950 Pa verschoben. Die Geschwindigkeit soll aus dem vorgegebenen Druck berechnet werden. Dafür wird die Randbedingung „pressureInletOutletVelocity“ verwendet. Mit der Randbedingung „inletOutlet“ wird vorgeschrieben, dass nur Flüssigkeit in den Plattenzwischenraum einfließt „inletValue 1“. Jedoch wird erlaubt, dass Luft durch den Eingang das Modell verlassen kann „value 0“.

An den äußeren Rändern des Plattenzwischenraumes befindet sich der Ausgang „Outlet“. Dort wurde der Druck gleich 0 gesetzt.

**Tabelle 1: Randbedingungen für das Modell**

Feld	Inlet	Outlet	Walls	Unten und Links
U	pressureInletOutletVelocity value (000);	inletOutlet inletValue 0; value 0;	noSlip	symmetryPlane
P_rgh	totalPressure value 4950;	fixedValue value 0;	fixedFluxPressure value 0;	
alpha.water	inletOutlet inletValue 1; value 0;	inletOutlet inletValue 0; value 0;	zeroGradient	

Für die Oberflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Medium wurde der Wert für Wasser und Luft von 0,07 übernommen.

Zur numerischen Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen wurde das explizite Euler-Verfahren angewendet. Als Stabilitätskriterium wurde die maximal zulässige Courant-Zahl  $Co = 1$  vorgegeben. Somit wurde der Zeitschritt  $\Delta t$  bei Überschreitung der kritischen Co-Zahl im Laufe der Simulation angepasst.

## Ergebnisse und Diskussion

Für den Testlauf mit dem verkleinerten Modell konnte eine gleichmäßige Ausbreitung des Flüssigmediums festgestellt werden. (siehe Abb. 1 und 2)

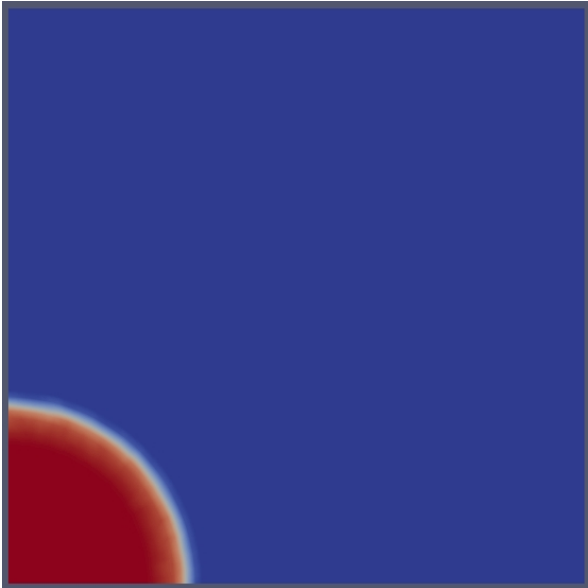


Abbildung 1: Ausbreitung Kleinplatte für  $t=0,005$  s



Abbildung 2: Ausbreitung Kleinplatte für  $t=0,5$  s

Bei der Gesamtplattensimulation traten am unteren und linken Rand Verzerrungen an der Flüssigkeitsoberfläche auf (siehe Abb. 3 und 4). Grund dafür war die Schiefe zwischen den Zellreihen an den Rändern. Dieser Effekt könnte mit einer Verfeinerung des Gitters aufgehoben werden. Allerdings konnte das Gitter nicht hinreichend verfeinert werden, da der Rechenaufwand sonst für die Simulation zu hoch gewesen wäre.

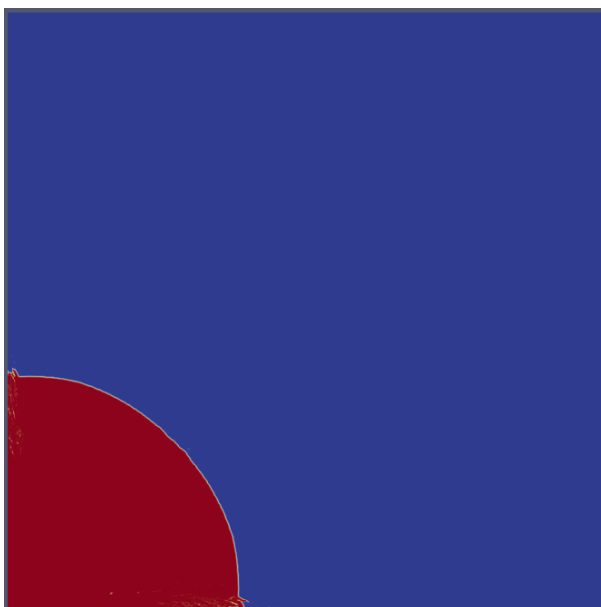


Abbildung 3: Ausbreitung Gesamplatte für  $t=60$  s

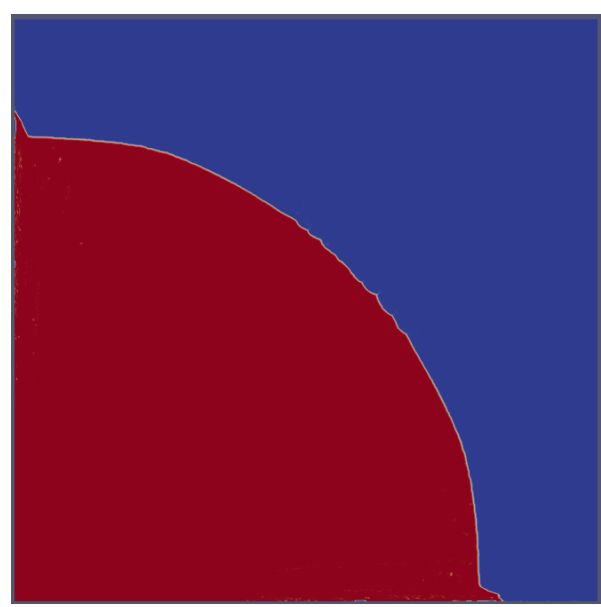


Abbildung 4: Ausbreitung Gesamplatte für  $t=320$  s

Es wurden insgesamt drei Simulationen mit jeweils veränderten Parametern durchgeführt. In Abb. 5 wurde die zeitliche Ausbreitung der Flüssigkeitsfront bei einer interfluiden Oberflächenspannung  $\sigma$  von 0,7 N/m aufgezeichnet. Die Simulationsberechnung wurde 14 Tage lang auf 800 Prozessoren durchgeführt und lieferte eine Echtzeit von 240,5 Sekunden.

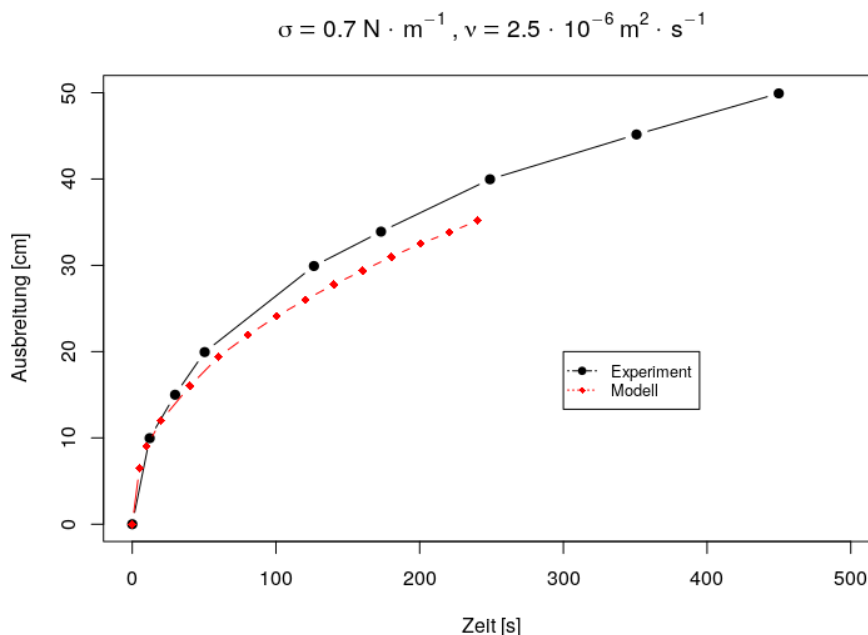


Abbildung 5: Ergebnisse aus dem ersten Simulationslauf

Zur Ermittlung über die Auswirkung der interfluiden Oberflächenspannung auf die Modellergebnisse wurde diese bei einem weiteren Simulationslauf von 0,7 auf 0,5 N/m erniedrigt. Die Simulationsberechnung wurde 14 Tage lang auf 1.200 Prozessoren durchgeführt und lieferte eine Echtzeit von 320 Sekunden. Eine Veränderung von  $\sigma$  führte insgesamt zu keiner beträchtlichen Veränderung in der Form oder Geschwindigkeit der Fluidausbreitung, was bedeutet, dass  $\sigma$  im Modell nicht als Kalibrierparameter anzusehen ist. (vgl. Abb. 5 und Abb. 6)

Jedoch im Vergleich zu den Experimentergebnissen trat eine Verzögerung der Flüssigkeitsausbreitung auf, welche sichtbar ist für die beiden ersten Simulationen. Daher wurde die Auswirkung der kinematischen Viskosität als Kalibrierfaktor im Modell überprüft. Dafür wurde  $\nu$  um 10% verringert, was zu einer Anpassung der Ausbreitungsgeschwindigkeit und zu einer besseren Übereinstimmung mit den Experimentmesswerten führte. (siehe Abb. 7) Für diese Simulation wurden insgesamt 800 Prozessoren und ~28 Tage in Anspruch genommen, die eine Echtzeit von 370 s lieferten. Der Zeitschritt  $\Delta t$  für alle durchgeführte Simulationen lag bei einer Größenordnung von  $10^{-5}$  s.

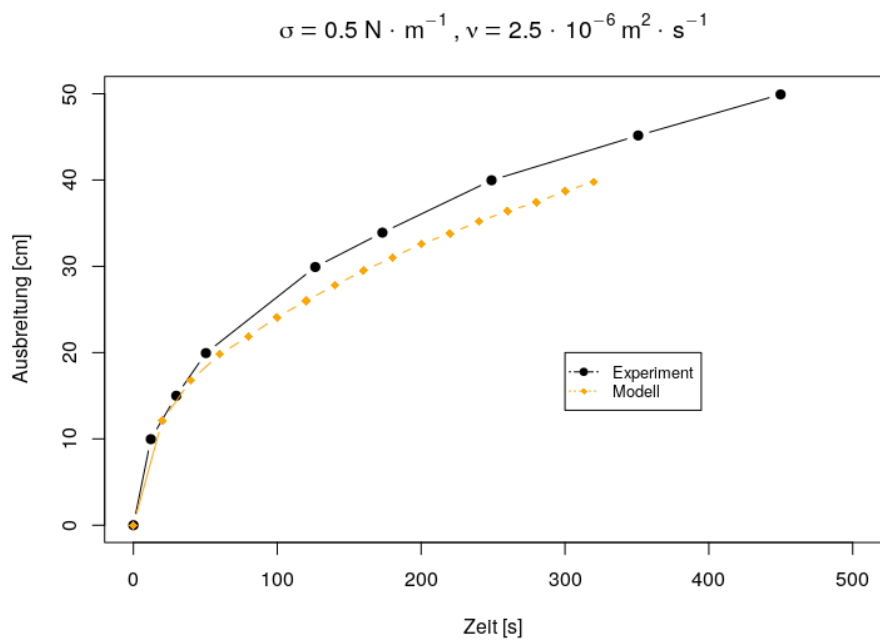


Abbildung 6: Ergebnisse aus dem zweiten Simulationslauf

Angenommen, dass die Referenztemperatur von 20° C über die gesamte Laufzeit des Experiments konstant gehalten wurde, fungiert die kinematische Viskosität als Kalibrierfaktor, um die Ungleichmäßigkeiten zwischen Modell und Realität abzufangen.

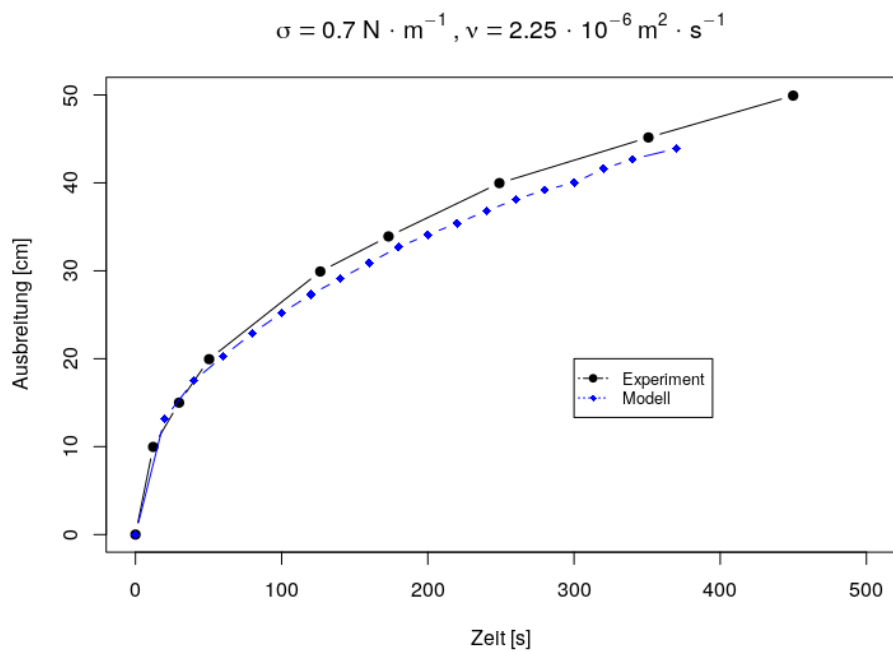


Abbildung 7: Ergebnisse aus dem dritten Simulationslauf

Eine weitere Beobachtung ist die Geschwindigkeitsbeschränkung über die Zeit. Zur Erklärung hierfür wurde die zeitliche Entwicklung des Geschwindigkeitsprofils in Z-Richtung herangezogen und näher betrachtet. Die Maximalgeschwindigkeit im Profil sinkt fortlaufend wie in den Abb. 8 und 9 zu sehen ist.

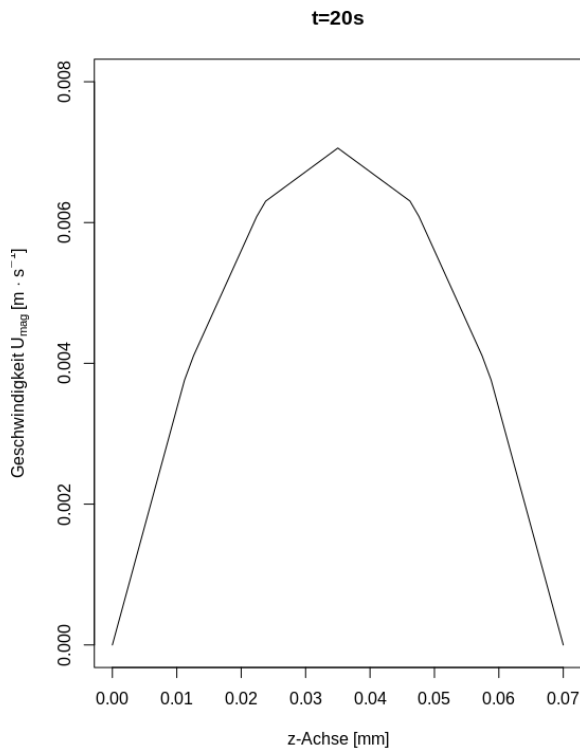


Abbildung 8: Geschwindigkeitsprofil für  $t=20 \text{ s}$

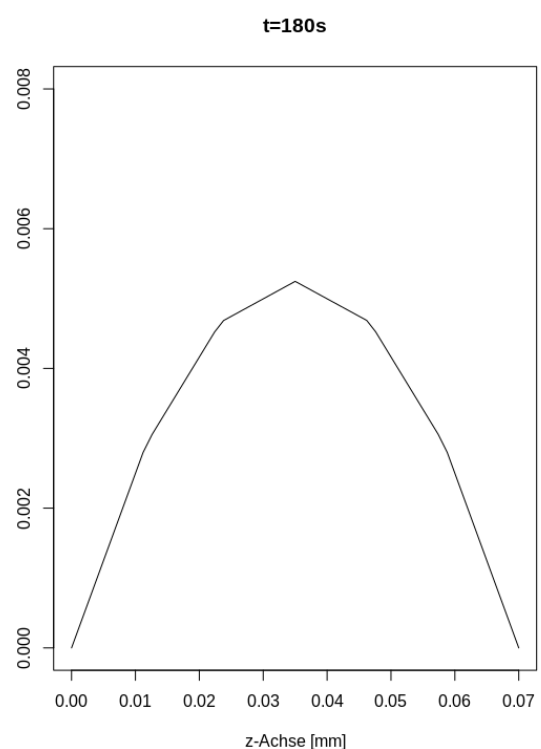


Abbildung 9: Geschwindigkeitsprofil für  $t=120 \text{ s}$

Dieses bedeutet, dass die Flüssigkeitsbeschleunigung im Laufe des Experiments sinkt aufgrund der immer größer werdenden Phasengrenzfläche, auf der der konstante, eingestellte Druck wirkt. Daher ist die Schrankenfunktion bei der Plattenausbreitung zu beobachten.

Abschließend lässt sich sagen, dass das Modell ausreichend war, um die Ausbreitung des Acrylatgels nach den Experimentergebnissen zu beschreiben. Eine weitere Kalibrierung der dynamischen Viskosität könnte durchgeführt werden, um die Modellergebnisse noch näher an das Experiment anzupassen.

Die Simulation erforderte einen sehr hohen rechnerischen Aufwand. Die optimale Anzahl an Prozessoren konnte nicht ermittelt werden, da nur maximal 1.200 Prozessoren vom verwendeten Server zur Verfügung gestellt wurden.

Eine Anwendung des Modells zur Beschreibung des Fließverhaltens von Acrylatgel in Festgesteinshohlräumen ist möglich. Für einfachere Spalten und Rissformen könnten Simulationen wahlweise in 2D durchgeführt werden. Somit könnte der Rechenaufwand des Modells erheblich verringert werden.