

Visualisierung und Quantifizierung des Materialabtrags von künstlichen Gesteinsproben beim druckwassergestützten Bohren

Visualization and quantification of the material removal process of artificial rock samples while drilling with pressurized water

Sarah Jasper¹, Dennis Salamon¹, Volker Wittig², Jeanette Hussong³, und Ralph Lindken¹

¹Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Hochschule Bochum, Lennerhofstr. 140, 44801 Bochum

²International Geothermal Centre - GZB, Lennerhofstr. 140, 44801 Bochum

³AG Lasermesstechnik der Mehrphasenströmungen, Lehrstuhl für Hydraulische Strömungsmaschinen, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum

Visualisierung, Schattenbild, PIV, Materialabtrag
visualization, shadowgraphy, PIV, material removal

Zusammenfassung

Durch eine Übertragung der Hochdruckwasserstrahltechnik auf die Bohrtechnik für Geothermianwendungen kann ein effizienteres und kostengünstigeres Bohrverfahren entwickelt werden, um die Verbreitung und Nutzung von Geothermie als regenerative Energiequelle zu fördern. Dazu muss aus dem bisher schon bekannten druckwassergestützten Bohrverfahren für weiche Gesteinsformationen eine Tiefbohrtechnik entwickelt werden, die auch in hartem und kristallinem Gestein anwendbar ist. Die Optimierung erfolgt durch eine detaillierte Prozessanalyse des bisherigen Verfahrens, besonders die Wechselwirkung zwischen Druckwasserstrahl und Gesteinsoberfläche rückt dabei in den Vordergrund. In diesem Beitrag werden deshalb zwei Methoden zur Visualisierung und Quantifizierung der Vorgänge zwischen Bohrwerkzeug und Gesteinsoberfläche verglichen sowie deren Anwendbarkeit durch Herausstellen von Vor- und Nachteilen geprüft. Neben Schattenbildaufnahmen werden dazu PIV-Aufnahmen von künstlichen Gesteinsproben gemacht, in die fluoreszenzmarkierte Partikel eingebracht sind.

Einleitung

Durch die Nutzung von Geothermie zur Wärme- und Stromerzeugung kann die Energieversorgung in Deutschland nachhaltiger und klimafreundlicher gestaltet werden. Anders als andere regenerative Energien ist die Geothermie grundlastfähig und ganzjährig nutzbar. Bei der Geothermie unterscheidet man zwischen oberflächennaher und tiefer Geothermie. Die oberflächennahe Geothermie wird einem Bereich bis 400 Metern Tiefe und einer Durchschnittstemperatur von 20 °C eingeordnet und wird vorrangig zum Heizen und Kühlen verwendet. Die tiefe Geothermie beginnt ab einer Tiefe von 1000 Metern und Durchschnittstemperaturen über 60 °C. Durch die höheren Temperaturgradienten kann die tiefe Geothermie neben der Wärmergewinnung auch zur Stromerzeugung in Geothermiekraftwerken verwendet werden. Das nutzbare geothermische Potential liegt in Deutschland dabei mit ca. 85% vor allem in petrothermalen Lagerstätten (Brauer et al. 2014).

Petrothermale Lagerstätten bestehen aus Gesteinsschichten mit geringer Durchlässigkeit, führen keine natürlichen Thermalwässer und zählen zur tiefen Geothermie. In Deutschland und Europa sind diese Lagerstätten in ca. 3000 Metern Tiefe vorhanden und weisen eine Durchschnittstemperatur von 100 °C auf (Chamorro et al. 2014). Anders als hydrothermale Lagerstätten, die meist in Tiefen von 1000 m liegen, sind petrothermale Lagerstätten geographisch weit verbreitet und weniger abhängig von besonderen geologischen Gegebenheiten. Sie bieten daher ein hohes Potential zur energetischen Nutzung von Geothermie.

Der Erschließung dieser tiefen Lagerstätten stehen momentan noch hohe Kosten für Tiefbohrungen entgegen. Diese Kosten können bis zu 70% der Gesamtkosten bei der Errichtung einer Geothermieranlage betragen (Stober und Bucher 2012). Die Entwicklung einer geeigneten Tiefbohrtechnologie hat das Potential diese Kosten deutlich zu senken, vor allem indem der Bohrfortschritt gesteigert und damit die benötigte Zeit für das Abteufen einer Bohrung reduziert wird. Dazu werden u.a. druckwassergestützte Bohrverfahren weiterentwickelt, die bereits in der oberflächennahen Bohrtechnik erfolgreich angewendet werden (Cinelli und Kamel 2013). Diese Bohrtechnik basiert auf Hochdruckwasserstrahlen, ist jedoch bisher für Tiefbohrungen nicht anwendbar, da die dort vorliegenden harten und kristallinen Gesteine nicht zerstört werden können. Für die erfolgreiche Übertragung der Technologie auf hartes Gestein muss dazu zunächst ein detaillierteres Prozessverständnis zusammengetragen werden. Bereits seit den 1960er Jahren wird dazu auf dem Gebiet des Wasserstrahlschneidens und -bohrens von Gestein geforscht, der Prozess selbst jedoch bis heute noch nicht hinreichend verstanden (Farmer und Attewell 1965, Brook und Summers 1969, Hood et al. 1990).

Besonders interessant für das Prozessverständnis ist die Wechselwirkung zwischen Wasserstrahl und Gestein. Die Visualisierung der Vorgänge zwischen dem Bohrwerkzeug, hier einer Düse, und der Gesteinsoberfläche liefert dazu tiefer gehende Erkenntnisse über den Bohrprozess. In diesem Beitrag werden deshalb zwei Methoden zur Visualisierung des Materialabtrags an künstlichen Gesteinsproben angewendet und verglichen. Zum einen wird der Materialabtrag mit dem Schattenbildverfahren untersucht, zum anderen werden in die künstlichen Gesteinsproben fluoreszenzmarkierte Partikel eingebracht, um den Materialabtrag mittels PIV zu untersuchen. Beide Methoden werden hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile zur Visualisierung des Materialabtrags, zur Bestimmung der Partikelgeschwindigkeit sowie der Partikelgröße gegenübergestellt.

Experimenteller Aufbau

Natürliche Gesteinsproben sind heterogen und ermöglichen daher keine reproduzierbaren Messungen. Aus diesem Grund werden für diesen Beitrag künstliche Gesteinsproben aus einer Wasser-Zement-Mischung verwendet, wie in Abbildung 1 dargestellt. In diese künstlichen Gesteinsproben können zusätzlich fluoreszenzmarkierte Partikel eingebracht werden, sodass neben der Visualisierung des Materialabtrags mit dem Schattenbildverfahren auch eine Visualisierung mittels PIV möglich ist. Die fluoreszenzmarkierten Partikel sind aus einer Polyesterharzbasis hergestellt und mit Rhodamin WT versetzt (Pedocchi et al. 2008). Die verwendeten Partikel besitzen mit einer Größenverteilung von 60-250 µm die gleiche Größenordnung wie herausgelöste, einzelne Gesteinspartikel aus weicherem Gestein wie z.B. Sandstein (Tian et al. 2017). Die Herstellung der künstlichen Gesteinsproben erfolgt so, dass eine gute Durchmischung zwischen der Wasser-Zement-Mischung und den eingebrachten Fluoreszenzpartikeln sichergestellt ist. Dadurch ist gewährleistet, dass beim

Materialabtrag auch ausreichend Fluoreszenzpartikel gelöst werden, die während der PIV-Aufnahmen im Lichtschnitt angeregt werden und so ein Signal geben.

Beide Versuchsaufbauten sind in Abbildung 2 dargestellt. Die einzelnen Komponenten sind eine 16 bit sCMOS Kamera mit einem Zeiss Yashica Makro-Objektiv mit Bandpassfilter, ein Nd:YAG Doppelpuls-Laser (max. Frequenz 15 Hz, Wellenlänge 532 nm, Pulslänge 5 ns, max. Ausgangsenergie 200 mJ pro Puls) und ein Lichtführungsarm. Für die Schattenbildaufnahmen ist der Lichtführungsarm mit einem optischen Diffusor gekoppelt, der einen 5 ns Laserpuls in einen nicht-kohärenten, frequenzverschobenen Puls mit einer Dauer von etwa 23 ns wandelt. Durch die kurze pulsierende Beleuchtung wird der Materialabtrag aus den Gesteinsproben ohne Bewegungsunschärfe dargestellt. Für die PIV-Aufnahmen ist der Lichtführungsarm mit einer Lichtschnittoptik gekoppelt. Die in der Probe eingebetteten Fluoreszenzpartikel werden im Lichtschnitt bei 532 nm angeregt und emittieren Licht im Bereich um 560 nm.

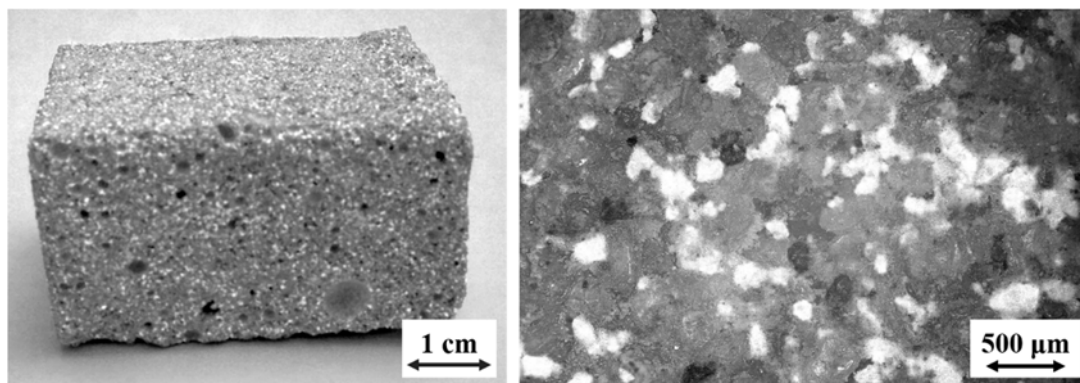


Abb. 1: Makroaufnahme einer künstlichen Gesteinsprobe mit eingebrachten Fluoreszenzpartikeln (links) sowie eine Detailaufnahme der Durchmischung der Fluoreszenzpartikel mit der Wasser-Zement-Mischung nach der Aushärtung (rechts).

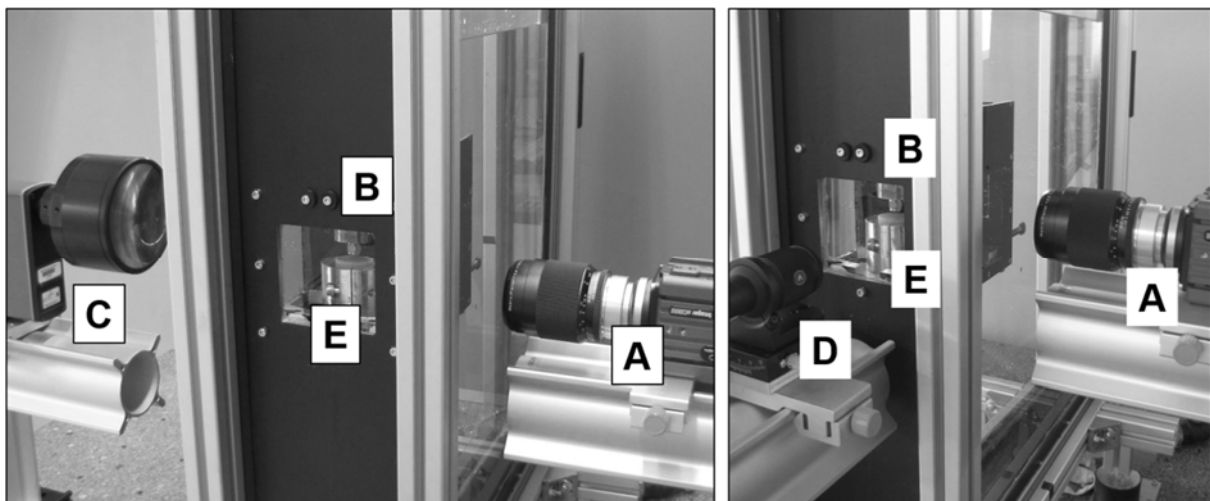


Abb. 2: Versuchsaufbau für die Schattenbildaufnahmen (links) und PIV-Aufnahmen (rechts) mit Kamera (A), Düse (B), optischem Diffusor (C), Lichtschnittoptik (D) und Probenhalterung (E) im Wassertank.

Die künstlichen Gesteinsproben werden für die Versuche in einem Wasserbecken unterhalb der Düse positioniert. Zwischen Düse und Probe wird anschließend ein Arbeitsabstand von dreifachem Düsendurchmesser eingestellt. Dieser Arbeitsabstand hat sich bisher als sehr wirksam für Gesteinszerstörung gezeigt (Liao et al. 2012). Für die Versuche wird eine Vollstrahldüse mit eingesetztem Saphirstein mit einem Durchmesser von $d_D = 1,8 \text{ mm}$ verwendet und über eine Hochdruckpumpe ein maximaler Volumenstrom vom $Q_{\max} = 4,5 \text{ l/min}$ eingestellt. Der entstehende Wasserstrahl erreicht so Geschwindigkeiten von $v_{\max} = 10 \text{ m/s}$. Die Geschwindigkeit liegt damit in diesem Versuchsaufbau deutlich niedriger als beim Wasserstrahlbohren von realem Gestein, wo abhängig von den Gesteinseigenschaften Geschwindigkeiten von mehreren 100 m/s benötigt werden, um das Gestein aufzubrechen. Die Versuche wurden bewusst skaliert und die künstlichen Gesteinsproben bzgl. ihrer Festigkeit den geringen Geschwindigkeiten angepasst, sodass auch unter diesen Bedingungen im Labormaßstab ein Materialabtrag sichtbar ist und die ausgewählten Messmethoden in einem ersten Schritt verglichen werden können. Der Bohrprozess selbst läuft innerhalb weniger Sekunden ab und auch der Materialabtrag ist ein schneller Prozess, der sich nicht mit dem Messsystem synchronisieren lässt. Das führt dazu, dass nicht auf jedem aufgenommenen Doppelbild ein Materialabtrag zu erkennen ist, der Prozess also nicht zeitaufgelöst dargestellt werden kann. Die Versuche werden deshalb für jeden Messpunkt mehrmals wiederholt, sodass eine ausreichende Menge an Aufnahmen mit Materialabtrag für die statistische Auswertung sichergestellt ist.

Visualisierung des Materialabtrags und Bestimmung der Partikeleigenschaften

Einen Vergleich der Visualisierung des Materialabtrags aus den künstlichen Gesteinsproben mit dem Schattenbildverfahren und PIV zeigt Abbildung 3. Neben den Partikeln sind auf beiden Aufnahmen Gasblasen in unterschiedlichen Größen zu erkennen, die z.B. durch Entgasen des Wassers oder Kavitation in der Düse entstehen. Besonders in den Schattenbildaufnahmen werden alle Gasblasen im Bildfeld abgebildet. Durch die Verwendung von Fluoreszenzpartikeln und des optischen Filters im Versuchsaufbau für die PIV-Messungen wird ein Teil des von den Gasblasen stammenden Signals im grünen Wellenlängenbereich entfernt. Jedoch erreicht immer noch an den Gasblasen reflektiertes Fluoreszenzsignal im roten Wellenlängenbereich die Kamera.

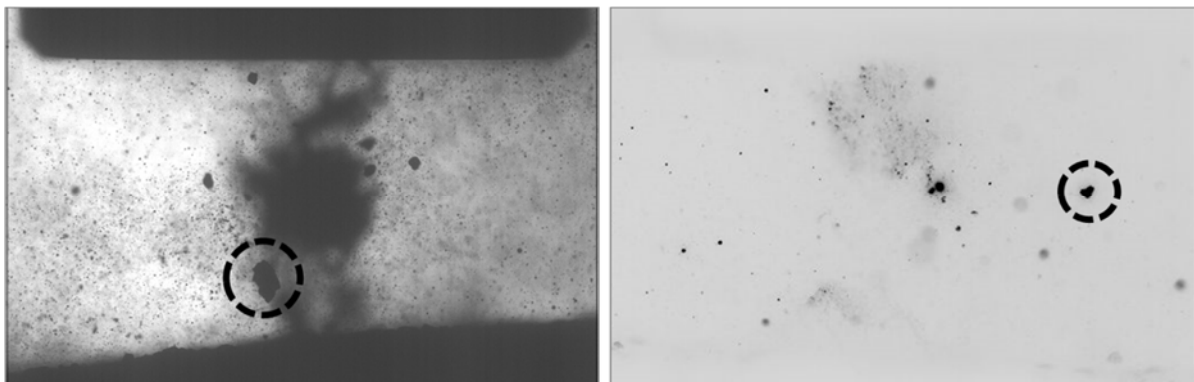


Abb. 3: Vergleich der Visualisierung des Materialabtrags aus den Gesteinsproben mit einer Schattenbildaufnahme (links) und einer invertierten PIV-Aufnahme (rechts). Die Düse befindet sich jeweils am oberen Bildrand, die Probe am unteren Bildrand und Bilder von gelösten Partikeln sind jeweils beispielhaft markiert. In den Schattenbildaufnahmen ist der Mittenbereich durch Abschattung von Gasblasen schlecht auswertbar. Aus dem Gestein gelöste Partikel scheinen als dunkle Schatten, in den PIV-Aufnahmen erscheinen die Partikel als helle Punkte, sie werden jedoch zur besseren Sichtbarkeit durch Invertierung der Grauwertstufen des Rohdatenbildes als Schatten dargestellt.

Vor allem die Partikelbilder in den Schattenbild- und PIV-Aufnahmen unterscheiden sich deutlich und in mehreren Punkten wie in Abbildung 4 zu erkennen. Die Schattenbildaufnahmen zeigen ein Partikel mit gutem Kontrast zum Hintergrund, die Kontur des Partikels ist klar erkennbar. In den PIV-Aufnahmen zeigen die Partikel im Allgemeinen einen Verlauf der Grauwerte, über die Partikel verteilt sind es durchschnittlich 1000 Grauwertstufen. Das ist durch die seitliche Beleuchtung der Partikel im Lichtschnitt zu begründen. Außerdem werden in den PIV-Aufnahmen Partikel-Zement-Kollektive sichtbar. Anders als in den Schattenbildaufnahmen werden diese nicht als ein einheitliches Partikel abgebildet, vielmehr emittieren die einzelnen Fluoreszenzpartikel in der Zementmatrix lokal ein höheres Signal. Für die Auswertung kann das eine Schwierigkeit darstellen, da an Stelle des gesamten gelösten Partikelkollektivs die einzelnen Fluoreszenzpartikel als Partikel erkannt werden und so der berechnete Partikeldurchmesser kleiner ist als in der Realität.

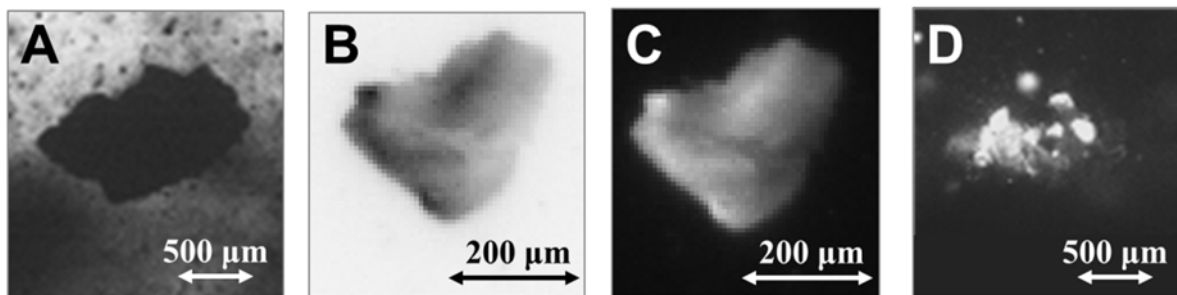


Abb. 4: Darstellung unterschiedlicher Partikelbilder. (A) Schattenbildaufnahme eines Gesteinspartikels mit hohem Kontrast des Partikelrands zum Hintergrund. (B) Invertierte PIV-Aufnahme eines Fluoreszenzpartikels mit deutlich unterschiedlichen Graustufen über die gesamte Oberfläche verteilt und hohem Kontrast zum Hintergrund. (C) Unbearbeitete PIV-Aufnahme desselben Fluoreszenzpartikels wie (B). (D) Unbearbeitete PIV-Aufnahme mehrerer Fluoreszenzpartikel, die in einer Zementmatrix eingebettet sind und ein Partikel-Zement-Kollektiv bilden.

Zur Berechnung der Partikelgeschwindigkeit wird die Bewegung eines Partikels über die Verschiebung des Mittelpunkts bestimmt, vgl. Abbildung 5. Für alle Partikel, die sich zwischen Düse und Probenoberfläche befinden, werden so die Verschiebung in x- und y-Richtung sowie der Betrag der Geschwindigkeit berechnet. Sowohl mit den Schattenbildaufnahmen als auch mit PIV-Aufnahmen ist es möglich, die Geschwindigkeiten der Einzelpartikel zu bestimmen. Die PIV-Aufnahmen müssen lediglich erst invertiert werden. Der Partikeldurchmesser wird analog über die projizierte Fläche der längsten und kürzesten Achse bestimmt, vgl. Abbildung 5.

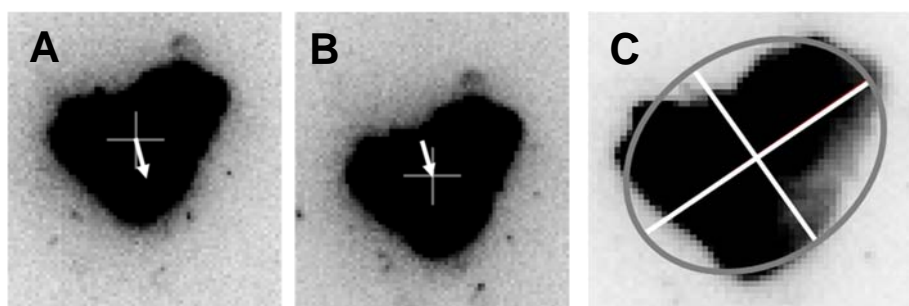


Abb. 5: Bestimmung eines Geschwindigkeitsvektors an einem Einzelpartikel über die Verschiebung des Mittelpunkts von der ersten (A) zur zweiten Aufnahme (B). (C) zeigt die Bestimmung der Partikelgröße mit Darstellung der langen und kurzen Achse sowie der daraus projizierten Partikelfläche.

Partikelgeschwindigkeit

Nach der Auswertung werden die Daten gefiltert indem zum einen alle Partikel mit einer Geschwindigkeit von $v_P = 0$ m/s verworfen werden, da diese keine Bewegung vorweisen und somit für die Auswertung nicht relevant sind. Zum anderen werden vor der Auswertung mittels Bildverarbeitung Abbildungen von Partikeln mit einem Durchmesser von $d_P < 50 \mu\text{m}$ und $d_P > 500 \mu\text{m}$ gefiltert, da ein Abgleich mit den Aufnahmen zeigt, dass dies weder Gesteinspartikel noch fluoreszierende Partikel sind, die sich aus der Probe gelöst haben. Bei diesen Partikeln handelt es sich zum einen um kleine Gasblasen und zum anderen um Felder von zusammenhängenden Gasblasen, die sich vorrangig im Bereich des Wasserstrahls befinden. Für die Auswertung der Partikelbewegung sind diese also nicht relevant.

Da sowohl in den Schattenbild- als auch in den PIV-Aufnahmen mehrere Tausend Partikel erkannt werden, werden die Ergebnisse innerhalb des untersuchten Bereichs in mehrere Felder zusammengefasst. Jedes Auswertefeld misst dabei 2×1 mm in x- bzw. y-Richtung, insgesamt ergeben sich so für den untersuchten Bereich 56 Felder. Innerhalb dieser Felder werden die einzelnen Ergebnisse über die Anzahl der sich darin befindlichen Partikel gemittelt. Dabei wird sichergestellt, dass sich eine Mindestanzahl von 50 Partikeln in einem Feld befindet. Für die Darstellung werden die absoluten Werte auf den maximalen Wert normiert, um eine Vergleichbarkeit zwischen den Schattenbild- und den PIV-Aufnahmen zu ermöglichen. Die Auswertung der betragsmäßig normierten mittleren Partikelgeschwindigkeit ist in Abbildung 6 zu sehen.



Abb. 6: Darstellung der betragsmäßig normierten mittleren Partikelgeschwindigkeiten zwischen der Düse und der Probenoberfläche nach den Schattenbildaufnahmen (links) und PIV-Aufnahmen (rechts).

In der Mitte des Bildfelds zeigen sich die höchsten Geschwindigkeiten. In eben diesem Bereich befindet sich der Wasserstrahl, der die durch Entrainment in den Freistrahle eingebrachten Partikel beschleunigt. Dieser Bereich ist bei der Auswertung der Schattenbildaufnahmen ausgeprägter als in den PIV-Aufnahmen. Die Geschwindigkeit im gesamten Bildfeld nimmt dort von der höchsten Geschwindigkeit in der Nähe des Wasserstrahls zu den Seiten hin ab, wo auf Grund des Strömungsfeldes geringe Geschwindigkeiten zu erwarten sind. Bei der Auswertung der PIV-Aufnahmen ist dieses Muster in Abbildung 6 nicht eindeutig zu erkennen. Eine Ursache dafür können Gasblasen in

der Nähe des Düsenaustritts sein, die das von den Fluoreszenzpartikeln emittierte Licht streuen und so die Auswertung beeinflussen.

Partikelgröße

Die Partikelgröße wird über die projizierte Fläche des detektierten Partikels berechnet. Je ähnlicher die Partikelform einer Kreisfläche ist, desto präziser ist der berechnete Partikeldurchmesser. Die gelösten Gesteinspartikel und auch die Fluoreszenzpartikel weisen in der überwiegenden Anzahl keine kreisrunde Fläche auf, vgl. Abbildung 4. Bei Partikel-Zement-Kollektiven, die in den PIV-Aufnahmen auftreten, ist es außerdem abhängig von den eingestellten Auswerteparametern, ob die eingebetteten Fluoreszenzpartikel als einzelne Partikel oder das gesamte Partikel-Zement-Kollektiv als ein Partikel ermittelt wird. Diese Problematik tritt in den Schattenbildaufnahmen nicht auf.

Insgesamt gesehen weichen die durchschnittlichen Partikeldurchmesser in den Schattenbild- und den PIV-Aufnahmen mit $d_P = 110 \mu\text{m}$ und $d_P = 105 \mu\text{m}$ jedoch nicht stark voneinander ab. Das ist so erwartet worden, da die untersuchten Proben dieselbe Struktur aufweisen. Es zeigt außerdem, dass die verwendeten Fluoreszenzpartikel tatsächlich die Größenordnung der aus den künstlichen Gesteinsproben gelösten Partikel haben. Durch die Einbringung der Partikel werden die Messungen also nicht verfälscht.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden zwei Methoden zur Visualisierung und Quantifizierung des Materialabtrags beim druckwassergestützten Bohren von künstlichen Gesteinsproben untersucht. Mit Hilfe beider Methoden lassen sich Geschwindigkeiten von Einzelpartikeln bestimmen, sowie deren Bewegung im untersuchten Bereich zwischen Bohrwerkzeug und Probenoberfläche quantifizieren. Dennoch weisen sowohl die Schattenbild- als auch die PIV-Aufnahmen Nachteile auf. In den Schattenbildaufnahmen ist nachteilig, dass alle Gasblasen im Bildfeld ungefiltert aufgenommen werden. Eine nachträgliche Bildbearbeitung und feine Einstellung bei den Auswerteparametern ist hier zwingend notwendig, um nicht Gasblasen als unzutreffende Partikel zu ermitteln. Die PIV-Aufnahmen zeigen Nachteile in der Unterscheidung von einzelnen Partikeln und Partikel-Zement-Kollektiven, bei denen eine sorgfältige Einstellung der Auswerteparameter gewährleistet sein muss, damit diese Kollektive als ein Partikel erkannt werden. Die Auswertung der Geschwindigkeiten im untersuchten Bereich aus den PIV-Aufnahmen weist außerdem darauf hin, dass die Gasblasen einen störenden Einfluss auf die Bestimmung der Partikelgeschwindigkeit haben, indem sie das von den Fluoreszenzpartikeln emittierte Licht reflektieren.

Die Anwendung von PIV für die Analyse des Materialabtrags bietet gegenüber dem Schattenbildverfahren den Vorteil, dass in weiteren Versuchen sowohl die herausgelösten Fluoreszenzpartikel aus der künstlichen Gesteinsprobe als auch Tracer Partikel, die dem Wasserstrahl zugegeben werden, in einer Aufnahme detektiert werden können. Die zu verwendenden Tracer Partikel haben mit $10\text{-}20 \mu\text{m}$ einen deutlich kleineren Durchmesser als die Fluoreszenzpartikel mit $60\text{-}250 \mu\text{m}$. Auf einer Aufnahme geben die Tracer Partikel damit ein schwächeres Signal als die größeren Fluoreszenzpartikel und die unterschiedlichen Partikel können über eine geeignete Bildverarbeitung getrennt werden. Der Versuchsaufbau kann außerdem so weiterentwickelt werden, dass eine zeitaufgelöste Messung des Materialabtrags möglich ist. Für die Schattenbildaufnahmen lassen sich diese zeitaufgelösten Messungen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera und entsprechender Hintergrundbeleuchtung realisieren, für die PIV-Aufnahmen ist ein Laser mit einer größeren

Frequenz notwendig. Durch die zeitaufgelöste Messung kann der schnelle Prozess des Materialabtrags beim druckwassergestützten Bohren mit den hier vorgestellten Messmethoden noch eingehender untersucht werden und so Rückschlüsse auf die herrschenden Abtragsmechanismen gezogen werden.

Dankesworte

Dieser Beitrag wird durch das „FH Struktur“ Förderprogramm für Fachhochschulen des Ministeriums für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert (AZ: 322-8.03.04.02 – FH-Struktur 2016/04). Wir danken der Firma LaVision GmbH für die freundliche Leihgabe der ParticleMaster Software.

Literatur

- Brauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T., 2014:** „Handbuch Tiefe Geothermie. Prospektion, Exploration, Realisierung, Nutzung“, Springer, Berlin Heidelberg
- Brook, N., Summers, D. A., 1969:** „The penetration of rock by high-speed water jets“, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 6, No. 3, pp. 249-258
- Chamorro, C.R., García-Cuesta, J.L., Mondéjar, M.E., Pérez-Madrado, A., 2013:** „Enhanced geothermal Systems in Europe: An estimation and comparison of the technical and sustainable potentials“, Energy, Vol. 65, No. 1, pp. 250-263
- Cinelli, S.D., Kamel, A.H., 2013:** „Novel Technique to Drill Horizontal Laterals Revitalizes Aging Field“, SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam
- Farmer, I., Attewell, P., 1965:** „Rock penetration by high velocity water jet“, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 2, No. 2, pp. 135-153
- Hood, M., Nordlund, R., Thimons, E., 1990:** „A study of rock erosion using high-pressure water jets“, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 27, No. 2, pp. 77-86
- Liao, H., Gensheng, L., Can, Y., Niu, J., 2012:** „Experimental Study on the Effects of Hydraulic Confining Pressure on Impacting Characteristics of Jets“, Atomization and Sprays, Vol. 22, No. 3, pp. 227-238
- Pedocchi, F., Ezequiel Martin, J., García, M.H., 2008:** „Inexpensive fluorescent particles for large-scale experiments using particle image velocimetry“, Experiments in Fluids, Vol.45, No. 1, pp. 183-186
- Stober, I., Bucher, K., 2012:** „Geothermie“, Springer, Berlin Heidelberg
- Tian, S., Sheng, M., Li, Z., Ge, H., Li, G., 2017:** „Acoustic Emission Characteristics of Sedimentary Rocks Under High-Velocity Waterjet Impingement“, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 50, No. 10, pp. 2785-2794