

Der Einfluss von Gegendruck auf die Strömung beim druckwassergestützten Bohren unter simulierten Tiefbohrbedingungen

The influence of back pressure on the flow field for water-assisted drilling in submerged reservoir type conditions

Sarah Jasper¹, Jeanette Hussong², und Ralph Lindken¹

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

²AG Lasermesstechnik der Mehrphasenströmungen, Lehrstuhl für Hydraulische Strömungsmaschinen, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum

Turbulenter Strahl, PIV, Kavitation, Umgebungsdruck, Geothermie, Bohrverfahren
turbulent jet, PIV, cavitation, ambient pressure, geothermal energy, drilling method

Zusammenfassung

Die Nutzung von Geothermie zur Wärme- und Stromerzeugung kann zu einer nachhaltigen und klimafreundlichen Energieversorgung in Deutschland beitragen. Durch eine Übertragung der Hochdruckwasserstrahltechnik auf die Tiefbohrtechnik für Geothermieanwendungen können die Kosten gesenkt und die Effizienz gesteigert werden. Das momentan schon bekannte druckwassergestützte Jetting-Verfahren muss dazu so optimiert werden, dass es auch in kristallinem Gestein anwendbar ist. In diesem Beitrag wird deshalb der Einfluss von Gegendruck auf die Strömung beim druckwassergestützten Bohrprozess analysiert. Dazu werden unterschiedliche Hochdruckdüsen hinsichtlich ihrer Neigung zur Kavitation untersucht sowie mittels PIV der Einfluss des Gegendrucks auf die Ausbildung des Hochdruckwasserstrahls untersucht. Mit Hilfe dieser Charakterisierung kann eine Aussage über notwendige Betriebsparameter für das Jetting-Bohrverfahren in Bezug auf die Anwendung getroffen werden.

Einleitung

Hochdruckwasserstrahlen finden in vielen industriellen Verfahren Anwendung, z.B. in der Materialbearbeitung oder in der Reinigungstechnik (Summers 1995). Diese bereits in der Industrie etablierte Technik kann für die Anwendung in der Bohrtechnik übertragen werden, um mit Hilfe der Hochdruckwasserstrahlen einen effektiven Abtrag von Gestein zu erzeugen und ein Bohrloch zu erzielen. Obwohl es in den letzten Jahrzehnten mehrere Untersuchungen auf dem Gebiet des Bohrens und Schneidens von Gestein mit Hochdruckwasserstrahlen gegeben hat, ist der Prozess selbst bisher noch nicht hinreichend verstanden und praktische Anwendungen sind selten (Brook und Summers 1969, Hood et al. 1990). Für die Anwendung in der Tiefbohrtechnik zur Erschließung von geothermischen Lagerstätten gibt es ein großes Potential. Durch einen deutlich größeren Bohrfortschritt gegenüber der konventionellen Bohrtechnik können die Gesamtkosten zur Erschließung von geothermischen Lagerstätten und zur anschließenden Errichtung von Geothermieanlagen deutlich gesenkt werden. Für die nachhaltige Wärme- und Stromversorgung durch die grundlastfähige und ganzjährig nutzbare Geothermie besitzt diese neue Bohrtechnik daher eine gute Möglichkeit für eine kosten-

günstigere Erschließung der vorhandenen Reservoirs. Gerade in Deutschland und Europa liegen die geothermischen Lagerstätten in großen Teufen von ca. 3000 m (Brauer et al. 2014). Die Entwicklung einer kostengünstigen Tiefbohrtechnik ist daher entscheidend.

Insbesondere die Wechselwirkung zwischen Wasserstrahl und Gestein und der damit einhergehende hauptsächliche Erosionsmechanismus sind noch unbekannt. Potenzielle Erosionsmechanismen sind dabei nach Salem Ragab und Kamel (2013):

- *Oberflächenerosion*: Durch die auftretenden Scherkräfte an der Oberfläche des Gesteins wird durch das strömende Fluid ein Abtrag generiert.
- *hydraulische Bruchbildung*: Das Fluid dringt in mikroskopisch kleine Risse im Gestein ein und erhöht so die Spannung im Gestein. Werden Grenzspannungen überschritten, die durch die Druckfestigkeit des Gesteins festgelegt sind, weiten sich die Fehlstellen aus und es kommt zur Bruchbildung.
- *poroelastisches Spannungsversagen*: Das Fluid dringt in die Poren des Gesteins ein. Durch Druckfluktuationen im Fluid werden Spannungen in den Poren erzeugt, die ein Materialversagen hervorrufen können.
- *Kavitationserosion*: Durch das Implodieren von in der Strömung mitgeführten Kavitationswolken in der Nähe der Gesteinsoberfläche werden Druckstöße in der Größenordnung von mehreren 100 MPa auf das Gestein übertragen (Brennen 1995). Dies führt zum Materialabtrag.

Bisher wurden die möglichen Erosionsmechanismen nach Abschluss des Bohrprozesses untersucht. Parameterstudien mit Variation des Durchflusses, des Arbeitsabstands zwischen Hochdruckdüse und Gesteinsoberfläche, verschiedenen Düsentypen, dem Einsatz von Abrasivmitteln sowie erhöhtem Umgebungsdruck wurden hierzu durchgeführt (z.B. Liao et al. 2012, Lu et al. 2013, Stoxreiter et al. 2018). Der Prozess während des eigentlichen Bohrvorgangs sowie die strömungsmechanischen Zusammenhänge sind noch nicht untersucht worden und daher Teil der aktuellen Forschung (Gradzki et al. 2019).

In dem vorliegenden Beitrag wird zunächst das Auftreten von Kavitationserosion als einer der möglichen Erosionsmechanismen in Abhängigkeit des Gegendrucks untersucht. Ergänzend dazu wird der Bohrprozess selbst, im Besonderen die Strömung beim Bohrprozess untersucht. Dazu wird eine PIV Analyse des Hochdruckwasserstrahls in Druckbeaufschlagter Umgebung durchgeführt. Der Einfluss des Gegendrucks auf den Bohrprozess ist von Interesse, da bei der Durchführung einer Tiefbohrung der Gegendruck mit steigender Teufe ansteigt. Dabei addiert sich zu dem hydrostatischen Fluidruck der umgebenden Wassersäule der lithostatische Druck durch die Gesteinsformation, der zusätzlich um ungefähr 2,5 MPa pro 1000 m zunimmt (Pashin 2008). Dies hat einen Einfluss das Auftreten von Kavitation in der Hochdruckdüse und somit auch auf die Ausbildung des Hochdruckwasserstrahls.

Experimenteller Aufbau

Die Experimente werden in einem Hochdruckbehälter durchgeführt, der für Gegendrücke von bis zu 50 MPa und Temperaturen bis zu 40°C ausgelegt ist. Der Behälter hat einen Innendurchmesser von 65 mm und eine Höhe von 400 mm. Der Düsenvordruck und der Gegendruck werden mit Drucksensoren gemessen, Durchfluss und Temperatur werden induktiv gemessen. Zur Erzeugung des Hochdruckwasserstrahls wird eine Triplex-Plunger Hochdruckpumpe mit einem maximalen Ausgangsdruck von 20 MPa und einer maximalen Fördermenge von 54 l/min eingesetzt. Der Düsenvordruck wird durch ein Pneumatik Ventil am Pumpenausgang geregelt. Der gewünschte Druckabfall über die Düse wird dann durch ein Überdruckventil am Behälter geregelt, durch das der Gegendruck im Behälter eingestellt wird.

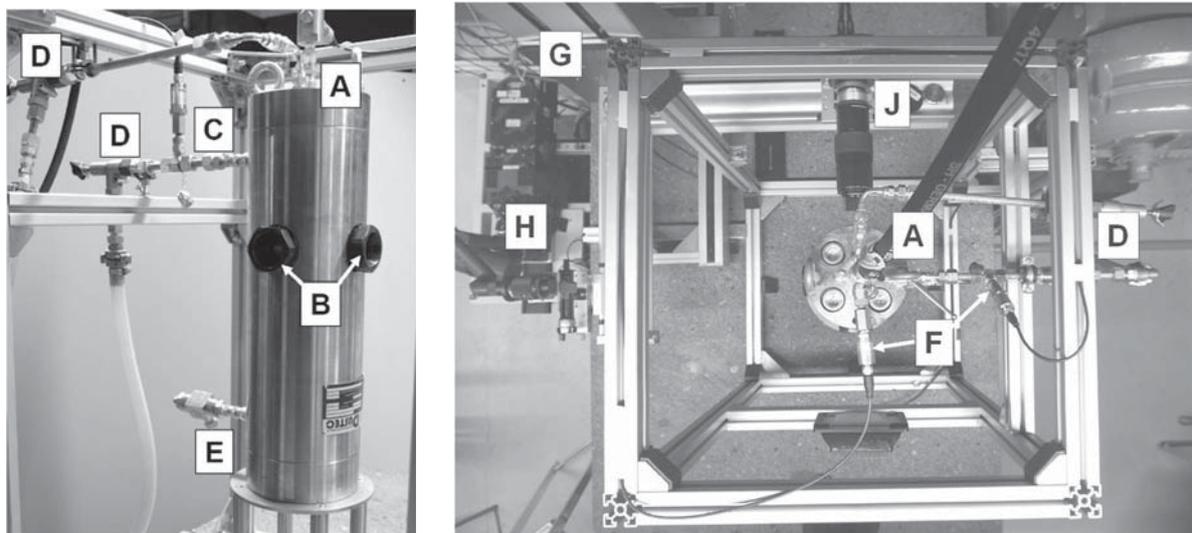


Abb. 1: Hochdruckbehälter mit Fluideinlass (A), Saphirglasfenstern (B), Drucksensoren (C, F), Überdruckventilen (D) und zusätzlichem Fluidauslass (E). Draufsicht auf den Prüfstand für PIV Messungen im Hochdruckbehälter mit Kamera und Makroobjektiv (J), Laseroptik (H), Traversierung (G).

Tab. 1: Parameter der verwendeten Hochdruckdüsen

Name	Typ	Max. zulässiger Düsenvordruck
N1	Saphireinschraubdüse	300 MPa
N2	Saphireinschraubdüse, mit Strömungsgleichrichter	300 MPa
N3	Saphirdüse	120 MPa
N4	Edelstahldüse	30 MPa

Die Experimente zur Bestimmung der Kavitationsgebiete wurden mit verschiedenen Hochdruckdüsen durchgeführt, s. Tabelle 1. Alle Düsen haben einen Austrittsdurchmesser von 1,8 mm. Der hauptsächliche Unterschied liegt in dem verwendeten Material sowie der Geometrie am eingeschraubten Saphireinsatz. Die Düsen N1, N2, N3 haben einen Saphireinsatz, während die Düse N4 aus gehärtetem Edelstahl gefertigt ist. Die Düse N2 verfügt über einen zusätzlichen Strömungsgleichrichter. Alle Düsen sind zu Beginn der Experimente neu, d.h. sie weisen noch keine Betriebsstunden auf und sind verschleißfrei.

Der optische Zugang für PIV Messungen im Hochdruckbehälter ist über drei Saphirfenster mit einem optischen Durchmesser von 35 mm gewährleistet, die jeweils in einem 90°-Winkel zueinander angeordnet sind. Eine 16-Bit-sCMOS Kamera (LaVision sCMOS, 2550x2160 Pixel) mit einem Zeiss Yashica Makroobjektiv und einem Nd:YAG Doppelpulslaser (Quantel Evergreen 200, 15 Hz, 532 nm, Pulslänge 5ns) werden über eine Zeiteinheit (LaVision, PTU X) synchronisiert. Die aufgenommenen Bilder haben eine Abmessung von 16,3 x 13,8 mm mit einer räumlichen Auflösung von 6,4 µm/Pixel.

Kavitationsgebiete verschiedener Hochdruckdüsen

Zunächst wird das Auftreten von Kavitation in Abhängigkeit des Gegendrucks untersucht. Dazu wird das dimensionslose Druckverhältnis P^* als Verhältnis von Umgebungsdruck P_U , d.h. Gegendruck, und Düsenvordruck P_D definiert:

$$P^* = P_U / P_D \quad [1]$$

Die Verwendung dieses dimensionslosen Druckverhältnisses ermöglicht einen Vergleich der verschiedenen Hochdruckdüsen, selbst wenn der Düsenvordruck unterschiedlich ist. Die

verwendeten Versuchsparameter für die Untersuchung der Kavitationsgebiete sind in Tabelle 2 zu finden. Der Effekt von Gegendruck auf das Abklingen von Kavitation in der Hochdruckdüse ist in Abbildung 2 beispielhaft visualisiert. Mit steigendem Gegendruck wird die Länge der Kavitationswolke, die nach dem Düsenaustritt zu erkennen ist, bei gleichbleibendem Düsenvordruck stetig kleiner. Ab einem Druckverhältnis von $P^* = 0,6$ ist keine Kavitationswolke mehr zu erkennen.

Tab. 2: Übersicht der Versuchsparameter für die Untersuchung der Kavitationsgebiete verschiedener Hochdruckdüsen

Parameter		Dimension	Wert
Düsenvordruck	P_D	MPa	2,5 – 15,0
Umgebungsdruck / Gegendruck	P_U	MPa	0 – 15,0
Druckverhältnis	P^*	-	0 – 1,0
Volumenstrom	Q	l/min	0 – 19,5
Temperatur	T	°C	25 – 40

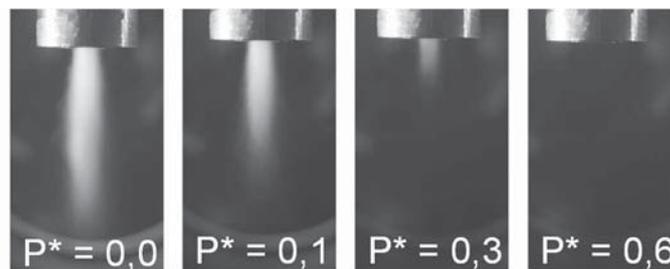


Abb. 2: Kavitationsverhalten einer Hochdruckdüse (N1) in Abhängigkeit des dimensionslosen Druckverhältnisses $P^* = P_U / P_D$. Unterhalb der Düse sind die durch Lichtstreuung weiß erscheinenden Kavitationsblasen deutlich vor dem mit Wasser gefüllten schwarzen Hintergrund zu sehen.

Ergänzend zur optischen Beobachtung wird der Durchfluss gemessen. Bilden sich im Düsenaustritt Gasblasen durch Kavitation oder Entgasung, kann sich eine gedrosselte Strömung einstellen („choked flow“). Dieses Phänomen entsteht durch die geringere Schallgeschwindigkeit einer Zweiphasenströmung im Vergleich zur entsprechenden Einphasenströmung (Kieffer 1977, Radovskii 1973). In einer gedrosselten Strömung ist der Durchfluss keine Funktion des Druckabfalls über die Düse, sondern erreicht ein Maximum. Das Abklingen von Kavitation kann daher durch Beobachtung des Durchflusses bei verschiedenen Düsenvordrücken bestimmt werden.

Abbildung 3 zeigt die Abhängigkeit des normierten Durchflusses vom Druckverhältnis P^* der Hochdruckdüse N1. Die Tendenzen für verschiedene Düsenvordrücke von 2,5 - 15,0 MPa sind gleich und es kann keine Abhängigkeit vom Düsenvordruck festgestellt werden. Der Durchfluss bleibt zunächst bis zu einem Druckverhältnis von $P^* = 0,6$ konstant und fällt dann ab. Für ein Druckverhältnis kleiner als $P^* = 0,6$ liegt also eine Zweiphasenströmung und somit Kavitation im Düsenaustritt vor. Die Messungen decken sich mit den optischen Beobachtungen aus Abbildung 2. Ein Vergleich der in Tabelle 1 genannten Hochdruckdüsen bei einem gleichbleibenden Düsenvordruck von 10,0 MPa zeigt ein unterschiedliches Verhalten, vgl. Abbildung 4. Die Hochdruckdüsen N1-N3 zeigen ein ähnliches Verhalten, bei dem die Kavitation ab einem Druckverhältnis von $P^* = 0,6$ abklingt. Die Ähnlichkeit ist im Aufbau der Düsen begründet, da alle drei Hochdruckdüsen einen Sapphireinsatz haben. Die Hochdruckdüse N4 aus gehärtetem Edelstahl zeigt jedoch ein abweichendes Verhalten. Hier ist im untersuchten Bereich keine klare Abgrenzung in einen kavitierenden und einen nicht kavitierenden Bereich zu erkennen. Das Ergebnis deutet darauf hin, dass das Kavitationspotential dieser Hochdruckdüse deutlich geringer ist als das der anderen untersuchten Hochdruckdüsen.

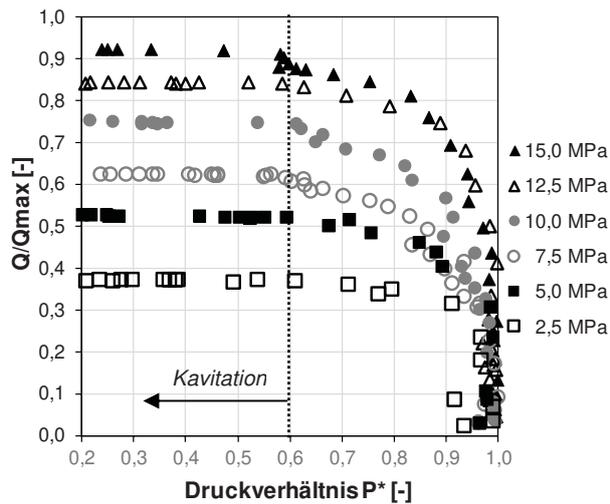


Abb. 3: Kavitationsverhalten der Hochdruckdüse N1 als Funktion des dimensionslosen Druckverhältnisses P^* für unterschiedliche Düsenvordrücke von 2,5 - 15,0 MPa, Durchfluss normiert.

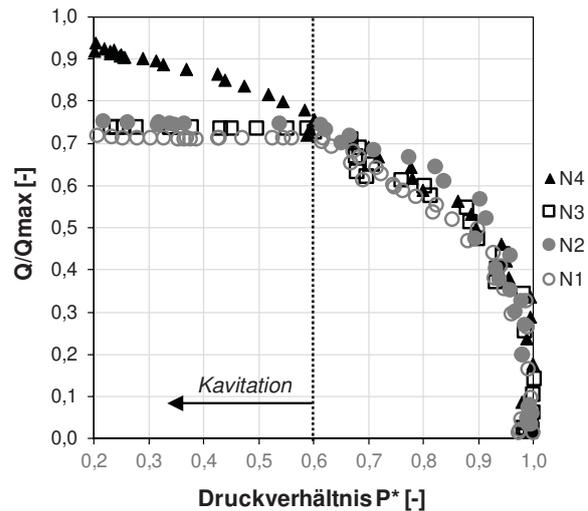


Abb. 4: Kavitationsverhalten verschiedener Hochdruckdüsen als Funktion des dimensionslosen Druckverhältnisses P^* für einen Düsenvordruck von 10,0 MPa, Durchfluss normiert.

Für die Anwendung in der Tiefbohrtechnik ist das Kavitationsverhalten verschiedener Hochdruckdüsen vor allem im Hinblick auf die Strömung von entscheidender Bedeutung, da durch das Auftreten von Kavitationswolken der intakte Hochdruckwasserstrahl aufgebrochen werden kann. Außerdem ist diese Charakteristik eine hilfreiche Information bezogen auf den vorherrschenden Erosionsmechanismus für die Gesteinszerstörung. Sobald beim Bohrprozess ein Druckverhältnis von $P^* = 0,6$ bei den Sapphireinschraubdüsen überschritten wird, kann Kavitationserosion als treibender Erosionsmechanismus ausgeschlossen werden. Ebenfalls ist es auf Grund des geringeren Düsenverschleiß wünschenswert, in diesem nicht kavitierenden Bereich zu Arbeiten. Die Hochdruckdüse aus gehärtetem Edelstahl zeigt diesbezüglich zwar Vorteile, da es keine klar erkennbare Kavitation gibt, ist jedoch nur für Düsenvordrücke von bis zu 30 MPa ausgelegt.

Einfluss des Gegendrucks auf die Ausbildung des Hochdruckwasserstrahls

Der Einfluss des Gegendrucks auf die Ausbildung des Hochdruckdruckwasserstrahls wird in diesem Beitrag für die Düsen N1 und N3 dargestellt. Eine Übersicht über die Versuchsparameter gibt Tabelle 3. Für die PIV Analyse wurden je Messpunkt 500 Doppelbilder mit einer Frequenz von 13 Hz aufgenommen und die Größe der kleinsten Auswertefenster auf 32×32 Pixel mit einer Überlappung von 50% gewählt. Der Zeitabstand zwischen der Belichtung liegt bei $1,6 \mu\text{s}$ für die Druckdifferenz von $\Delta P = 2 \text{ MPa}$ und bei $1,0 \mu\text{s}$ für die Druckdifferenz von $\Delta P = 5 \text{ MPa}$. Aus den 500 momentanen Geschwindigkeitsverteilungen wird für jeden Messpunkt eine durchschnittliche Geschwindigkeitsverteilung berechnet.

Tab. 3: Übersicht der Versuchsparameter für die PIV Messungen

Parameter	Dimension	Wert
Düsenvordruck	P_D	MPa
Umgebungsdruck / Gegendruck	P_U	MPa
Druckverhältnis	P^*	-
Volumenstrom	Q	l/min
Temperatur	T	°C

Die mit DaVis 8.3 erzeugten Vektorfelder werden mit einem Matlab Tool weitergehend verarbeitet. Mit diesem Tool werden die Kernlänge l_K sowie der Strahlwinkel α des Hochdruckwasserstrahls für jeden Messpunkt bestimmt. Beide Größen sind dabei auf die maximale Austrittsgeschwindigkeit u_{\max} bezogen:

$$l_K = 0,9 \times u_{\max} \quad [2]$$

$$\alpha = 0,1 \times u_{\max} \quad [3]$$

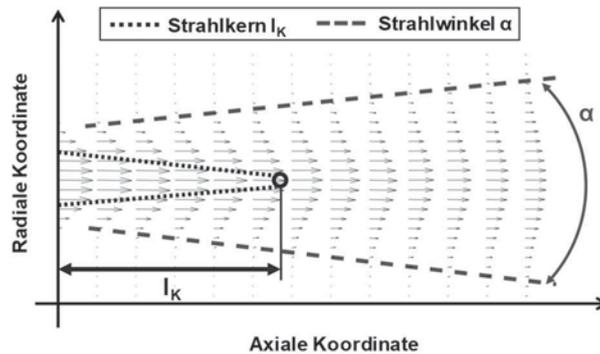


Abb. 5: Beispielhafte Darstellung der Auswertung für die Länge des Strahlkerns l_K sowie des Strahlwinkels α für ein aus 500 Doppelbildern gemitteltes Geschwindigkeitsfeld.

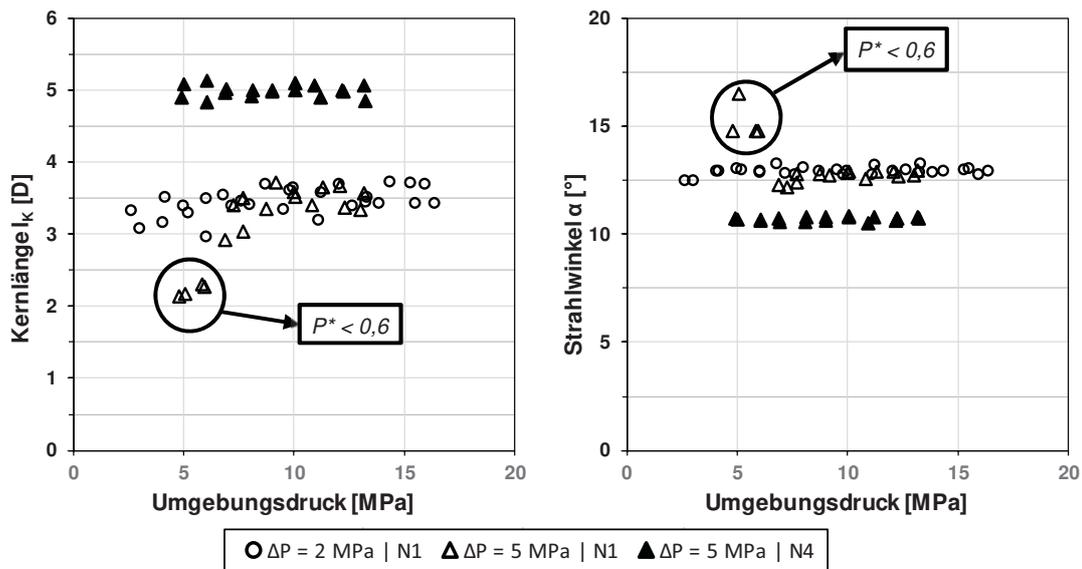


Abb. 6: Dimensionslose Kernlänge (links) und Strahlwinkel (rechts) der mit den Düsen N1 und N4 erzeugten Hochdruckwasserstrahlen für Druckdifferenzen von $\Delta P = 2 \text{ MPa}$ und $\Delta P = 5 \text{ MPa}$ in Abhängigkeit vom Umgebungsdruck.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 6 dargestellt. Die Kernlänge ist mit dem Düsenaustrittsdurchmesser normiert. Mit einer Länge von $5,0 D \pm 0,2 D$ bleibt der Kern des mit der Düse N4 erzeugten Wasserstrahls über den gesamten untersuchten Druckbereich von 5 - 13 MPa nahezu konstant. Ähnlich konstant verhält sich die Kernlänge mit $3,5 D \pm 0,3 D$ für den mit der Düse N1 bei einer Druckdifferenz von $\Delta P = 2 \text{ MPa}$ erzeugten Wasserstrahl. Die gleiche Düse N1 zeigt bei einer Druckdifferenz von $\Delta P = 5 \text{ MPa}$ bei einem Umgebungsdruck von $P_U > 7,5 \text{ MPa}$ ebenfalls eine gleichbleibende Kernlänge von $3,5 D \pm 0,3 D$. Hier zeigt auch die unterschiedliche Druckdifferenz keinen Einfluss auf die Kernlänge. Im Gegensatz dazu verringert sich die Kernlänge ab einem Umgebungsdruck von $P_U < 7,5 \text{ MPa}$ klar auf unterhalb $2,5 D$. Hier zeigt der Umgebungsdruck einen deutlichen Einfluss auf die Kernlänge. Der ebenfalls in Abbildung 6 dargestellte Strahlwinkel ändert sich

nach demselben Muster wie die Kernlänge, wobei der Strahlwinkel für die Düse N1 mit $12,5^\circ$ größer ist als für die Düse N4 mit 10° . Die absoluten gemittelten Geschwindigkeiten am Düsenaustritt liegen für die Druckdifferenz von $\Delta P = 2 \text{ MPa}$ bei $u_{\max} = 63 \text{ m/s}$ und für die Druckdifferenz von $\Delta P = 5 \text{ MPa}$ bei $u_{\max} = 102 \text{ m/s}$ für Düse N1 bzw. $u_{\max} = 100 \text{ m/s}$ für Düse N4 für alle jeweiligen Messpunkte.

Der Grund für die Unterschiede in der Kernlänge und dem Strahlwinkel ist im Auftreten von Kavitation in der Düse zu sehen. Besonders deutlich wird dies bei Düse N1, in der unterhalb eines Druckverhältnisses von $P^* = 0,6$ Kavitation einsetzt (vgl. Abbildung 4). Eben diese Messpunkte zeigen eine deutlich geringere Kernlänge und einen größeren Strahlwinkel. Durch Implosion der Kavitationsblasen im Wasserstahl werden turbulente Schwankungen hervorgerufen, sodass der kohärente Strahlkern gestört und aufgebrochen wird. Ein weiterer Effekt der Kavitation im Düsenaustritt ist die Verringerung des effektiven Düsenquerschnitts und somit auch des anfänglichen Strahldurchmessers. Die Scherkräfte am Rand des Wasserstrahls führen durch den geringen Strahldurchmesser zu einem höheren Impulsaustausch mit der Strahlmitte und somit zu einem höheren Geschwindigkeitsabfall. Dies resultiert in einer geringeren Kernlänge und damit in einem größeren Strahlwinkel. Sowohl für die geringere Druckdifferenz von $\Delta P = 2 \text{ MPa}$ bei Düse N1 als auch bei der Düse N4 sind keine Änderungen in der Kernlänge oder dem Strahlwinkel zu sehen, da für diese Parameter für beide Düsen keine Kavitation auftritt (vgl. Abbildung 4). Die absolute Geschwindigkeit zeigt hingegen kein Einfluss auf Kernlänge und Strahlwinkel. So liegen für die untersuchten Druckdifferenzen die Werte für diese Größe bei derselben Düse N1 in demselben Bereich.

Die Kernlänge und der Strahlwinkel sind für die Anwendung in der Bohrtechnik ein wichtiger Indikator für den möglichen Abtrag. Dieser kann z.B. mit Hilfe des Energieeintrags auf die Gesteinsoberfläche charakterisiert werden. Der Energieeintrag des Wasserstahls wird dabei durch seine Geschwindigkeit sowie seiner geometrische Form bestimmt. Die Kernlänge, d.h. die Zone des Wasserstrahls mit annähernd gleich bleibend hoher Geschwindigkeit, ist ein Faktor, um den optimalen Arbeitsabstand zwischen Hochdruckdüse und Gesteinsoberfläche zu bestimmen. Der Strahlwinkel beschreibt in Abhängigkeit vom gewählten Arbeitsabstand die maximale Fläche, die erodiert werden kann.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde das Kavitationspotential verschiedener Hochdruckdüsen in Abhängigkeit vom Gegendruck untersucht. Durch die Überwachung des Durchflusses wurde für jede der untersuchten Hochdruckdüsen ein Bereich mit Kavitation und ein Bereich ohne Kavitation identifiziert. Im Gegensatz zu den untersuchten Saphirdüsen zeigt die Düse aus gehärtetem Edelstahl kein Auftreten von Kavitation. Die Ergebnisse der anschließenden PIV Messungen bestätigen dies. Die Kernlänge sowie der Strahlwinkel werden deutlich von auftretender Kavitation beeinflusst und sind in diesem Bereich deutlich kleiner als für eine nicht kavitierende Strömung.

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass das Auftreten von Kavitation beim Tiefbohren stark von den Betriebsbedingungen abhängt. Liegt das Druckverhältnis von Umgebungsdruck im Bohrloch und Düsenaustrittsdruck unter einem kritischen Wert, wird Kavitation unterdrückt. Dieser kritische Wert muss wie die Experimente zeigen für jeden Düsentyp einzeln ausgewertet werden. Liegt das Druckverhältnis während des Bohrprozesses dann oberhalb des kritischen Werts, ist die Wahrscheinlichkeit von Kavitationserosion sehr gering und wird daher nicht der bestimmende Erosionsmechanismus sein.

Dankesworte

Dieser Beitrag wird zum einen durch das „FH Struktur“ Förderprogramm für Fachhochschulen des Ministeriums für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (AZ: 322-8.03.04.02 – FH-Struktur 2016/04), zum anderen durch das EU-Rahmenprogramm für Forschung und Innovation (Horizon 2020) im Projekt SURE (grant agreement No 654662) gefördert.

Literatur

Brauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T., 2014: „Handbuch Tiefe Geothermie. Prospektion, Exploration, Realisierung, Nutzung“, Springer, Berlin Heidelberg.

Brennen, C.E., 1995: „Cavitation and Bubble Dynamics“, Oxford University Press, New York Oxford.

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.

Gradzki, D.P., Hahn, S., Jasper, S., Wittig, V., Lindken, R., Bracke, R., 2019: „High pressure jetting in various rocks - Investigation of failure mechanism and development of drilling process“ in: Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects, Litvinenko, V. (Ed.), pp. 65-77, Taylor & Francis Group, London.

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.

Kieffer, S.W., 1977: „Sound speed in liquid-gas mixtures“, Journal of Geophysical Research, Vol. 82, No. 20, pp.2895-2904.

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.

Lu, Y., Tang, J., Ge, Z., Xia, B., Liu, Y., 2013: „Hard rock drilling technique with abrasive water jet assistance“, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 60, pp. 47-56.

Pashin, J.C., 2008: „Coal as Petroleum Source Rock and Reservoir Rock“ in Applied coal petrology, Ruiz, I.S. und Crelling, J.C. (Hrsg), pp. 227-262, Elsevier / Academic Press, Amsterdam und Boston.

Radovskii, I.S., 1973: „Speed of sound in two-phase vapor-liquid systems“, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, Vol. 11, No. 5, pp.778-784.

Salem Ragab, A.M., Kamel, A.M., 2013: „Radial Drilling Technique for Improving Well Productivity in Petrobel-Egypt“, North Africa Technical Conference and Exhibition 2013, Cairo, Egypt, SPE-164773-MS, pp. 1-12.

Stoxreiter, T., Martin, A., Teza, D., Galler, R., 2018: „Hard rock cutting with high-pressure jets in various ambient pressure regimes“, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 108, pp. 179-188.

Summers, D.A., 1995: „Waterjetting Technology“, Taylor & Francis, New York.