

BHM (2018) Vol. 163 (12): 504–508
<https://doi.org/10.1007/s00501-018-0791-z>
 © Der/die Autor(en) 2018

BHM Berg- und
 Hüttenmännische
 Monatshefte

Schneiden von Hartgestein mit Hochdruckstrahlen unter simulierten Bohrlochbedingungen

Thomas Stoxreiter¹, Antony Martin², Dimitra Teza³ und Robert Galler¹

¹Lehrstuhl für Subsurface Engineering, Department Mineral Resources Engineering, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

²RAG Energy Drilling GmbH, Schwarzmoos, Österreich

³BESTEC GmbH, Landau, Deutschland

Eingegangen 2. November 2018; angenommen 5. November 2018; online publiziert 15. November 2018

Zusammenfassung: Im Rahmen des EU-Forschungsprojektes „ThermoDrill“ wird eine alternative Bohrtechnologie entwickelt, eine Kombination aus Hochdruckfluidstrahlen und mechanischem Bohren. Um die Wirksamkeit bzw. Effizienz der Hochdruckstrahlen zum Schneiden von Hartgesteinsformationen zu untersuchen, wurden Versuche unter verschiedenen Umgebungsbedingungen durchgeführt. Kernproben von diversen (Geothermie-)Bohrungen wurden unter atmosphärischen Bedingungen getestet und ermöglichten dadurch eine solide Grundlage für den Vergleich der Schneidbarkeit verschiedener Gesteinstypen. Um Bohrlochverhältnisse in großer Tiefe möglichst realitätsnah zu simulieren, wurde eine Druckzelle mit einem maximalen Innendruck von 450 bar konstruiert und gebaut. Die Experimente zeigen, dass die Schneidleistung bei veränderten Umgebungsdruckbedingungen sich völlig von jener unter atmosphärischen Bedingungen unterscheidet. Die wichtigsten Einflussgrößen wurden ermittelt und die Parameter für eine ausreichende Schnitttiefe, auch unter Bohrlochbedingungen, spezifiziert. Die Studie zeigt, dass Hochdruckfluidstrahlen unter allen getesteten Umgebungsbedingungen in der Lage sind, ausreichend tiefe Kerben in Hartgestein zu erzeugen.

Schlüsselwörter: Hochdruckfluidstrahlen, Tiefe geothermische Bohrungen, ThermoDrill

Hard Rock Cutting with High Pressure Jets Under Simulated Borehole Conditions

Abstract: In the frame of the EU research project “ThermoDrill”, an alternative drilling technology is under development, where high pressure jetting is combined with mechanical drilling techniques. In order to investigate the cutting performance of the fluid jets in hard rock formations, experiments under various ambient conditions were performed. Core samples from several drilling sites were tested under atmospheric conditions and enabled a solid basis for the comparison of the jettability of different hard rock formations. To simulate deep downhole conditions as realistically as possible, a pressure vessel capable of up to 450 bar internal pressure was designed and built. The experiments, performed under different ambient pressure regimes, differ completely in their cutting performance from that under atmospheric conditions. The main influencing parameters were determined and adapted to enable a sufficient performance for all tested conditions. The study shows that high pressure jetting is feasible in the challenging simulated downhole environment.

Keywords: High pressure jetting, Deep geothermal drilling, ThermoDrill

1. Problemstellung

Die Nutzung geothermischer Energie, insbesondere in Form von EGS (Enhanced Geothermal Systems), wird als einer der zukünftigen Eckpfeiler der europäischen Strategie für erneuerbare Energien betrachtet. Aufgrund der zumeist großen Tiefe geeigneter geologischer Formationen und Gesteinstemperaturen machen die Bohrkosten oft mehr als die Hälfte der Gesamtkosten für EGS-Projekte aus. Um die Bohrgeschwindigkeit (ROP) zu erhöhen und damit die Bohrkosten zu senken, wird im Rahmen des EU-

Dipl.-Ing. T. Stoxreiter (✉)
 Lehrstuhl für Subsurface Engineering, Department Mineral Resources Engineering,
 Montanuniversität Leoben,
 Erzherzog-Johann-Straße 3,
 8700 Leoben, Österreich
 thomas.stoxreiter@unileoben.ac.at

Forschungsprojekts „ThermoDrill“ ein alternatives Bohrsystem entwickelt. Kernstück des Projektes ist ein hybrides Bohrsystem, bestehend aus konventionellem Drehbohren in Kombination mit Hochdruckfluidstrahlen.

Das Konzept, mechanische und hydraulische Gesteinslösemechanismen zu Bohrzielen zu kombinieren, existiert bereits seit Jahrzehnten. Eine der ersten Referenzen findet sich im US-Patent von Bobo [1] von 1963. Der Ansatz bestand darin, mit einem Druckübersetzer im Bohrloch den Hochdruck zu erzeugen, durch den Bohrkopf zu den Düsen zu übertragen, um schließlich als Fluidstrahl mit hoher Geschwindigkeit auf die Bohrlochsohle aufzutreffen und eine Kerbe entlang des Umfangs der Bohrlochsohle zu schneiden. Der mittlere Teil der Bohrlochsohle sollte dann leichter zu bohren sein, was sich in einer deutlich erhöhten Bohrgeschwindigkeit (ROP) äußern würde. Nachfolgende Konzepte, z. B. Shi et al. [2], Veenhuizen et al. [3] und Kolle et al. [4], basieren alle im Grunde auf dieser Ausgangsidee, obwohl die technische Umsetzung, Bohrkopf- und Düsenkonfiguration sowie verwendete Fluide unterschiedliche Ansätze verfolgten. Laborversuche von Geier & Hood [5] und Fenn [6] mit PDC-Einsätzen und Schneidplatten an vorgeschädigten Gesteinsproben bestätigten den günstigen Einfluss der geschnittenen Kerben auf die mechanische Gesteinslösung. Eine Studie über die auftretenden physikalischen Effekte beim Hochdruckfluidschneiden auf den mechanischen Gesteinszerstörungsprozess und eine Abschätzung der Grenzbedingungen wird von Hlaváč [7] gegeben.

Die meisten Experimente wurden jedoch bisher unter atmosphärischen Bedingungen durchgeführt, welche nicht der tatsächlichen Situation im Bohrloch entsprechen. Über die Anwendung des Hochdruckschneidens unter Bohrlochbedingung bei signifikantem Gegendruck ist nur sehr eingeschränkt Fachliteratur verfügbar. Als Gegendruck wird in diesem Beitrag der Druck in der Flüssigkeitsschicht zwischen dem Düsenaustritt und dem zu schneidenden Objekt bezeichnet, der Gegendruck entspricht also dem Zelldruck. Hlaváč et al. [8, 9] führten experimentelle Studien über die Schneidleistung von Unterwasserstrahlen durch und stellten Vergleiche der Ergebnisse mit der vorhergesagten Eindringtiefe an, basierend auf der u. a. in [10, 11] vorgestellten Theorie. Poláček & Janurová [12] führten Versuche mit sehr ähnlichem Aufbau in einem erweiterten Druckbereich (einschließlich Vakuum) durch, wobei sie idente theoretische Grundlagen zum Vergleich verwendeten wie Hlaváč [8, 9].

Der maximale Druck in der Kammer betrug 12 bar bzw. 16 bar, daher lassen sich für den angestrebten Gegendruckbereich von 300–500 bar für Tiefbohrungen nur wenige Rückschlüsse ziehen. Dennoch konnte bereits bei geringem Gegendruck eine deutliche Abnahme der Schneidleistung beobachtet werden.

Reichman fasste in seinem Bericht [13] die Ergebnisse von Schneidversuchen mit Hochdruckstrahlen an Granitproben unter Gegendrücken von bis zu 3000 psi (ca. 207 bar) mit einem maximalen Düsendurchmesser von 0,45 mm und einem Staudruck von 45.000 psi (3100 bar) zusammen. Bei einem maximalen Gegendruck von 207 bar war keine Schneidleistung mehr feststellbar. Kolle [14] beobachtete ähnliche Effekte bei seinen Experimenten an Sandstein-, Kalkstein- und Schieferproben in einer

Druckkammer mit einem maximalen Innendruck von bis zu 1330 bar, bei einer maximalen Düsengröße von 0,36 mm und variablem Düsenabstand.

Da sich in allen Referenzen die Schlussfolgerung findet, dass die Schneidwirkung bei hohem Umgebungsdruck verschwindet, existiert praktisch keine Möglichkeit, mit den vorhandenen Informationen die grundlegenden Anforderungen an das Hochdrucksystem zu definieren. Die Erzeugung von mindestens einer ausreichend tiefen Kerbe in der Bohrlochsohle wird jedoch als unabdingbare Voraussetzung für eine deutliche Erhöhung der ROP angesehen. Deshalb wurde eine umfangreiche experimentelle Studie durchgeführt, um geeignete Strahlparameter unter Berücksichtigung verschiedener Umgebungsbedingungen zu ermitteln. Insbesondere die Schneidleistung von Hochdruckfluidstrahlen unter Gegendrücken von bis zu 450 bar wurde mit einem neu entwickelten Druckbehälter detailliert untersucht. Im Gegensatz zu den bisherigen Ergebnissen für Experimente unter vergleichbaren (Labor-) Bedingungen konnte eine ausreichende Schneidleistung erreicht werden. Mit den generierten Daten wurden die wesentlichen Anforderungen an das neue Hochdrucksystem definiert.

2. Experimente unter atmosphärischen Bedingungen

Die Versuche unter atmosphärischen Bedingungen wurden primär durchgeführt, um die grundsätzlichen Zusammenhänge zwischen Staudruck, Düsendurchmesser, Düsenabstand und Schneidleistung, aber auch den Unterschied zwischen Abrasiv- und Reinwasserstrahlschneiden zu definieren. Der Großteil der Versuche wurde mit Neuhauser Granit durchgeführt, welcher einen Grenzdruck von ca. 1000 bar aufweist. Der Grenzdruck ist jener Staudruck, der notwendig ist, um eine messbare Kerbe im Gestein zu erzeugen. Die Parameter und Ergebnisse der linearen Schneidversuche sind qualitativ und quantitativ weitgehend konsistent mit den Ergebnissen anderer experimenteller Studien. Beispielsweise führten Harris & Mellor [15] vergleichbare Reinwasserstrahlversuche an drei verschiedenen Lithologien mit ähnlichen Randbedingungen und analogen Ergebnissen durch. Eine umfassende Studie über die Schneidleistung von vergleichbarem Granit mit Abrasivwasserstrahlen wurde von Karakurt et al. [16] sowie von Aydin et al. [17] durchgeführt. Sowohl die Gesteinseigenschaften und Versuchsparameter als auch die Ergebnisse sind mit den aktuellen Experimenten vergleichbar und daher gehen die Autoren in diesem Artikel nicht näher auf diese Experimente ein. Detaillierte Ergebnisse zu diesen Versuchen können auch [18] entnommen werden.

3. Experimente unter Bohrlochbedingungen

3.1 Versuchsaufbau und Messsystem

Die Druckzelle wurde speziell für die Anforderungen des Projektes konzipiert und vom Lehrstuhl für Petroleum

Abb. 1: Versuchsaufbau für die Experimente unter Bohrlochbedingungen



and Geothermal Energy Recovery gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Subsurface Engineering in Zusammenarbeit mit dem Institut für Physik entwickelt. Der Druckbehälter wurde für Gesteinsproben mit einem Durchmesser von 220 mm ausgelegt, was in etwa dem Bohrkopfdurchmesser von 8 1/2 Zoll entspricht. Die Standardhöhe der Probe betrug 90 mm, konnte aber bei Bedarf geändert werden. Die zentrische Lage der Probe wurde durch die Form des Drehtisches, auf dem die Gesteinsprobe platziert wurde, sichergestellt.

Der Drehtisch war auf einem Zylinderrollenlager montiert und über eine abgedichtete Welle mit Kupplung, Stirnradgetriebe und Motor verbunden. Ein Frequenzumrichter ermöglichte eine stufenlose Regelung der Drehzahl von 0–120 U/min. Durch den Einsatz von Düsenhaltern mit unterschiedlichen Längen und den damit verbundenen unterschiedlichen Abständen zur Gesteinsoberfläche konnte der Düsenabstand innerhalb von 2 bis 15 mm variiert werden. Die Höhe jeder Probe wurde gemessen, um zu überprüfen, ob der vorab festgelegte Düsenabstand eingehalten wurde. Eine zulässige Abweichung von ± 1 mm wurde akzeptiert. In der Regel wurde pro Versuch nur ein Düsenhalter in einer der fünf abgedichteten Öffnungen im Deckel platziert. Um sicherzustellen, dass sich die Probe zusammen mit dem Teller dreht, wurden in jede Gesteinsprobe drei Löcher mit kleinem Durchmesser gebohrt und über Metallstifte mit den Mitnehmerleisten des Drehtisches verbunden. Der Druck im Inneren des Behälters wurde über zwei Manometer gemessen und über ein Druckregelventil, das sich auf einer Bohrung in der Mitte des Deckels befindet, gesteuert.

In der finalen Konfiguration des Versuchsaufbaus erfolgte die Druckerzeugung im Behälter über eine konstante Zuführung mittels einer elektrischen Pumpe mit max. 500 bar und 10 l/min (Abb. 1). Zusätzlich wurde über dem Schneidkopf ein HBM P3MB Druckaufnehmer mit direktem Anschluss an einen Messverstärker montiert, um den Staudruck zu überwachen. Die Druckschwankungen auf-

grund der Betriebsart der HD-Pumpe liegen im Bereich von ± 200 bar um den Mittelwert. Um einen definierten Druckwert für die anschließende Auswertung zu erhalten, wurde der Mittelwert durch Integration der Druckfunktion über die Trapezregel und anschließende Division der Ergebnisse durch die Zeit berechnet. Die Versuchsdauer wurde mit einem pneumatischen Umschaltventil in Kombination mit einer SPS-Steuerung geregelt. Die anschließende Auswertung der Schnitttiefe und des gelösten Gesteinsvolumens erfolgte mit Hilfe eines hochgenauen Laserscanners vom Typ LLT2911-25 der Firma Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG und ermöglichte eine digitale Auswertung in angemessener Zeitdauer.

3.2 Ergebnisse und Diskussion

Die wichtigste Aufgabe war jene Parameter zu identifizieren, die eine ausreichende Schneidleistung bei hohem Gegendruck ermöglichen. Diese Fragestellung und auch die damit verbundene Frage nach den maßgebenden Einflussparametern konnte gelöst werden. Wie bereits von Cheung & Hurlburt [19] und Kolle [14] dargelegt, ist der Düsenabstand einer der entscheidenden Parameter, wobei entsprechend deren Theorie für die untersuchten Gegendruckbereiche der Fluidstrahl nicht von Kavitationsblasen umhüllt sein sollte. Als Konsequenz ist die Schneidwirkung nur auf den dynamischen Druck (Staudruck) zurückzuführen. Entsprechend [14] und [20] sollte der Strahl erst bei einem Abstand von 6,57-mal dem Düsendurchmesser beginnen aufzufächern und dadurch an Geschwindigkeit verlieren. Diese These konnte nicht direkt verifiziert werden, da keine Beobachtung des Strahls während der Experimente möglich war. Die Ergebnisse, dargestellt in Abb. 2, bilden jedoch die prognostizierten maximal möglichen Düsenabstände relativ gut ab. Die sogenannte K-Düse für Reinwasseranwendungen hatte einen deutlich größeren zulässigen Abstand als

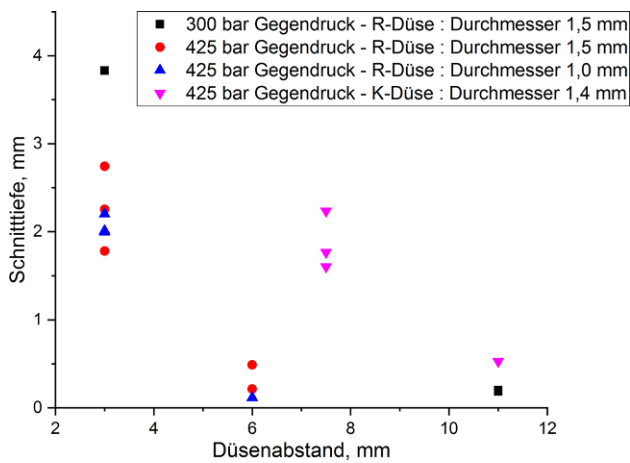


Abb. 2: Abhängigkeit der Schnitttiefe von Düsenabstand und Gegen- druck

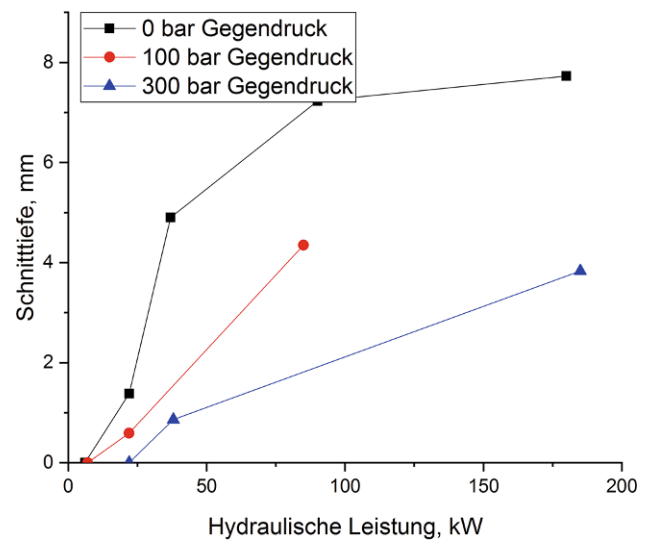


Abb. 3: Abhängigkeit der Schnitttiefe von Hydraulischer Leistung und Gegen- druck

die R-Düse, welche eigentlich beim Abrasivwasserstrahl- schneiden zum Einsatz kommt. Bei 1,4 mm Düsendurch- messer war ein maximaler Abstand von ca. 11 mm vom Dü- senaustritt zur Gesteinsoberfläche möglich, der prognosti- zierte Abstand betrug ca. 9,2 mm. Verglichen mit der R-Dü- se, die bei 1 mm Düsendurchmesser einen maximalen Ab- stand von 6 mm und bei 1,5 mm Düsendurchmesser einen maximalen Abstand von 7 mm, bei 450 bar Gegen- druck, hatte. Bei 300 bar Gegen- druck lag der maximale Abstand für die R-Düse ebenfalls bei ca. 11 mm, was die theoretischen Überlegungen relativ exakt widergibt.

Offensichtlich hat die Form des inneren Strömungswe- ges der Düse einen Einfluss auf die Schneidleistung des Strahls – diese Erkenntnis spiegelt sich zum Teil auch im sogenannten Düsenfaktor wider. Zusätzlich spielt auch der Gegen- druck eine wichtige Rolle für den maximal zulässigen Düsenabstand. Zu beachten ist, dass der in den Abb. 2 und 3 angegebene Gegen- druck ein definierter Wert ist, der beobachtete Zell- druck jedoch während der Messungen auf- grund der Arbeitsweise des Regelventils in einem Bereich von ± 25 bar gestreut hat.

Aus praktischer Sicht sollte die Schnitttiefe mindestens 2 mm betragen, d. h. der Abstand sollte bei beiden Düsen- typen innerhalb von 8 mm oder idealerweise noch näher lie- gen. Die zweite sehr wichtige Größe des Hochdruckstrahls ist die hydraulische Leistung. Wie bereits durch Rehbin- der [21] postuliert, besteht eine starke Abhängigkeit der er- reichbaren Schnitttiefe von der hydraulischen Leistung des Strahls, da eine höhere hydraulische Leistung einem höhe- ren Energieeintrag in das Gestein entspricht (bei gleicher Traversengeschwindigkeit). In Abb. 3 ist diese Beziehung sehr gut erkennbar. Für die Festlegung der Anforderungen an den Druckübersetzer im Bohrloch ist eine entschei- dende Erkenntnis, dass ein Strahl mit 85 kW hydraulischer Leistung und ein Strahl mit 180 kW hydraulischer Leistung auch bei hohem Gegen- druck nahezu idente Schneidleistungen aufweisen. Dies gilt allerdings nur, solange der Düsenab- stand gering ist. Bei gleichem Staudruck hat der 180 kW

Strahl einen 1,45-mal größeren Düsendurchmesser und da- mit theoretisch einen 1,45-fach größeren maximal zuläs- sigen Düsenabstand als der 85 kW Strahl. Bisher wurden nur die Strahleigenschaften untersucht, allerdings steigt mit er- höhtem Umschlingungsdruck auch die Festigkeit des Ge- steins, was, wie bereits von Kolle [14] erwähnt, möglicher- weise zu einer Änderung der für die Schneidwirkung rele- vanten Gesteinsparameter führt. Nach diesem Ansatz sollte der Grenzdruck unter einem ausgeprägten hydrostatischen Druck deutlich höher sein. Zur Bestimmung der Druckfestig- keit unter verschiedenen Umschlingungsdrücken wurden triaxiale Druckversuche durchgeführt, jedoch konnte keine eindeutige Aussage über etwaige Zusammenhänge ermit- telt werden.

Echte Grenzdruckversuche wurden nur mit Düsen mit 0,20 mm, 0,25 mm und 0,35 mm Durchmesser durchge- führt und ergeben für Neuhauser Granit einen Wert von ca. 1000 bar (ca. 6 kW hydraulische Leistung) unter atmo- sphärischen Bedingungen. Abb. 3 zeigt einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen der hydraulischen Leistung des Hochdruckstrahls und der Schnitttiefe. Das von Rehbin- der [21] vorgeschlagene „Grenzdruckdiagramm“ konnte für 100 und 300 bar Gegen- druck nicht erstellt werden, da bei den verwendeten kleinen Düsendurchmessern und 4000 bar Staudruck keine Schneidwirkung beobachtet wur- de und dies in weiterer Folge zu einem unsinnigen Dia- gramm führen würde. Tatsächlich wurde der Grenzdruck selbst durch den Umschlingungsdruck nicht wesentlich beeinflusst. Ein deutlicher Schnitt wurde bei 1400 bar Staudruck bei 300 bar Gegen- druck beobachtet. Dement- sprechend erscheint die wesentlich sinnvollere Darstel- lungsweise, jene der „hydraulischen Grenzleistung“ für zukünftige Anwendungen. Wie bereits in diesem Beitrag dargelegt, spielt der Düsenabstand bei Hochdruckstrahlen mit geringer hydraulischer Leistung (kleiner Düsendurch- messer) eine große Rolle und führt zu einer Abhängigkeit der Ergebnisse vom Düsendurchmesser. Die Ergebnisse der Versuche, die in Abb. 3 dargestellt sind, führen weiter

zu dem Schluss, dass sich die Schnitttiefe einem Maximum asymptotisch annähert. Da keine zusätzlichen Datenpunkte mehr gesammelt werden konnten, um die Lücken zwischen den vorhandenen Punkten zu ergänzen, ist diese Schlussfolgerung nur für die atmosphärischen Tests mit Sicherheit zutreffend. Nichtsdestotrotz ist der beschriebene Trend deutlich erkennbar. Mit Hilfe dieser experimentellen Untersuchungen konnten auf diese Weise neue Erkenntnisse über die Wirkung und Effizienz von Hochdruckfluidstrahlen unter Bohrlochbedingungen gewonnen werden.

Förderung. This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under Grant agreement No. 641202.

Funding. Open access funding provided by Montanuniversität Leoben.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Literatur

- Bobo, R.: Method of drilling with high velocity jet cutter rock bit. Patent. United States Patent Office, 1963
- Shi, H.; Li, G.; Huang, Z.: Mechanism of hydraulic pulsed and cavitating jet improving ROP and application in China offshore drilling. WJTA-IMCA Conference and Expo, Houston, 9–11 September 2013, WJTA Water Jet Technology Association: Conference Proceedings, 2013
- Veenhuizen, S.D.; Stang, D.L.; Kelley, D.P.; Duda, J.R.; Aslakson, J.K.: Development and Testing of Downhole Pump for High-Pressure Jet-Assist Drilling, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, 5–8 October 1997, SPE 38581. <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-38581-MS> (02.11.2018)
- Kolle, J.J.; Theimer, K.; Theimer, T.; Cox, R.; Scherschel, S.R.: Coiled Tubing Jet Drilling with a Downhole Intensifier, SPE/ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, 1–2 April 2008. SPE-113725-MS Conference Paper, 2008
- Geier, J.E.; Hood, M.: The effect of pre-weakening a rock surface, by waterjet kerfing, on cutting tool forces. In: Proceedings of the Fourth U.S. Water Jet Conference, Berkeley, California, 26–28 August 1987, pp152–163
- Fenn, O.: The use of water jets to assist free-rolling cutters in the excavation of hard rock. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 87 (1987), no. 5, pp 137–147
- Hlaváč, L.M.: Physical analysis of the rock disintegration by pressurised water through bit. In: Rakowski, Z. (ed.): Geomechanics 96, Proceedings of the International Conference, Rotterdam: Balkema, 1997, pp 389–392
- Hlaváč, L.M.; Hlaváčová, I.M.; Kušnerová, M.; Mádr, V.: Research of water jet interaction with submerged rock materials, WJTA American Waterjet Conference, Minneapolis, 18–21 August 2001. Proceedings: WJTA, 2001
- Hlaváč, L.M.; Mádr, V.; Kušnerová, M.; Kaličinský, J.: New results of underwater rock cutting by pure waterjet, WJTA American Waterjet Conference, Houston, TX, 21–23 August 2005, Proceedings: WJTA, 2005
- Hlaváč, L.M.: Physical analysis of the energy balance of the high energy liquid jet collision with brittle non-homogeneous material, Proceedings of the 8th American Water Jet Conference, Houston, TX, 26–29 August 1995, WJTA: Proceedings, St. Louis, Missouri, 1995, pp 681–697
- Hlaváč, L.M.: Theoretical and experimental investigation of a high energy waterjet efficiency on thermal treated rocks, 10th American Water Jet Conference, Houston, TX, 14–17 August 1999, WJTA: Proceedings, 1999
- Poláček, J.; Janurová, E.: Impact of pressure of surrounding medium on plain water jet cutting of rocks. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 90 (2017), iss. 5–8, pp 2185–2191
- Reichman, J.M.: Research and development of a high-pressure waterjet coring device for geothermal exploration and drilling, Report for U.S. Department of Energy, 1977
- Kolle, J.J.: Jet kerfing parameters for confined rock, Fourth U.S. Water Jet Conference, Berkeley, CA, 26–28 August 1987, WJTA: Proceedings, St. Louis, Missouri, 1987, pp 134–144
- Harris, H.D.; Mellor, M.: Cutting rock with Water jets, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, vol. 11 (1974), iss. 9, pp 343–358
- Karakurt, I.; Aydın, G.; Aydiner, K.: An Experimental Study on the Depth of Cut of Granite in Abrasive Waterjet Cutting, Materials and Manufacturing Processes, vol. 27 (2012), iss. 5, pp 538–544
- Aydın, G.; Karakurt, I.; Aydiner, K.: Prediction of the Cut Depth of Granitic Rocks Machined by Abrasive Waterjet (AWJ), Rock Mechanics and Rock Engineering, vol 46 (2013), pp 1223–1235
- Stoxreiter, T.; Martin, A.; Teza, D.; Galler, R.: Hard rock cutting with high pressure jets in various ambient pressure regimes. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol 108 (2018), pp 179–188
- Cheung, J.B.; Hurlburt, G.H.: Submerged water-jet cutting of concrete and granite. In: Proceedings of the Third international symposium on jet cutting technology, Chicago, 11–13 May 1979, Cranfield: BHRA Fluid Engineering, 1976, p E5–49
- Schlichting, H.; Gersten, K.: Grenzschicht-Theorie, 9. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer; 1997
- Rehbinder, G. A.: Theory About Cutting Rock With a Water Jet, Felsmechanik, 12 (1980), S. 247–257