

Diss. ETH No. 21803

FUNDAMENTAL INVESTIGATIONS OF
SUPERCRITICAL WATER FLOWS FOR
HYDROTHERMAL SPALLATION DRILLING

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Martin Jörg Schuler
Dipl.-Ing. Universität Stuttgart

born on August 14, 1980
in Rottweil (Germany)

citizen of
Federal Republic of Germany

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Dr. h.c. Philipp Rudolf von Rohr (ETH Zurich), examiner
Prof. Dr. Konstantinos Boulouchos (ETH Zurich), co-examiner

Zurich, 2014

Abstract

Our society has a growing demand for electricity and heat that has to be satisfied by different sources of energy. The geothermal energy stored in the deep underground can be part of this energy mix. For operation, a geothermal power plant needs at least two wells of several kilometers depth (2–10 km) in order to reach the required temperatures clearly above 100 °C for electricity generation. At the bottom of the wells, a system of fractures is generated to connect both wells with each other. These fractures act as a heat exchanger to transfer heat from the hot rock to the circulating working fluid.

Deep geothermal wells have to be drilled with conventional rotary drilling methods in abrasive and hard rock environments. Wear of the drilling head under these conditions and therefore the required replacement results in expensive trip times during drilling. The costs associated with drilling represent the major part of the costs (up to 70%) for the construction of a geothermal power plant. In order to make deep geothermal energy competitive with respect to other sources of energy, the drilling costs need to be significantly reduced.

“Thermal spallation drilling” is known as a promising technology for drilling shallow wells in hard rock formations. This drilling approach is based on the characteristics of certain rock types to disintegrate continuously into small flakes when exposed to the high thermal loads of an impinging flame jet. Enhanced drilling velocities and less wear of the drilling head are expected as major advantages that finally could help to reduce the drilling costs.

Nevertheless, for drilling wells of several kilometers depth, a water-based drilling fluid is essentially required for fulfilling several important tasks in the drilling process, e.g. removal of rock cuttings. In water filled boreholes at certain depth, the pressure exceeds the critical pressure of water (220.64 bar) and therefore, supercritical water jets are of particular interest to provide the required heat for thermal rock fragmentation. This spallation

drilling approach in the dense and aqueous environment of the water-based drilling fluid is named “hydrothermal spallation drilling”.

For the development of hydrothermal spallation drilling, several challenges have to be tackled. The heat transfer between impinging hot jet and rock was identified as crucial parameter and high heat fluxes ($\approx 1 \text{ MW/m}^2$) are required for successful penetration. Entrainment of cold surrounding drilling fluid into the hot jet results in a fast cool down. These heat losses have to be understood to optimize the important heat transfer between hydrothermal jet and rock. Fundamental heat transfer phenomena at supercritical pressures of water are presented that contribute to the development of hydrothermal spallation drilling. Furthermore, the present work addresses the first steps towards the development of an engineering tool for the design of a possible hydrothermal spallation drilling head.

Heat losses of the supercritical water jet before impingement can significantly reduce the efficiency of the spallation process. The responsible entrainment effect was investigated by recording the supercritical penetration length of submerged supercritical water jets in optical measurements and numerical simulations. The realizable k - ε turbulence model provided by ANSYS FLUENT[®] was used. The significantly varying thermo-physical properties of water were calculated with the REFPROP[®] database. For a wide range of conditions, the penetration length was in the range of the used nozzle diameter and only slightly dependent on the jet’s nozzle exit temperature and mass flow rate. Experimental values of the penetration length and measured axial temperature profiles have shown an acceptable agreement with the numerical results. Moreover, a variable turbulent Prandtl number has shown to improve numerical predictions.

Also the crucial heat transfer of impinging hot water jets under supercritical pressures was investigated in experiment and simulation. Due to the strongly varying thermo-physical properties of water, the surface temperature of the calorimetric sensor devices had a substantial influence on the heat transfer coefficient. The two calorimeters cover a wider range of surface temperatures and heat fluxes and showed significant differences for the heat transfer coefficient at low surface temperatures (high heat fluxes) and high surface temperatures (low heat fluxes). The applied shear-stress transport k - ω turbulence model was able to predict the experimental trends. However, the absolute values for the heat transfer were overestimated.

Zusammenfassung

Der wachsende Energiebedarf unserer Gesellschaft muss durch verschiedene Quellen gedeckt werden. Geothermische Energie aus tiefen Gesteinsschichten könnte hierbei einen Beitrag leisten. Für den Betrieb eines geothermischen Kraftwerks sind mindestens zwei Bohrungen von mehreren Kilometern Tiefe (2–10 km) erforderlich, um die nötigen Temperaturen von über 100 °C zu gewährleisten. Künstlich erzeugte Risse im Gestein am Ende der Bohrungen verbinden beide Löcher miteinander und sorgen für den Wärmeaustausch zwischen zirkulierendem Medium und heissem Gestein.

Diese geothermischen Tiefenbohrungen müssen in harten Gesteinsschichten mittels rotierenden Bohrköpfen durchgeführt werden, was zu erheblichem Verschleiss am Bohrkopf führen kann und somit dessen Austausch unvermeidlich macht. Dieser Bohrkopfwechsel führt zu langen und teuren Stillstandszeiten im Bohrprozess. Beim Bau eines Geothermiekraftwerks können die Bohrkosten bis zu 70% an den Gesamtkosten ausmachen. Um die Energie aus der Tiefe konkurrenzfähig zu machen, müssen die Bohrkosten drastisch gesenkt werden.

Als mögliche Alternative zu konventionellen Bohrverfahren gilt das sogenannte “Spallations-Bohren”, welches sich beim Bohren von harten Gesteinsschichten in geringer Tiefe bewährt hat. Wird Gestein den hohen thermischen Belastungen eines auftreffenden Flammstrahls ausgesetzt, reagiert dieses mit Bruch und der Entstehung kleiner Bruchstücke die kontinuierlich von der Gesteinsoberfläche abplatzen. Hohe Bohrgeschwindigkeiten und reduzierter Verschleiß sind als Vorteile dieser Methode zu nennen, welche schlussendlich zur Reduzierung der Bohrkosten führen können.

Für geothermische Tiefenbohrungen ist die Verwendung einer wasserbasierten Bohrspülung unerlässlich, da diese verschiedenste Aufgaben im Bohrprozess übernimmt, zum Beispiel den Abtransport der entstehenden Gesteinsbruchstücke. In einem mit Wasser gefüllten Bohrloch wird der überkritische Druck von Wasser (220.64 bar) in einer gewissen Tiefe erreicht, was die Verwendung eines heissen, überkritischen Wasserstrahls zur Ge-

steinszerstörung ermöglicht. Dieses Spallations-Bohren in der dichten Umgebung der wasserbasierten Bohrspülung wird üblicherweise als “Hydrothermales-Spallations-Bohren” bezeichnet.

Bis zur Anwendung dieses neuen Bohrverfahrens sind noch viele Fragestellungen zu beantworten. Der wichtigste Prozessparameter ist der Wärmeübergang zwischen heissem, überkritischem Prallstrahl und Gestein, da ein hoher Wärmeeintrag ($\approx 1 \text{ MW/m}^2$) im Bohrprozess erforderlich ist. Das Eintreten von kalter, umgebender Bohrspülung in den heißen Wasserstrahl vor dem Aufprall auf dem Gestein führt zu einer schellen Abkühlung des Strahls. Die Mechanismen dieses Wärmeverlustes müssen untersucht werden um den entscheidenden Wärmeübergang zwischen überkritischem Prallstrahl und Gestein optimieren zu können. Hierfür wurde der Wärmeübergang unter überkritischen Drücken für Wasser grundlegend untersucht, um damit einen Beitrag zur Entwicklung des Hydrothermalen-Spallations-Bohrens leisten zu können. Des Weiteren ist die vorliegende Arbeit der erste Schritt zur Entwicklung eines theoretischen Werkzeuges für den Entwurf eines Bohrkopfes für das Hydrothermale-Spallations-Bohren.

Wärmeverlust im überkritischen Wasserstrahl vor dem Aufprall kann die Effizienz des Bohrprozesses deutlich senken. Dieser Wärmeverlust wurde mittels der optisch gemessenen Länge des überkritischen Wasserstrahls und anhand von gemessenen axialen Temperaturprofilen quantifiziert. In einem entwickelten numerischen Modell wurde das “realizable $k-\varepsilon$ ” Turbulenzmodell verwendet, welches in ANSYS FLUENT[®] zur Verfügung steht. Unter überkritischen Drücken für Wasser treten stark schwankende Stoffdaten auf, die mittels der REFPROP[®] Referenzdaten bestimmt wurden. Für die Mehrzahl der durchgeführten Untersuchungen war die Länge des überkritischen Wasserstrahls ungefähr im Bereich des verwendeten Düsendurchmessers. Es konnte nur eine geringe Abhängigkeit von Düsenauslaßtemperatur und Massenstrom festgestellt werden. Die gemessene Länge des überkritischen Wasserstrahls wie auch experimentell ermittelte Temperaturprofile waren in guter Übereinstimmung mit den Simulationen. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass eine veränderliche turbulente Prandtl Zahl die Unterschiede zwischen Experiment und Simulation verringert.

Auch der maßgebliche Wärmeübergang des auftreffenden heißen Wasserstrahls unter überkritischen Druckbedingungen wurde eingehend mittels Experimenten und Simulationen untersucht. Aufgrund stark variierender

Stoffeigenschaften in der Grenzschicht zur Wand zeigte der Wärmeübergangskoeffizient eine deutliche Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur der beiden verwendeten kalorimetrischen Sensorelemente. Mittels dieser zwei Sensoren konnten grosse Bereiche für Wärmestrom und Oberflächentemperatur abgedeckt werden, was zu grossen Unterschieden im Wärmeübergangskoeffizient bei kleinen (grosser Wärmestrom) und grossen Oberflächentemperaturen (kleiner Wärmestrom) führte. Die experimentellen Verläufe konnten mit dem verwendeten “shear-stress transport $k-\omega$ ” Turbulenzmodel richtig vorhergesagt werden. Allerdings traten in den absoluten Werten für den Wärmeübergangskoeffizient erhebliche Differenzen zwischen Experiment und Theorie auf.