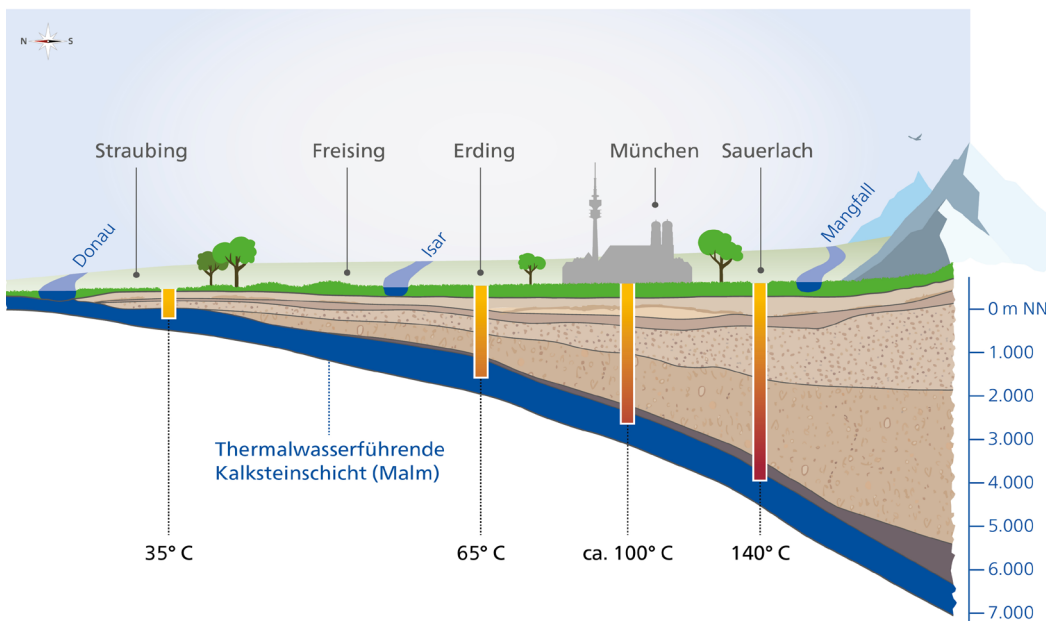


EIN GÜNSTIGERER WEG ZUR ERDWÄRME

Geothermie hat ein grosses Potenzial, doch Bohrungen sind teuer. Deshalb wird intensiv an günstigen Bohrtechnologien geforscht. Eine davon ist die Stahlkugel-Bohrtechnik (Directional Steel Shot Drilling/DSSD). Ein Forscherteam der ETH Zürich hat die neue, noch in Entwicklung befindliche Technologie gemeinsam mit internationalen Partnern untersucht und das Potenzial für die Schweiz evaluiert.



Versuchsstollen Hagerbach im Sarganserland: Hier wurde die DSSD-Bohrtechnik erprobt, indem zwei 125 Meter lange Bohrungen horizontal in den Berg getrieben wurden, der hier aus Kalkstein (Malm) besteht. Foto: ETH Zürich



Im Raum München wird heute schon Erdwärme aus der Malm-Schicht gefördert. Grafik: Stadtwerke München

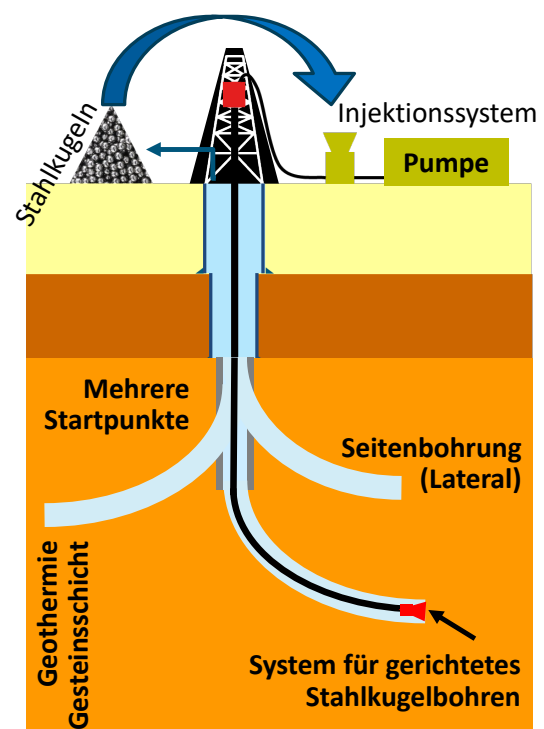
Glückliches München! Rund 2'000 bis 3'500 Meter unter der bayrischen Landeshauptstadt liegt eine Kalksteinschicht («Malm»), in der 70- bis 130-gradiges Wasser zirkuliert. Die Stadtwerke München fördern die Erdwärme mit sechs Anlagen und nutzen sie über das Fernwärmenetz zur Beheizung von Gebäuden, zudem auch zur Erzeugung von Strom. Bis im Jahr 2040 sollen gut 60 Prozent des Münchner Wärmebedarfs durch Fernwärme gedeckt werden, überwiegend aus Tiefeithemie.

«Aus der Schweiz blicken wir fast neidvoll auf dieses Vorzeigebispiel für tiefe Geothermie», sagt Martin Saar, Professor für geothermische Energie und Geofluide an der ETH Zürich. «Allerdings hat die Schweiz bei ihrer Geologie nicht das gleiche Glück wie München.» In Teilen des Schweizer Untergrunds liegt zwar auch die Malm-Schicht. Diese trifft man in der Schweiz aber häufig in grösseren Tiefen an, sie ist an vielen Stellen kompakt und weitgehend wasserundurchlässig. Genügend durchlässige Stellen (sogenannte «Reservoir») findet man nur sporadisch, nämlich dort, wo das Gestein Poren und vor allem Risse aufweist, die noch nicht durch den grossen Druck des darüberliegenden Gesteins verschlossen wurden.

Bohrkosten senken

Ein spezielles Bohrkonzept könnte helfen, in der Schweiz wasserführende Schichten zu finden. Dafür wird zuerst in die Tiefe gebohrt, bevor die Bohrung in verschiedene Richtungen horizontal mehrere Hundert Meter vorangetrieben wird. Dieses System aus mehreren Horizontalbohrungen vergrös-

sert die Chancen, auf wasserdurchlässige Stellen zu stossen. Horizontalbohrungen sind aufwändig. Umso wichtiger sind günstigere Bohrtechniken.



Bei der Stahlkugel-Bohrtechnik wird die Bohrflüssigkeit mit Stahlkugeln angereichert, die das Gestein zertrümmern bzw. schwächen, damit es der Bohrmeissel leichter abtragen kann. Die Grafik zeigt die (in der praktischen Anwendung 300 bis 1000 Meter langen) Horizontalbohrungen, die dabei helfen, in der Kalksteinschicht (z.B. Malm) wasserdurchlässige Rissysteme zu erschliessen. Grafik: ETH Zürich

Eine solche Bohrtechnik ist «Directional Steel Shot Drilling» (DSSD). Hierbei kommen kleine Stahlkugeln zum Einsatz (vgl. Textbox unten). Die Bohrtechnik, zurzeit vom niederländischen Unternehmen Canopus Drilling Solutions B.V. entwickelt, stand im Zentrum des Forschungsprojekts «DEPLOI the HEAT». Darin arbeiteten internationale Partner unter der Leitung von Canopus zusammen. Der Schweizer Teil wurde von der ETH Zürich durchgeführt und vom BFE im Rahmen des P+D-Programms finanziell unterstützt. Das Projekt ist Teil von GEOTHERMICA, einer EU-Forschungsinitiative, die verschiedene Fragestellungen im Bereich der Erdwärmenutzung untersucht. Im Rahmen von DEPLOI the HEAT wurde DSSD durch ETH-Forschende im Versuchsstollen Hagerbach, süd-östlich von Flums (SG), getestet.

Tests im Versuchsstollen Hagerbach

Im Versuchsstollen wurden mit der Bohrtechnologie zwei Horizontalbohrungen von 125 Metern Länge in Kalkstein realisiert. «Wir konnten mit diesen Testbohrungen zeigen, dass DSSD ohne Zwischenfälle in den herkömmlichen Bohrbetrieb integriert werden kann», sagt Andreas Reinicke, der das ETH-Projekt damals leitete und inzwischen beim niederländischen Forschungsinstitut TNO arbeitet. Es wurden darüber hinaus neue Erkenntnisse gewonnen, wie die Zirkulation der Stahlkugeln im Bohrbetrieb stabil und optimal funktioniert.

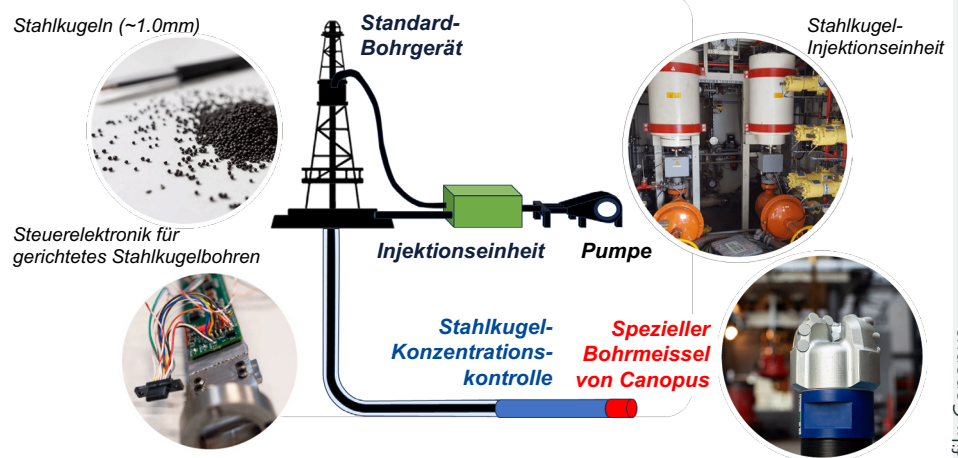
Mit DSSD konnte die Bohrgeschwindigkeit um einen Faktor 3 bis 4 verbessert werden. So durchbohrt DSSD hartes Gestein (z.B. Kalk oder eventuell auch Granit) mit 20 m/h gegenüber

BOHREN MIT STAHLKÜGELCHEN

Wer in die Erde bohrt, verwendet dafür normalerweise – einfach ausgedrückt – einen Bohrmeissel, der das Gestein abträgt, und eine Bohrflüssigkeit (Wasser plus Zusatzstoffe), die das zertrümmerte Gestein wegschwemmt. Das gilt gleichermaßen für «Directional Steel Shot Drilling» (DSSD), auf Deutsch etwa: gerichtetes Stahlkugelbohren. Bei DSSD werden dem Bohrfluid kleine Stahlkugeln mit ca. 1 mm Durchmesser zugesetzt, zum Bohrkopf geführt und mit dem Bohrkopf zurück an die Oberfläche gebracht. Im Bohrkopf prallen die Kügelchen mit hoher Geschwindigkeit auf das Gestein und zertrümmern oder schwächen dieses, so

dass es vom Bohrmeissel anschliessend leichter abgetragen werden kann. Die Kügelchen machen 0.5 bis 2 Volumenprozent des Bohrfluids aus. Das entspricht etwa 6 Mio. Kügelchen pro Minute bei einer Fließrate von 400 l/min und 1 Volumenprozent. Das Bohrfluid fliesst in einem geschlossenen Kreislauf, und es gibt nur geringe Verluste an Stahlkugeln.

Erste Versuche mit Stahlkugeln zu bohren wurden bereits in den 1970er Jahren durchgeführt, damals mit dem Ziel, sehr hartes Gestein durchbohren zu können. Danach wurde das Verfahren vom Energiekonzern Shell weiterentwickelt zum Erstellen von Bohrungen mit kleinem Durchmesser (4 bis 8 Zoll bzw. 10 bis 20 cm). Das niederländische Unternehmen Canopus hat die Technologie vor ca. sechs Jahren aufgegriffen, um damit insbesondere gerichtete Geothermie-Bohrungen mit kleinem (4 bis 6 Zoll) bis mittlerem Durchmesser (8 – 10 Zoll) kostengünstig realisieren zu können. Innovativ ist bei der Canopus-Technologie nicht nur der Einsatz von Stahlkugeln, sondern auch eine neuartige Sensorsteuerung des Bohrkopfs («directional control»): Hierbei wird die Konzentration der Stahlkugeln an der Drehung des Bohrmeissels orientiert; das Bohrloch wird auf der einen Seite stärker abgetragen als auf der anderen und der Bohrkopf bewegt sich in die Richtung der stärkeren Abtragung. Dieses System ist sehr effektiv und erlaubt eine schnelle Änderung der Richtung. Ein Messsystem steuert und kontrolliert die Richtung der Bohrung.

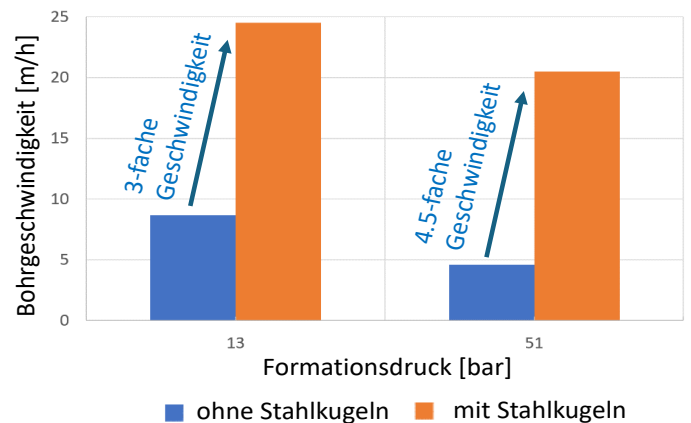


5 m/h bei einer herkömmlichen Bohrmethode (vgl. Grafik rechts).

Mittlerweile ist das DSSD-System für flache Bohrungen bis ca. 500 m kommerziell verfügbar. Bis zu einem kommerziellen Einsatz für tiefe Bohrungen muss die Stahlkugel-Bohrtechnik weiter verbessert werden. Im Versuchsstollen wurde ein Bohrfluid mit 0,5 Volumenprozent Stahlkügelchen eingesetzt. Mit einer Erhöhung auf 2 Volumenprozent könnte die Bohrgeschwindigkeit weiter erhöht und besonders hartes Gestein effektiv erbohrt werden. Das spezielle Stahlkugelbohrsystem hat darüber hinaus die Fähigkeit, den Bohrmeissel zu steuern. Diese Fähigkeit wurde im Versuchsstollen Hagerbach demonstriert. Im Versuchsstollen wurde eine Ablenkung von bis zu 20 Grad pro 100 Meter Bohrstrecke erreicht, künftig könnten es 45 Grad pro 100 Meter sein. Auch wurden Parameter optimiert während des Tests, um eine ausreichende Reinigung des Bohrloches (Ausspülen von Bohrklein und Stahlkugeln) sicherzustellen.

Modellierung quantifiziert den Nutzen

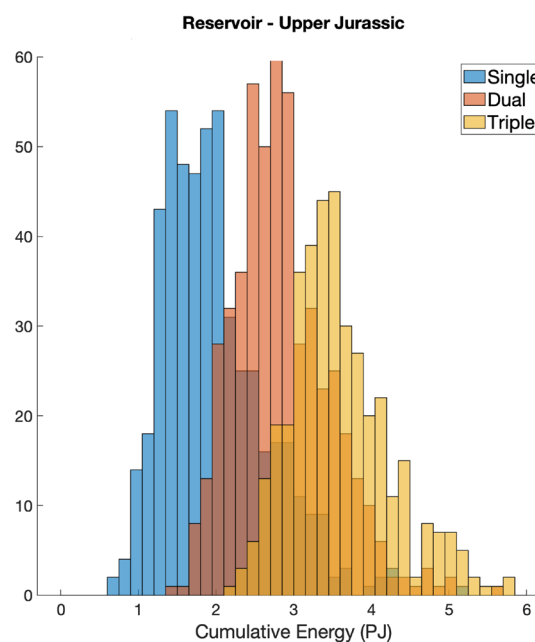
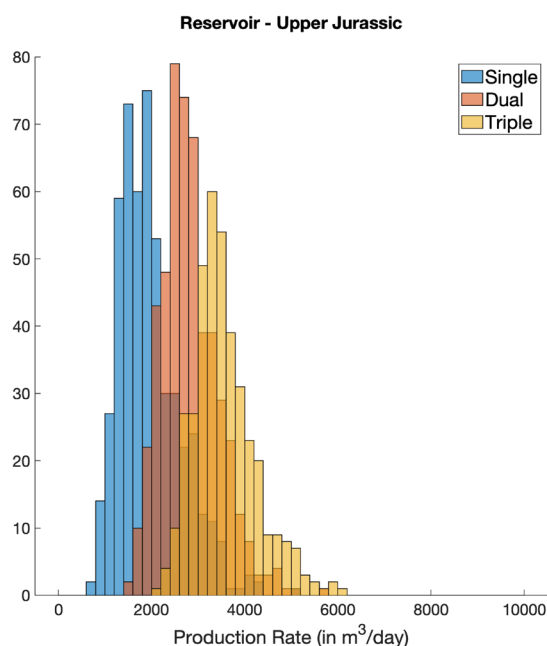
In einer Teilstudie von DEPLOI the HEAT wurde abgeschätzt, in welchem Umfang durch DSSD die Fördermengen an Erdwärme künftig erhöht werden könnten. Dazu entwickelte Wissenschaftlerin Paromita Deb, damals in der Gruppe «Geothermischen Energie und Geofluiden» an der ETH Zürich, ein numerisches Modellierungsverfahren. Sie verwendete geologische Daten aus Genf und Lausanne, um rund 1'000 virtuel-



Bohrgeschwindigkeit eines konventionellen Bohrkopfs (blau) im Vergleich mit einer Stahlkugel-Bohrung (orange). Die Bohrgeschwindigkeit hängt von der Tiefe (Formationsdruck) ab. Grafik: Schlussbericht DEPLOI the HEAT/A. Reinicke

le Varianten von zerklüfteten Kalksteinformationen zu erzeugen, und simulierte, wie sich horizontale DSSD-Bohrungen auf Durchflussraten, thermische Leistung und Wirtschaftlichkeit in diesen unterschiedlichen geologischen Szenarien auswirken würden.

Gemäss den Modellierungen ermöglichen Konfigurationen mit bis zu drei Horizontalbohrungen klare Zuwächse bei der Wärmeerzeugung (bis zu einer Verdopplung des Wärmeertrags). Auch ermöglicht DSSD im Vergleich zu konventionellen Bohrmethoden eine deutliche Reduktion der Bohrkosten,



Die numerische Modellierung von DSSD-Bohrungen in Kalkstein zeigt: Mit ein (Single), zwei (Double) oder drei (Triple) Horizontalbohrungen pro Vertikalbohrung kann die Gewinnung von Erdwärme deutlich gesteigert werden. Grafik: Schlussbericht DEPLOI the HEAT

WÄRME AUS GROSSER TIEFE

Wir Menschen leben – geologisch betrachtet – auf einem Feuerball: 99 % des Erdvolumens sind heisser als 1000 °C. Nicht ganz so heiss ist die Erdoberfläche: In 1000 m Tiefe ist die Erde ca. 40 °C warm, in 2000 m Tiefe ca. 70 °C und in 5000 m rund 150 °C. Um die tiefe Erdwärme zu nutzen, werden vier Hauptansätze verfolgt:

Hydrothermale Geothermie: Zielt auf heisse, wasserdurchlässige Gesteinsschichten («Reservoirs»). Werden diese Reservoirs angebohrt und mit Wasser durchströmt, kann die Erdwärme an die Oberfläche befördert und für Heizzwecke oder (mittels Dampfturbine und Generator) für die Stromproduktion genutzt werden. Zur Erschliessung der Reservoirs könnte künftig die DS-SD-Bohrtechnologie eingesetzt werden. Zentrale Herausforderung: Je tiefer die Bohrung, desto geringer die Wahrscheinlichkeit, Reservoirs mit hinreichend grosser Durchlässigkeit zu finden.

Petrothermale Geothermie (engl. enhanced geothermal systems/EGS): Zielt auf sehr tiefe Gesteinsschichten (bis zu 6 km), die nicht wasserdurchlässig sind. Die Durchlässigkeit des Gesteins wird durch hydraulische Stimulation (Injektion von Wasser) hergestellt. Die so erzeugten Risse werden mit Wasser durchströmt, die Erdwärme so an die Oberfläche gefördert. Zentrale Herausforderungen: Die Stimulation darf keine nennenswerten Erdbeben auslösen. Und: Die künstlich erzeugten Risse tendieren dazu, durch mineralische Ausfällungen zu verstopfen.

Deep Closed Loop, auf Deutsch etwa Tiefe Geschlossene Systeme (engl. advanced geothermal systems/AGS): Zielt wie petrothermale Systeme auf nicht wasserdurchlässiges Gestein, verzichtet aber auf hydraulische Stimulation. Stattdessen werden mehrere (vertikale) Bohrlöcher in grosser Tiefe (5000 bis 8000 m) mit Horizontalbohrungen («loops») verbunden. Werden diese «loops» von Wasser durchströmt, nimmt dieses die Erdwärme auf und transportiert sie an die Oberfläche. Zentrale Herausforderung: sehr hohe Bohrkosten.

wobei die Einsparungen mit der Anzahl der Horizontalbohrungen zunehmen. Allerdings lässt sich die Zahl der Horizontalbohrungen nicht beliebig steigern, weil der Nutzen die Kosten dann nicht mehr rechtfertigt. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse, dass DSSD eine vielversprechende Technologie zur Verbesserung sowohl der Leistungsfähigkeit als auch der wirtschaftlichen Effizienz von geothermischen Bohrungen darstellt.

Einsatz im Grossraum Genf

Das ETH-Forschungsprojekt war von den «Services Industriels de Genève» (SIG) und den «Services Industriels de Lausanne» (SIL) finanziell und mit der Bereitstellung von Daten unterstützt worden. «Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden erhebliche Fortschritte erzielt, und wir gehen fest davon aus, dass wir in einigen Jahren die DSSD-Technologie einsetzen können», sagt Michel Meyer, bei den SIG verantwortlich für Wärmelösungen und Geothermie. Kurzfristig setzt SIG allerdings auf konventionelle Bohrungen. Der Grund: Die DS-SD-Bohrtechnologie sei noch nicht bereit für den Einsatz in einem komplexen geologischen Umfeld mit stark zerklüftetem Kalkstein mit zahlreichen Karstgebieten und hohen artesischen Strömungen, wie es in der Region Genf anzutreffen

ist, sagt SIG-Experte Meyer. Mittelfristig habe DSSD ein grosses Potenzial.

Schweizweit von Interesse

Die frühere ETH-Wissenschaftlerin Paromita Deb arbeitet unterdessen bei Swiss Geo Energy, einer 2019 gegründeten Geothermie-Firma mit Sitz in Payerne. Auch aus ihrer Sicht wird DSSD mittelfristig als Bohrtechnik für die ganze Schweiz interessant werden: «Auch wenn die Westschweiz aktuell bei der Geothermie besonders aktiv ist: Diese Technologie hat in der ganzen Schweiz ein ähnliches Potenzial, insbesondere für Lösungen zur Gewinnung von Heizwärme.»

➤ Der englischsprachige **Schlussbericht** zum Projekt «Demonstrate production enhancement through low cost directional steel shot drilling for district heating – CH» (DEPLOI the HEAT – CH) ist verfügbar unter: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=51354>.

➤ Das DEPLOI-Projekt wird in mehreren Beiträgen am **European Geothermal Congress** (EGC) in Zürich vorgestellt, der Anfang Oktober 2025 erstmals in der Schweiz stattfindet: <https://europeangeothermalcongress.eu/>.



Vertreterinnen und Vertreter des DEPLOY-the-HEAT-Forschungsteams und der Unterstützungspartner. Foto: ETH Zürich

VIELE WEGE

Geothermie-Bohrungen in der Malmschicht sind ein Approach, um das Potenzial an Erdwärme in der Schweiz zu erschliessen. Daneben gibt es weitere Herangehensweisen mit guten Erfolgsaussichten, um Erdwärme aus anderen Gesteinsschichten zu gewinnen. Einige Geothermie-Anlagen sind bereits in Betrieb und fördern heute schon erfolgreich Wärme – ein wichtiger Beitrag zur nachhaltigen Energieversorgung. Wenn die DSSD-Technologie dereinst ausgereift ist, könnte sie auch in anderen Gesteinen als in Malm zur Anwendung kommen.

- **Auskünfte** zu dem Projekt erteilt Stefano Benato (stefano.benato@bfe.admin.ch), externer Leiter des BFE-Forschungsprogramms Geoenergie.
- Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Geothermie finden Sie unter www.bfe.admin.ch/ec-geothermie.
- Weitere Forschungsprojekte der **Gruppe Geothermische Energie und Geofluide (GEG)** der ETH Zürich finden Sie unter geg.ethz.ch.