

## **Cyclic Soft Stimulation (CSS): Ein Stimulationskonzept zur Reduzierung von induzierter Seismizität bei der Entwicklung petrothermaler Geothermiereservoirs**

**Hannes Hofmann, Günter Zimmermann und Arno Zang**

Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum

**Keywords:** Enhanced Geothermal Systems (EGS), petrothermale Systeme, hydraulische Stimulation, induzierte Seismizität, Risikomanagement

### **Zusammenfassung**

Eine ökonomische Nutzung tiefer petrothermaler Geothermiereservoirs erfordert im Allgemeinen den Einsatz hydraulischer Stimulationsmaßnahmen zur Verbesserung der Fließwege und zur Vergrößerung der Wärmeaustauschflächen. Dabei traten in der Vergangenheit vereinzelt ungewollt stärkere seismische Ereignisse auf. Da dies zum vorzeitigen Ende eines Projekts führen kann, ist es nötig Methoden zu entwickeln, um induzierte Seismizität zu begrenzen. Das CSS-Konzept ist eine solche Methode, deren Entwicklung auf Beobachtungen von Labor-, Minen- und Feld-Experimenten beruht. Das CSS-Konzept besteht aus folgenden Teilen: Zyklische Injektion in unterschiedlichen Zeitskalen, langsame Druckänderungen, Vermeidung des Bohrungseinschlusses (shut-in), möglichst niedrige Drücke, limitiertes maximales Injektionsvolumen, ein angepasstes Ampelsystem für zyklische Injektionen, und Re-injektion oder mehrstufige (multi-stage) Injektion. CSS sollte mit kontrolliertem hydraulischen Bruchwachstum einhergehen, d.h. die Wärmeaustauschflächen werden in Sequenzen mit parallel-stehenden Rissflächen entsprechend dem Spannungszustand in-situ generiert. Die Erzeugung von gestaffelten Wärmeaustauschflächen mittels CSS sehen wir als sanfte, nachhaltige Entwicklung von petrothermalen Geothermiesystemen an. Das Konzept wurde in einer ersten Teststimulation mit kleinem Wasservolumen im Rahmen einer mehrphasigen Stimulationskampagne im Pohang EGS Projekt in Südkorea im August 2017 angewendet. Die einzelnen Bestandteile des Konzepts und die Ergebnisse des ersten Feldexperiments werden vorgestellt.

### **1. Einleitung**

Viele Methoden in Zusammenhang mit Rohstoffförderung erfordern eine Fluidinjektion in den geologischen Untergrund. Beispiele hierfür sind unkonventionelle Kohlenwasserstoffproduktion, Abwasserbeseitigung in tiefen Bohrlöchern und Geothermie. Während Fluidinjektion häufig nötig ist für ein erfolgreiches Projekt, kann damit aber auch Seismizität ausgelöst werden, die an der Erdoberfläche zu spüren ist (Deichmann & Giardini, 2009). Ohne Frage muss das Risiko solcher induzierter Erdbeben reduziert werden. Dies wird zum Teil durch Risikostudien erreicht, in denen abgeschätzt wird ob ein Fluid sicher an einer bestimmten Stelle im Untergrund verpresst werden kann (Majer et al., 2012). Zusätzlich müssen jedoch auch Methoden zur Reduktion des seismischen Risikos entwickelt werden. Als eine Methode zur Risikominderung für hydraulische Stimulationsmaßnahmen wurde das „Cyclic Soft Stimulation“ (CSS) Konzept entwickelt. Dies kann insbesondere zur Entwicklung sogenannter „Enhanced Geothermal Systems“ (EGS) eingesetzt werden. Das Konzept hat zwei gegensätzliche Zielsetzungen: 1) Minimierung induzierter Seismizität und 2) Maximierung der Produktivitäts- bzw. Injektivitäts-Steigerung. Die einzelnen Teilaspekte dieser vorgeschlagenen Methodik basieren auf Injektionsexperimenten im Labor, Untertage und im Feld begleitet von numerischen Modellierungen und theoretischen Überlegungen. Es ist geplant das Konzept kontinuierlich weiterzuentwickeln basierend auf neuen Erkenntnissen und optimiert unter ökonomischen Gesichtspunkten.

## 2. Cyclic Soft Stimulation (CSS) Konzept

Das CSS Konzept besteht primär aus neun Komponenten, die im Folgenden kurz beschrieben werden. Eine schematische Illustration dieser Komponenten ist in Abb. 1 dargestellt.

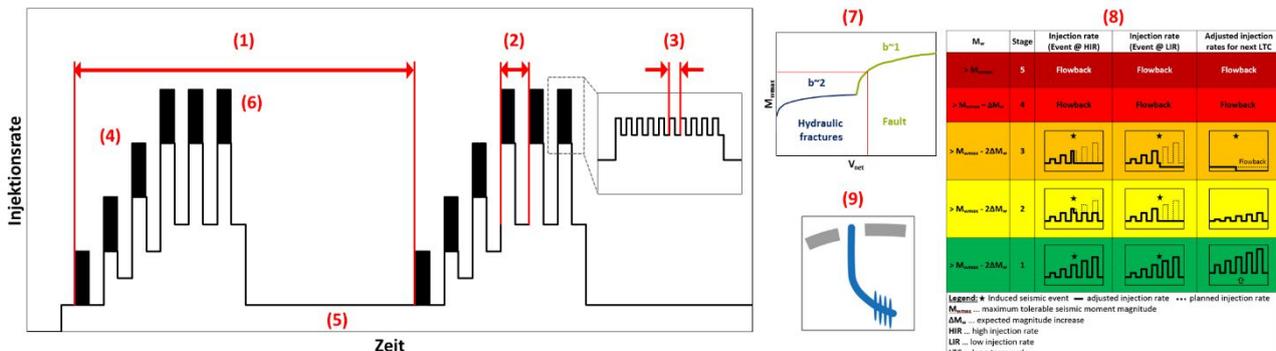


Abb. 1: Schematische Illustration der neun Komponenten des CSS Konzepts: 1) Langzeit Zyklen, 2) Mittlere Zyklen, 3) Kurzzeit Zyklen, 4) langsame Druckänderungen, 5) kein shut-in, 6) niedriger Druck, 7) begrenztes Nettovolumen, 8) Ampelsystem, 9) Re-injektion oder mehrstufige Injektion.

### 2.1 Langzeit zyklische Injektion

Ein Langzeit-Zyklus kann Stunden bis Tage andauern. Dabei wechseln sich immer eine Stimulationsphase mit hohen Fließraten und Drücken und eine Rissenschließungsphase mit geringen Fließraten und Drücken ab. Der Hauptgrund für diese Vorgehensweise ist die Beobachtung, dass Seismizität, hervorgerufen durch Fluidinjektion, erheblich verzögert (Stunden bis Tage) nach der jeweiligen Injektion auftreten kann (Vlcek et al., 2017). Dieser Prozess wird häufig mit Druckdiffusion erklärt. Je langsamer der Druck sich im Untergrund ausbreiten kann, desto später kann eine Störung in gewissem Abstand zur Injektion aktiviert werden. Idealerweise führt die Reduzierung der Fließrate während der Langzeit Zyklen zu einer pro-aktiven Druckminderung, bevor ein kritisches Erdbeben auftritt.

### 2.2 Mittlere zyklische Injektion

Mittlere Zyklen wechseln zwischen hohen und geringen Fließraten in Minuten bis Stunden. Durch die kürzeren Wechsel wird auch eine kürzere Verzögerung zwischen Injektion und induzierter Seismizität im Stimulationskonzept berücksichtigt. Ein weiterer Grund für mittlere zyklische Injektion ist ein hydraulischer Ermüdungsprozess resultierend aus zyklischer Injektion im Allgemeinen. In Injektionsexperimenten im Labor und Untertage in Graniten wurde eine Verringerung des hydraulischen Versagensdrucks, eine Reduzierung der maximalen Amplitude induzierter seismischer Ereignisse und eine Tendenz zur Entwicklung komplexerer Rissnetzwerke beobachtet, wenn zyklisch injiziert wurde im Vergleich zur Injektionen mit konstanter Fließrate (Hofmann et al., 2018a). Als Grund für diese Beobachtungen gilt, ähnlich zu mechanischen Ermüdungsprozessen, die Entwicklung von Mikrorissen vor der Entstehung makroskopischer Risse.

### 2.3 Kurzzeit zyklische Injektion

Kurzzeit Zyklen haben eine Länge von wenigen Minuten oder weniger. Sie dienen zur Verstärkung des eben beschriebenen hydraulisch induzierten Ermüdungsprozesses. Im Labor und im Untertagelabor wurde jeweils die größte Verbesserung der hydraulischen Performance gemessen,

wenn zyklische Stimulation (mittlere zyklische Injektion) und Pulsstimulation (Kurzzeit zyklische Injektion) kombiniert wurden (Zimmermann et al., 2018; Zhuang et al., 2018).

## 2.4 Langsame und schrittweise Druckänderungen

Ein Grund für eine Phase mit schrittweise zunehmenden Fließraten zu Beginn eines Langzeitzyklus ist die Bestimmung des Rissöffnungsdrucks durch Identifizierung einer Änderung der Steigung in der Druck-Fließratenkurve. Dadurch kann der nötige Minimaldruck für eine Stimulation festgestellt werden. Zusätzlich werden kritische Drücke somit langsamer angefahren und einzelne kritisch orientierte Risse oder Störungszonen werden aktiviert, bevor bei der nächsten Druckstufe weitere Risse hinzukommen.

Drücke werden nur langsam geändert, da in Laborexperimenten (z.B. French et al., 2016) ein geringerer Versatz und ein geringerer Scherspannungsabfall an Sandsteinen festgestellt wurde, wenn der Druck langsamer geändert wurde im Vergleich zu schnelleren Druckänderungen.

## 2.5 Kein shut-in

In der Vergangenheit wurden oftmals die größten Magnituden von induzierter Seismizität während des shut-in beobachtet (Deichmann & Giardini, 2009). Das liegt möglicherweise daran, dass die Druckdiffusion mit dem Einschließen der Bohrung nicht aufhört. Da die genauen Prozesse noch unklar sind, sollte ein shut-in vermieden werden. Stattdessen sollte das injizierte Wasser zurückgefördert werden, falls kritische Erdbebenmagnituden registriert werden. Wann dieser Fall eintritt, wird durch das Ampelsystem festgelegt, welches später erläutert wird. Dadurch wird eine effizientere Druckentlastung gewährleistet. Fortgesetzte Injektion während der zyklischen Injektion zielt auf eine Maximierung des Stimulationseffekts und eine Abschwächung von plötzlichen Druckänderungen ab.

## 2.6 Niedriger Druck

Zunächst sollte der maximale Druck unter dem kritischen Druck zur Aktivierung von nahegelegenen Störungszonen liegen. Die dafür nötigen Drücke können über die „slip tendency“ Analyse abgeschätzt werden (Blöcher et al., 2018). Da die dafür notwendigen Informationen über Spannungsfeld und Strukturgeologie oftmals unsicher sind, sollte der Druck nur wenig über dem Rissöffnungsdruck liegen. Dies führt dazu, dass eine geringere Anzahl von theoretisch möglichen Störungen durch die entsprechende Druckänderung aktiviert werden kann. Zusätzlich wird ein geringeres Volumen über eine bestimmte Zeit injiziert, poroelastische Spannungsänderungen durch Rissöffnungen werden minimiert und das Risiko superkritischer unkontrollierter Störungsaktivierungen wird reduziert (Galis et al., 2017).

## 2.7 Begrenztes Nettoinjektionsvolumen

Je mehr Fluid injiziert wird, desto wahrscheinlicher wird das Auftreten von größeren induzierten seismischen Ereignissen (McGarr, 2014). Wir schlagen vor, dass standortspezifische Zusammenhänge zwischen der maximalen Erdbebenmagnitude, die durch Fluidinjektion hervorgerufen wird, und dem injizierten Nettofluidvolumen erhoben werden. Dieser Zusammenhang sollte von einem b-Wert von  $\sim 2$  gekennzeichnet sein. Wenn durch das injizierte Fluid eine Störung aktiviert wird, macht sich dies durch einen sprunghaften Anstieg der Magnitude und einer Reduktion des b-Werts bemerkbar.

Basierend auf diesen beiden Beobachtungen wird die Fluidinjektion gestoppt und gegebenenfalls das injizierte Fluid rückgefördert nachdem ein bestimmtes Volumen injiziert worden ist oder nachdem ein sprunghafter Anstieg der Seismizität beobachtet wurde.

## **2.8 Ampelsystem für zyklische Injektionen**

Im Kontext von zyklischer Injektion wurde das Ampelsystem aufgeteilt in Handlungen, die sofort durchgeführt werden müssen, abhängig davon, ob das induzierte seismische Ereignis in eine Phase mit hoher Fließrate oder geringer Fließrate aufgetreten ist. Zusätzlich wird das Injektionsdesign des folgenden Langzeit Zyklus angepasst. Ziel ist es das Volumen, das sicher injiziert werden kann, zu maximieren und damit das Reservoir so weit wie möglich zu stimulieren.

## **2.9 Re-injektion oder mehrstufige Injektion**

Für den Fall, dass eine Stimulation nicht die benötigte Produktivitätssteigerung gebracht hat zu dem Zeitpunkt zu dem das maximal erlaubte Volumen injiziert wurde, gibt es zwei Alternativen, um das Reservoir weiter zu stimulieren. Die erste Option ist, das rückgeförderte Fluidvolumen in das gleiche Bohrlochintervall zu reinjizieren. Die zweite Möglichkeit ist, die Bohrung in mehreren Stufen in verschiedenen Injektionsintervallen zu stimulieren (Meier et al., 2015), wobei ein ähnliches Volumen in jedem Intervall injiziert werden sollte.

## **3. Ergebnisse des ersten Feldexperiments**

Das CSS Konzept wurde zum ersten Mal im August 2017 in der Bohrung PX-1 der EGS-Lokation in Pohang in Korea bei einer Vorstimulation angewandt. Vorher und nachher wurden weitere Stimulationsarbeiten mit höheren Drücken und größeren Volumina über längere Zeiträume in dieser Bohrung und in der Nachbarbohrung PX-2 durchgeführt. Das Geothermieprojekt in Pohang wurde einstweilig eingestellt, nachdem am 15. November 2017 in der Nähe der beiden Bohrungen ein Erdbeben der Stärke Mw 5.5 registriert wurde. Ob und wie operative Arbeiten am Geothermiestandort dieses Erdbeben beeinflusst haben könnten wird derzeit intensiv untersucht (z.B., Grigoli et al., 2018; Dahm et al., 2018; Kim et al., 2018). Hier werden nur die Ergebnisse der CSS Stimulation kurz zusammengefasst. Die Zielstellung bestand darin, Daten für die Planung einer längeren Stimulation zu sammeln, eine maximale Magnitude von Mw 2.0 nicht zu überschreiben und die Produktivität der Bohrung zu verbessern. Bohrlochkopfdrücke, Fließraten und seismische Ereignisse, die in Echtzeit registriert wurden, sind in Abb. 2 für alle Phasen der Stimulation zusammengefasst. Eine detaillierte Präsentation und Analyse der Ergebnisse sind in Hofmann et al. (2018b) zu finden.

Die Stimulation ist in sieben Abschnitte unterteilt. In Phase 1 wurde die initiale Injektivität auf einen Wert von  $\sim 0.5$  l/s/MPa bestimmt. In Phase 2 wurde der Rissöffnungsdruck bestimmt. Dieser lag zwischen 15 und 17 MPa. In Phase 3 wurde das gleiche Injektionschema wie in Phase 2 wiederholt, nur mit zusätzlichen Kurzzeit Zyklen. Dabei gab es keine signifikanten Änderungen, außer dass der Rissöffnungsdruck etwas geringer war als in Phase 2. Nach diesen initialen Tests wurde die Bohrung für einen Tag eingeschlossen (Phase 4). Während dieser ersten vier Phasen wurde keine Seismizität registriert. Der erste Teil der Hauptstimulation (Phase 5) startete mit einem 1-tägigen Langzeitzyklus. Im zweiten Teil wurde der Langzeitzyklus verlängert, da immernoch keine Seismizität registriert wurde. Nachdem erste Seismizität beobachtet wurde kam es zu einem Mw 1.4 Ereignis (später überarbeitet auf Mw 1.2), das zu einem orangenen Ampelsystem-Alarm führte. Dies beinhaltete eine Reduktion der Fließrate auf eine Basisrate (Phase 6). Während dieser Phase geringer Injektion wurde ein seismisches Ereignis der Stärke Mw 1.8 (später überarbeitet auf Mw 1.9) registriert. Dieses Ereignis führte zum roten Ampelsystem-Alarm mit sofortiger Rückförderung

des kompletten Injektionsvolumens (Phase 7). Während dieser Zeit hat die Seismizität nie wieder eine Magnitude von  $M_w$  1.9 erreicht. Zielvorgabe war, dass die Magnituden unter einem Wert von  $M_w$  2.0 bleiben. Dies wurde für den untersuchten Zeitraum erreicht. Die Injektivität war stark druckabhängig, jedoch konnte keine signifikante nachhaltige Injektivitätssteigerung bei geringen Drücken beobachtet werden. Mögliche Gründe dafür sind die kurze Zeit dieser Teststimulation und die Risschließung bei geringen Drücken.

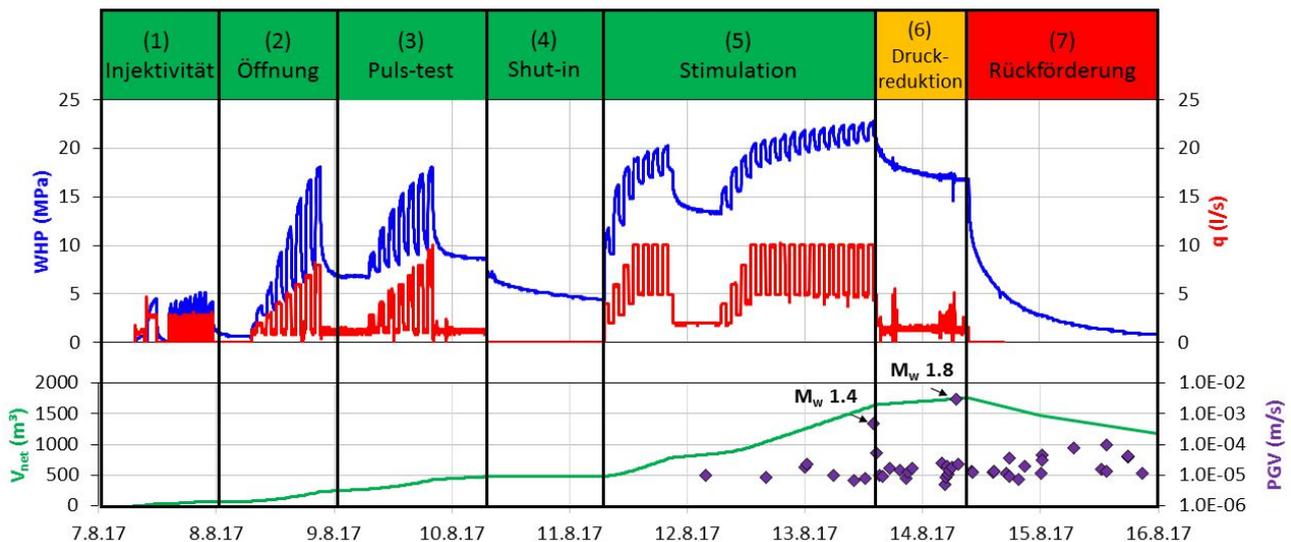


Abb. 2: Bohrlochkopfdruck (WHP), Injektionsrate ( $q$ ), injiziertes Nettovolumen ( $V_{\text{net}}$ ) und peak-ground velocity (PGV) gemessen während des ersten CSS Injektionsexperiments in Bohrung PX-1 der Pohang EGS Lokation in Korea im August 2017. Die Injektionssequenz ist in sieben Phasen unterteilt (Hofmann et al., 2018a, b).

#### 4. Diskussion

Obwohl bei diesem ersten Test im Feld die maximale Magnitude induzierter Seismizität unter dem Zielwert geblieben ist, müssen konsistente positive Resultate des CSS Konzepts noch bei weiteren Feldtests demonstriert werden. Zukünftige Experimente und Untersuchungen sollten das vorgeschlagene Konzept kritisch hinterfragen und gegebenenfalls dazu beitragen, kritische Komponenten davon zu optimieren, um sich der Herausforderung der besseren Kontrolle von induzierter Seismizität zu nähern. Deshalb ist das vorgeschlagene Konzept offen für Diskussionen und Verbesserungen. Fernziel ist die Minimierung der Maximalamplitude.

Es muss deutlich gemacht werden, dass unabhängig vom Injektionsdesign größere seismische Ereignisse dennoch auftreten können. Dies hängt hauptsächlich von den lokalen geologischen Bedingungen ab. Denn wenn die initiale Scherspannung auf einer Störungszone groß genug ist, könnten größere Teile davon schon durch sehr kleine Änderungen im effektiven Spannungsfeld aktiviert werden. In diesem Fall ist die maximale Magnitude von tektonischen Faktoren wie Spannungszustand und Störungsgeometrie abhängig (Norbeck & Horne, 2018). Daher ist das vorgestellte Konzept immer ein Teil einer übergeordneten Gefährdungsabschätzung und –verminderungsstrategie. Insbesondere Strukturgeologie, Spannungsfeld, und die hydraulischen Eigenschaften der Lokation sind zu untersuchen um das Risiko einer starken Bewegung eines großen Bereichs einer kritisch gespannten Störungszone durch Fluidrunderhöhung oder poroelastischen Spannungstransfer abzuschätzen. Daher kann abhängig von der lokalen Geologie eine Risiko-optimierte Bohrungsplanung ein effizienterer Weg sein, das Risiko größerer induzierter Erdbeben zu reduzieren.

## 5. Schlussfolgerungen

Ein neues hydraulisches Stimulationskonzept wurde vorgeschlagen mit dem Ziel, das seismische Risiko zu minimieren und dennoch die hydraulische Performance einer Geothermieranlage zu maximieren. Ob diese widersprüchlichen Ziele durch das vorgeschlagene Konzept erreichbar sind, muss noch gezeigt werden. In einem ersten Feldexperiment im EGS Standort in Pohang (Korea) blieb die maximale Magnitude während der Stimulation unter dem Zielwert. Die Produktivität der stimulierten Bohrung konnte jedoch nicht signifikant und nachhaltig verbessert werden. Durch die komplexen hydraulischen, mechanischen, thermischen, und chemischen interagierenden Prozesse sind mehr Experimente und numerische Analysen auf unterschiedlichen Skalen nötig, um die zugrundeliegenden Prozesse fluid-induzierter Seismizität besser zu verstehen und um unterschiedliche Aspekte des CSS Konzepts zu validieren und zu verbessern.

## Danksagung

Diese Studie wurde finanziell unterstützt vom Horizon 2020 research and innovation programme der Europäischen Union unter Zuwendungsvereinbarung No. 691728 (DESTRESS).

## Quellenangaben

BLÖCHER, G., CACACE, M., JACQUEY, A.B., et al.: Evaluating micro-seismic events triggered by reservoir operations at the geothermal site of Groß Schönebeck (Germany), *Rock Mech Rock Eng*, (2018), <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1521-2>.

DAHM, T., HAINZL, S., HOFMANN, H., et al.: Was the Mw 5.5, November 15, 2017, Pohang, South Korea, Earthquake related to anthropogenic activities: A physics-based study on trigger probabilities, *Tagungsband, European Seismological Commission 36<sup>th</sup> General Assembly, Valetta, Malta, 2-7 September (2018)*, ESC2018-S32-676.

DEICHMANN, N., GIARDINI, D.: Earthquakes induced by the stimulation of an enhanced geothermal system below Basel (Switzerland), *Seismol Res Lett*, 80, (2009), 784-798.

FRENCH, M.E., ZHU, W., & BANKER, J.: Fault slip controlled by stress path and fluid pressurization rate, *Geoph Res Lett*, 43, (2016), 4330-4339.

GALIS, M., AMPUERO, J.P., Mai, P.M., et al.: Induced seismicity provides insight into why earthquake ruptures stop, *Science Advances*, 3, (2017), eaap7528.

GRIGOLI, F., CESCO, S., RINALDI, A.P., et al.: The November 2017 Mw 5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea, *Science*, (2018), <https://doi.org/10.1126/science.aat2010>.

HOFMANN, H., ZIMMERMANN, G., ZANG, A., et al.: Comparison of cyclic and constant fluid injection in granitic rock at different scales, *Tagungsband, 52nd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Seattle, USA, 17.-20. June (2018a)*.

HOFMANN, H., ZIMMERMANN, G., FARKAS, M., et al.: First field application of cyclic soft stimulation at the Pohang Enhanced Geothermal System site in Korea, *Manuskript eingereicht bei Geophysical Journal International*, (2018b).

KIM, K.-H., REE, J.-H., KIM, Y.H., et al.: Assessing whether the 2017 Mw 5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event, *Science*, (2018), <https://doi.org/10.1126/science.aat6081>

MAJER, E., NELSON, J., ROBERTSON-TAIT, A., et al.: Protocol for addressing induced seismicity associated with enhanced geothermal systems, *Technical report*, (2012), DOE/EE-0662.

MCGARR, A.: Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection, *J Geophys Res*, 119, (2014), 1008-1019.

MEIER, P., RODRÍGUEZ, A., BETHMANN, F.: Lessons learned from Basel: New EGS projects in Switzerland using multistage stimulation and a probabilistic traffic light system for the reduction of seismic risk, *Tagungsband*, World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, 19.-25. April (2015).

NORBECK, J.H., & HORNE, R.N.: Maximum magnitude of injection-induced earthquakes: A criterion to assess the influence of pressure migration along faults, *Tectonophysics*, 733, (2018), 108-118.

VLCEK, J., EISNER, L., STABILE, T.A., et al.: Temporal relationship between injection rates and induced seismicity, *Pure Appl Geophys*, 175, (2017), 2821-2835.

ZHUANG, L., Kim, K.Y., Jung, S.G., et al.: Laboratory investigation of hydraulic fracturing of granite under triaxial stress state using different injection schemes – Part 1. Permeability enhancement, *Tagungsband*, CouFrac, Wuhan, China, 12.-14. November (2018).

ZIMMERMANN, G., ZANG, A., STEPHANSSON, O., et al.: Permeability enhancement and fracture development of hydraulic in situ experiments in the Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden, *Rock Mech Rock Eng*, (2018), <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1499-9>.

Telegrafenberg, 14473 Potsdam  
hannes.hofmann@gfz-potsdam.de