

Abschlussbereich – GEOBEST- CH

Other Publication**Author(s):**

Kraft, Toni ; Wiemer, Stefan 

Publication date:

2017-10

Permanent link:

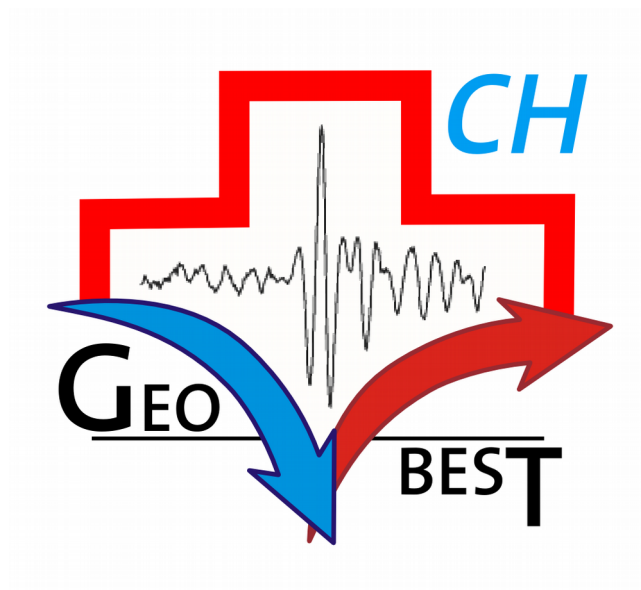
<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000426644>

Rights / license:

[Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International](#)

Abschlussbericht, 30. Oktober 2017

GEOBEST-CH



energie schweiz
Unser Engagement: unsere Zukunft.

Autoren

Dr. Toni Kraft, Schweizerischer Erdbebendienst, ETH Zürich

Prof. Stefan Wiemer, Schweizerischer Erdbebendienst, ETH Zürich

Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.

Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

Adresse

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Postadresse: 3003 Bern

Infoline 0848 444 444. www.energieschweiz.ch/beratung

energieschweiz@bfe.admin.ch, www.energieschweiz.ch

Inhalt

1 Ziel des Projektes.....	4
2 Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum Dezember 2016 - August 2017.....	6
2.1 Seismologische Analyse Geothermieprojekt Schlattingen.....	6
2.2 Überwachung Deep Underground Lab Grimsel.....	9
2.3 Überwachung Region Eglisau.....	10
2.4 Bohrlochseismometer Geothermieprojekt Pohang, S-Korea.....	11
2.5 Beratung des Kanton Waadt.....	13
2.6 Beratung des Kanton Basel-Stadt und Überwachung des Druckabbaus am DHM-Basel.....	13
2.7 Webseite Geothermie und Erdbeben.....	17
2.8 Internationaler Workshop in Davos.....	17
2.9 Bodenunruhekarte bei SwissTopo.....	18
2.10 Geothermie 2020 Genf.....	19
3 Referenzen.....	21

1 Ziel des Projektes

Die Tiefengeothermie ist eine vielversprechende Technologie zur grundlastfähigen, CO₂-armen Stromerzeugung. In der Schweiz und im europäischen Ausland ist das Interesse daher gross, dieses Verfahren zur importunabhängigen Strom- und Wärmeversorgung von Gemeinden und Betrieben zu nutzen. Die Zahl der Machbarkeitsstudien, die in den letzten Jahren in der Schweiz zu diesem Thema durchgeführt wurden, ist beträchtlich.

Der SED will dazu beitragen, über kantonale Grenzen hinweg einheitliche Qualitätsstandards im Umgang mit seismologischen Fragen bei Genehmigungsverfahren und der Durchführung von Tiefengeothermieprojekten zu etablieren. Im Rahmen des von EnergieSchweiz geförderten Projektes GEOBEST-CH bietet der SED deshalb nationalen, kantonalen und lokalen Aufsichtsbehörden kompetente und projektbegleitende seismologischen Beratung und Überwachung an. Dienstleistungen für die Industrie werden nur dann übernommen, wenn sie die Unabhängigkeit des SED nicht einschränken.

Im Rahmen von GEOBEST-CH bietet der SED folgende Dienstleistungen an:

Seismologische Überwachung

Um die seismische Reaktion des Untergrundes auf den Eingriff durch ein Tiefengeothermieprojekt zu beurteilen und gegebenenfalls geeignete Massnahmen zu ihrer Abminderung ergreifen zu können, ist eine fachgerechte seismologische Überwachung nötig. GEOBEST-CH verfügt über einen Pool von Oberflächen- und Bohrlochseismometern, die es dem SED ermöglichen, ausgewählte Projekte aktiv bei dieser wichtigen Aufgabe zu unterstützen. Der SED kann so ohne grosse Zusatzkosten für die Kantone beziehungsweise Betreiber seine Fachkompetenz und Erfahrung in den Bereichen Netzwerkplanung und -betrieb, Echtzeit-Erdbebenanalyse und automatische Alarmierung relevanter Behörden und Interessensgruppen in optimaler Weise einbringen. Gleichzeitig lässt sich damit vermeiden, dass eine seismische Überwachung aufgrund vom Kostendruck oder mangelnder Kompetenz nur unzureichend betrieben wird.

Unterstützung von Kantons- und Bundesstellen

Der SED verfügt über eine international anerkannte Expertise im Bereich der seismologischen Forschung und Überwachung. Er unterhält eine Arbeitsgruppe, die sich speziell mit wissenschaftlichen und angewandten Fragen zur induzierten Seismizität beschäftigt. GEOBEST-CH ermöglicht es dem SED, diese Expertise kantonalen und nationalen Aufsichtsbehörden zur Verfügung zu stellen, denen diese derzeit oftmals noch fehlt. Der SED kann sie so bei der Begutachtung seismologischer Fragen im Rahmen der Bewilligung, des Baus und des Betriebs von Tiefengeothermieprojekten beraten und unterstützen.

Qualitätssicherung

Der SED trägt mit GEOBEST-CH zur Qualitätssicherung im Bereich der Überwachung und Risikoabschätzung von Tiefengeothermieprojekten bei. Insbesondere wird eine Homogenisierung im Umgang mit seismologischen Fragen im Kontext der Umweltverträglichkeitsprüfung über die Kantonsgrenzen hinweg angestrebt. Diese soll es künftig auch kommerziellen Anbieter ermöglichen, qualitativ hochwertige Produkte anzubieten, die möglicherweise zertifiziert werden können.

Neutrale und kompetente Information

Die unabhängige und objektive Information aller Interessensgruppen ist essentiell für einen offenen Risikodialog zum Thema „Tiefengeothermie und induzierte Erdbeben“. Im Rahmen von GEOBEST-CH leistet der SED wichtige Beiträge hierzu. Zum einen erstellt er neutrale und verlässliche Hintergrundinformationen zu allen Aspekten des Themas und veröffentlicht diese in den drei Amtssprachen auf seiner Webseite. Zum andern informiert er während der Durchführung eines GEOBEST-CH-begleiteten Tiefengeothermieprojektes echtzeitnah über beobachtete Erdbeben und deren Interpretation. BürgerInnen können ihre Beobachtungen zu einem Erdbeben online mitteilen.

Wissens- und Technologietransfer

Die Mechanismen, die zur induzierten Seismizität in der Tiefengeothermie führen, sind nur in den Grundzügen verstanden. Im Besonderen sind derzeit keine verlässlichen Methoden bekannt, um induzierte Erdbeben unakzeptabler Stärke sicher vorherzusagen oder gar zu verhindern. Eine Intensivierung der Zusammenarbeit und des Austausches zwischen Wissenschaft und Industrie ist daher auf internationaler Ebene notwendig, um geeignete Lösungen zu entwickeln. GEOBEST-CH sieht vor, nationale und internationale Workshops zum Thema induzierte Seismizität durchzuführen, um den Wissens- und Technologietransfer zwischen Wissenschaft, Industrie sowie den lokalen Interessengruppen anzuregen und sicherzustellen.

Aus- und Weiterbildung

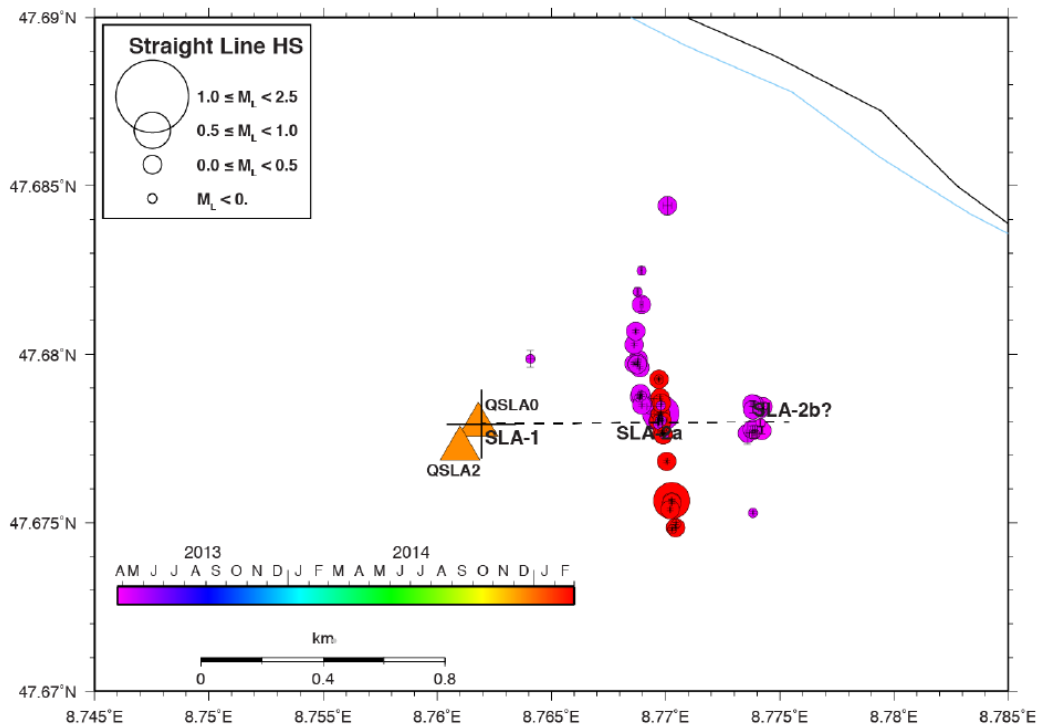
Der SED leistet dank seiner engen Anbindung an die ETH Zürich im Rahmen von Vorlesungen und Nachdiplomkursen einen wesentlichen Beitrag zur Aus- und Weiterbildung im Bereich der Tiefengeothermie. Im Rahmen von GEOBEST-CH können an der ETH Bachelor- und Masterarbeiten zum Thema induzierte Erdbeben betreut werden. Idealerweise geschieht dies in Zusammenarbeit mit Betreibern der vom SED im Rahmen von GEOBEST-CH begleiteten Projekte und den beteiligten kantonalen oder nationalen Stellen.

2 Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum Dezember 2016 - August 2017

2.1 Seismologische Analyse Geothermieprojekt Schlattingen

Der SED hat in den Jahren 2013 und 2015 ein lokales seismologisches Überwachungsnetzwerk beim Geothermieprojekt Schlattingen betreiben. In beiden Überwachungszeiträumen wurden 4 Oberflächenstationen an identischen Standorten betrieben. Im Jahr 2013 war zusätzlich ein Bohrlochseismometer am Fuss der Bohrung SLA-1 auf 1185m Tiefe eingebaut. Die Installationsarbeiten für das Bohrlochseismometer wurden vom Bundesamt für Energie unterstützt (Vertragsnr.: SI/500864-01).

Abbildung 1: Relativlokalisierung von 63 induzierten Erdbeben des Geothermieprojektes Schlattingen, die durch Spülungsverluste und Säurestimulationen ausgelöst wurden. Die absolute Lage der seismischen Wolke hat eine Unsicherheit von ca. 1km. Die relative Lage der Beben zueinander kann jedoch mit einer sehr hoher Genauigkeit von wenigen Zehnermetern bestimmt werden (siehe Fehlerbalken). Die Grösse der Kreise gibt die Magnitude der Erdbeben an (all kleine $M_L 0.4$). Die Farbe kennzeichnet den zeitlichen Verlauf der Seismizität. (aus Kraft et al., 2017a)

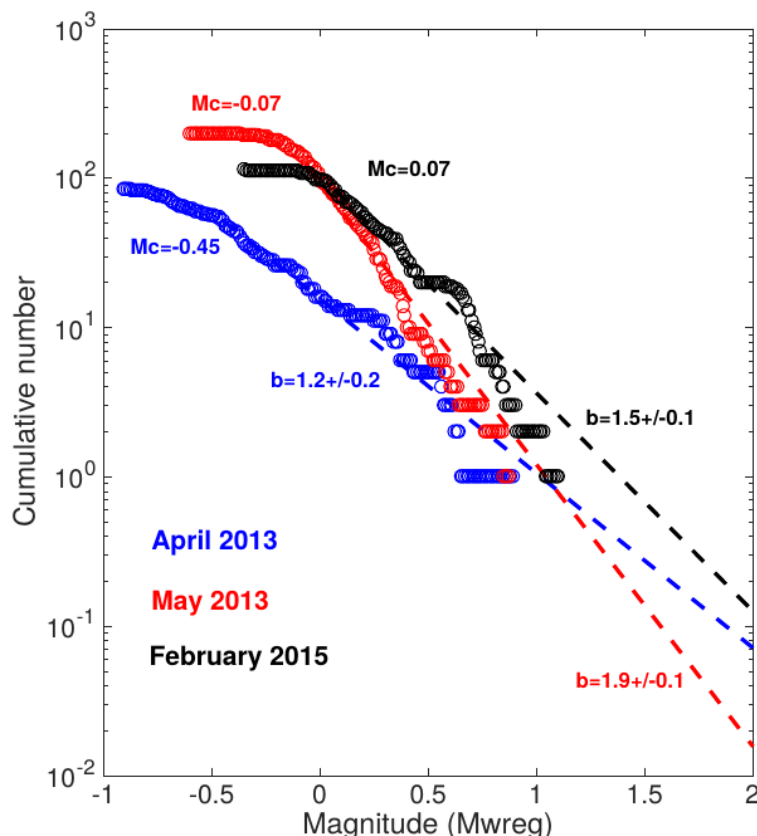


Die Auswertung der seismologischen Daten, die mit diesen Stationen aufgezeichnet wurden, konnte Anfang 2017 abgeschlossen werden. Die Ergebnisse wurden auf dem Schatzalp Workshop in Davos vorgestellt (Kraft et al., 2017a) und in einem NAGRA-Arbeitsbericht beschrieben (Kraft et al., 2017b). Neben den Ergebnissen, die schon im zweiten Zwischenbericht beschrieben wurden (Kraft & Wiemer, 2016), wurden Relativlokalisierungen der Mikrobeben berechnet und die Magnitudenhäufigkeitsverteilung der Erdbeben analysiert.

Die Ergebnisse der Relativlokalisierung sind in Abb. 1 dargestellt. Die Relativlokalisierung verwendet die Einsatzzeitdifferenzen gleicher seismischer Phase von Erdbebenpaaren an gleichen seismologischen Stationen, um den Abstand der Beben zueinander zu bestimmen. Da man diese Einsatzzeitdifferenzen mit Hilfe von Kreuzkorrelationsverfahren sehr genau bestimmen kann (wenige Millisekunden), kann auch der Abstand der Beben zueinander deutlich besser berechnet werden (wenige Zehnermeter) als ihre absolute Lage im Raum (mehrere Hundertermeter).

Wie in Abb. 1 zu erkennen ist, reihen sich die Erdbebenhypozentren entlang einer scharfen, NNW-SSE streichenden Struktur auf, die über eine Länge von ca. 1km seismisch aktiviert wurde. Aufgrund der starken zeitlichen Korrelation zwischen der Seismizität und den Spülungsverlusten im April 2013, die beim Durchteufen einer prominenten Kluffzone am Ende der Horizontalstrecke der Bohrung SLA-2b (Frieg, 2015) aufgetreten sind, ist davon auszugehen, dass die Erdbeben auch räumlich mit dieser Kluffzone zusammenfallen. Diese Annahme wird auch dadurch gestützt, dass das Streichen der Kluffzone, das in der Bohrung gemessen wurde, sehr gut mit dem Streichen der seismischen Wolke übereinstimmt. Die Tiefenlage der Erdbeben stimmt im Rahmen der Unsicherheit mit der Tiefenlage des stimulierten Oberen Muschkalk (ca. 1km) überein .

Abbildung 2: Kumulative Magnitudenhäufigkeitsverteilung der induzierte Seismizität am Geothermieprojekt Schlattingen. Die Farben unterscheiden Phasen mit unterschiedlichen Aktivitäten am Bohrloch SLA-2b: Blau: Spülungsverluste im April 2013; Rot: Säurestimulation im Mai 2013; Schwarz: Säurestimulation im Februar 2015. Es sind jeweils die Vollständigkeitsmagnitude M_c und der b-Wert der Verteilungen angegeben (aus Kraft et al., 2017a).



Die Magnitudenhäufigkeitsverteilung der mehr als 400 detektierten Mikroerdbeben zeigt deutliche Unterscheide, wenn die Seismizität der Spülungsverluste und der Säurestimulationen getrennt betrachtet wird (Abb. 2). Der b-Wert, der das Verhältnis von grossen zu kleinen Magnituden in der Verteilung beschreibt, zeigt für die Seismizität der Spülungsverluste einen Wert von 1.2. Für die Säurestimulationen im Mai 2013 und Februar 2015 werden b-Werte von 1.5 und 1.9 erreicht. Für natürliche, tektonische Erdbeben werden in der Regel b-Werte um 1.0 beobachtet. In vulkanisch aktiven Zonen werden hingegen häufig hohe b-Werte (grösser 1.5) gemessen, die deshalb mit fluidgetriebener Seismizität in Verbindung gebracht werden. Der mehr tektonische b-Wert der Seismizität der Spülungsverluste deutet somit an, dass die Seismizität in diesem Fall durch die Reaktivierung eines präexistenten, vorgespannten Bruches getrieben wurde. Wohingegen die hohen b-Werte der Säurestimulationen auf primär fluidgetriebene Seismizität hindeuten.

Aus der Magnitudenhäufigkeitsverteilung können mit Hilfe von erdbebenstatistischen Modellen Aussagen über die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten stärkere induzierte Beben gewonnen werden. Diese Technik soll in zukünftigen fortgeschrittenen Ampelsystemen zur Vermeidung unerwünscht starker induzierter Erdbeben genutzt werden. Eine Analyse dieser Art zeigt, dass während der seismischen aktiven Phasen in Schlattingen die tägliche Auftrittswahrscheinlichkeit für ein spürbares Erbeben ($M_w \geq 2.0$) im Mittel kleiner als $4 \cdot 10^{-4}$ und somit relativ gering war. Das grösste beobachtete Beben hatte eine Magnitude von ML0.4 und trat während der Säurestimulation im Februar 2015 auf.

Wichtige Resultat der Untersuchungen sind:

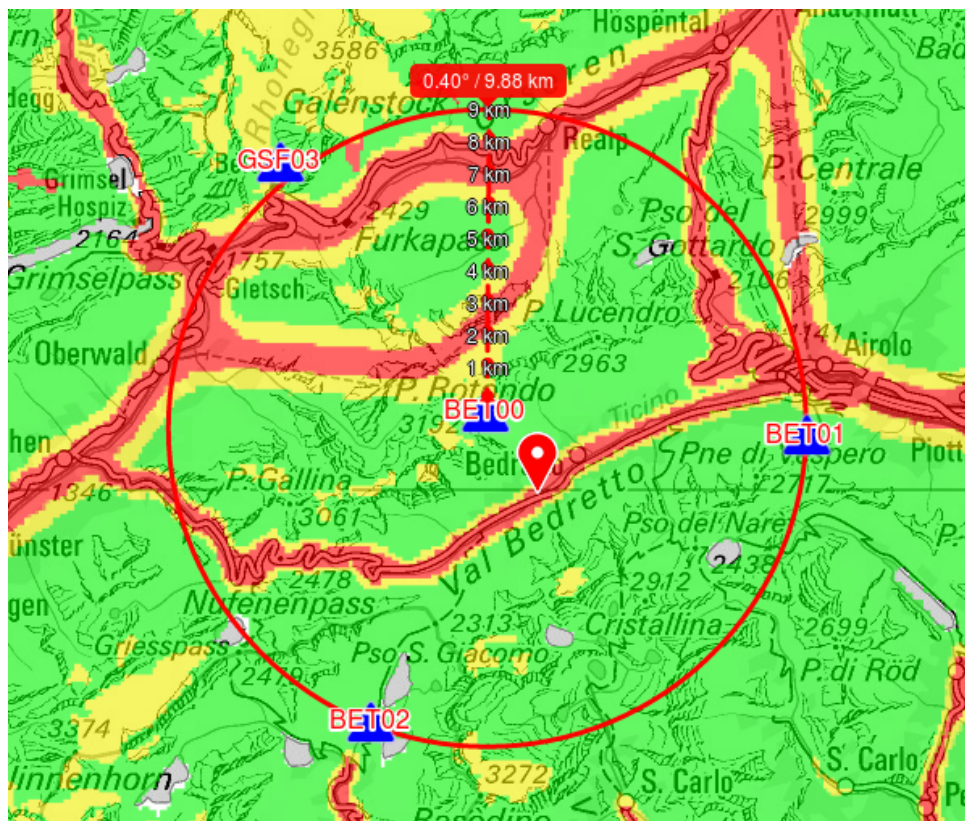
- 1) Selbst Säurestimulationen, mit ihren geringen Injektionsvolumen, können einen grossen Einwirkbereich über den Injektionspunkt hinaus haben. Dies kann sich einerseits positive auf den Stimulationserfolg auswirken, andererseits erhöht die grosse Reichweite der seismischen Aktivierung auch die Gefahr kritisch vorgespannte Verwerfungen im Untergrund anzutreffen und zu reaktivieren.**
- 2) Das Auslösen von Mikroseismizität durch die Spülungsverluste in der Bohrphase zeigt, dass schon geringe Überdrücke (wenige bar) ausreichen, um kritisch vorgespannte Brüche zu reaktivieren.**
- 3) Der Offlinebetrieb der seismologischen Überwachung ist nicht zu empfehlen. Einerseits ist er sehr unwirtschaftlich (enormer Aufwand für Betreuung und Datenmanagement) und andererseits ohne Nutzen für die Betriebssteuerung (keine Ampelsteuerung zur Vermeidung starker induzierte Beben möglich).**
- 4) Fortgeschrittene Detektions- und Lokalisierungsmethoden sind ein unverzichtbares Hilfsmittel bei der Beurteilung der induzierten Seismizität und sollten zukünftig in Echtzeit angewendet werden.**

2.2 Überwachung Deep Underground Lab Grimsel

Die Überwachung (GSFnet) der weiteren Umgebung des Grimsel Felslabors wurde im Berichtsjahr 2017 weitergeführt. Im Felslabor wurden vom Swiss Competence Center SCCER-SoE¹ mehrere hydraulischen Stimulationsexperimente an einer Scherzone im Kristallingestein durchgeführt. Die dabei induzierte Mikroseismizität wurde vom SCCER-SoE mit einem akustischen Emissionsmessnetz im Felslabor hoch-genau aufgezeichnet. Keines der Mikrobeben war stärker als ML-2.0. Die Aufzeichnungen des GSFnet bestätigen diese Beobachtung, in dem hier kein Beben aufgezeichnet wurde, das mit den Experimenten in Felslabor in Verbindung gebracht werden konnte. Weiterhin wurden jedoch natürliche und menschengemachte seismischen Signale, aus der weiteren Umgebung des Grimsel Felslabors bis hinab zu Magnituden von ML-1.5, aufgezeichnet.

Nach Beendigung der Experimente im Grimsel Felslabor im Sommer 2017, wurde das GSFnet weitgehend abgebaut. Die Station GSF03 am Furkapass wird noch weiterbetrieben, um sie für die nächste Phase von Feldversuchen des SCCER-SoE im Bedretto-Fensterstollen zwischen Furka-Tunnel und Val Bedretto nutzen zu können.

Abbildung 3: Mögliche Geometrie des zukünftigen Überwachungsnetzes (BSFnet) für den SCCER-SoE Feldversuch im Bedretto-Fensterstollen. Die Hintergrundkarte zeigt die erwartete Bodenunruhe (siehe Kap. 2.9). Die Station GSF03 am Furkapass wird zu diesem Zweck vorerst weiterbetrieben. Der rote Kreis markiert eine Entfernung von 10km vom Mittelpunkt des Bedretto-Fensterstollen.



¹ <http://www.sccer-soe.ch>

Die Stationen QEG01 und QEG02 werden als Freifeldstationen mit Solarzellen betrieben. Während der Messkampagne in Eglisau wurde die Konfiguration der Übertragungsintervalle weiter optimiert, um einen möglichst geringen Stromverbrauch bei möglichst echtzeit-naher Übertragung der seismologischen Daten zu gewährleisten. Unter günstigen Bedingungen ist die Echtzeitübertragung der Daten gut möglich. Bei ungünstiger Witterung ist es jedoch nötig die Daten in Paketen ein- bis zweimal pro Tag zu übertragen. Zukünftig könnte ein Datenmodem mit geringerem Stromverbrauch die Situation deutlich verbessern. Diese Hardwarelösung ist derzeit am SED in Erprobung.

Mit Hilfe der Template-Matching Methode von Herrmann et al. (2017), die mit Unterstützung von GEOBEST-CH für die Analyse der induzierten Seismizität in Basel entwickelt wurde, wurde versucht Mikrobeben zu detektieren, die sehr ähnlich zu den bekannten 8 Erdbeben in der Region Eglisau sind. Mit Hilfe der neu installierten Stationen sollten diese Beben dann besser lokalisiert werden und somit auch die Tiefenlage der bekannten Beben überprüft werden. Obwohl sehr viele solcher Beben detektiert wurden, waren diese sämtlich zu klein um lokalisiert werden zu können. Eine Verbesserung der bisherigen seismotektonischen Wissensstandes war deshalb, auch nach einem Jahr Messzeit, noch nicht möglich.

Die Erkenntnisse aus der Überwachung der Region Eglisau lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1) Die Messungen bestätigen, dass in Gebieten mit geringer seismischer Aktivität eine Verbesserung des Kenntnisstandes zur rezenten Hintergrundseismizität und Seismotektonik, auch mit verbesserten Überwachungsnetzwerken und fortschrittlichen Analysemethoden nicht immer möglich ist. Um diese Fragen in Gebieten mit geringer Seismizität zu beantworten, sind Messkampagnen mit längerer Laufzeit (5-10 Jahre) nötig. Mit einer wenige Monate dauernde seismologischen Überwachung im Vorfeld eines Tiefengeothermieprojektes wird es deshalb selten möglich sein, seismotektonische Fragestellungen zu beantworten. Die Installation eines seismologischen Überwachungsnetzes, mehr als sechs Monate vor Bohrbeginn eines Geothermieprojektes, sind deshalb nur in Ausnahmefällen zu empfehlen. Eine mehrmonatige Vorlaufzeit stellt jedoch eine ausreichende Erprobung der technischen und betrieblichen Abläufe sicher.

2) Die kontinuierliche seismologische Überwachung mit Hilfe der solarbetriebenen Stationen des GEOBEST-Pools ist derzeit schon oft möglich. Für die sicherheitsrelevante Echtzeitüberwachung im Zusammenhang mit induzierter Seismizität, sollte jedoch weiterhin überwiegend auf Stationen mit verlässlicher Netzstromversorgung gesetzt werden, um eine ausreichenden Betriebssicherheit über alle Jahreszeiten sicherzustellen.

2.4 Bohrlochseismometer Geothermieprojekt Pohang, S-Korea

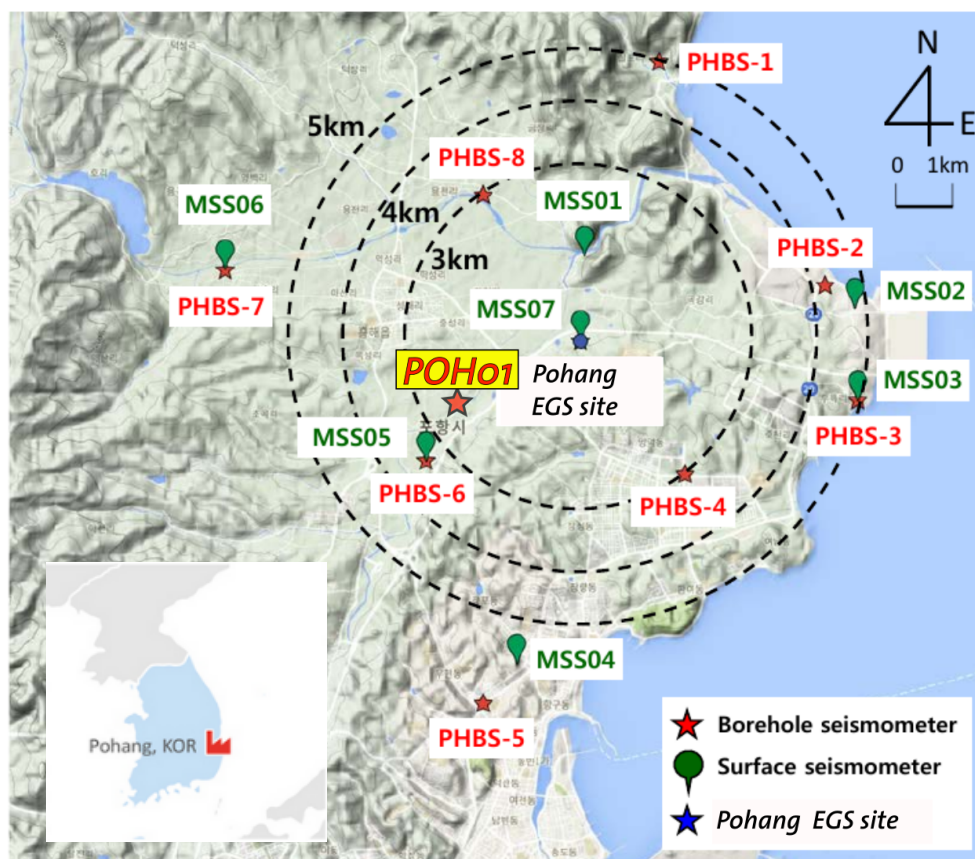
Am Geothermieprojekt Pohang, S-Korea, wurde im Winter 2016/17 hydraulischen Stimulationsmassnahmen durchgeführt. Im Rahmen des EU-Horizon-2020 Projektes DESTRESS² unterstützt der SED, in Zusammenarbeit mit der GeoEnergie Suisse AG (GSE), die Überwachung

² www.destress-h2020.eu

der hydraulischen Stimulationen in über 3km Tiefe. Hierzu wurde ein Bohrlochseismometer mit 2.5km Kabel, ein Oberflächensensor und elektronische Aufzeichnungsgeräte aus dem GEOBEST-Instrumentenpool zur Verfügung gestellt. Im DESTRESS-Projekt sollen sog. Soft-Stimulationsmassnahmen erprobt werden, die nur geringe Seismizität auslösen sollen. Eine Beteiligung an der Überwachung ermöglicht es dem SED eine weiteren hochwertigen Datensatz bearbeiten zu können und daraus wichtige Erkenntnisse für zukünftige Tiefengeothermieprojekte ziehen zu können.

Mitarbeiter der GES konnten den Sensor im Dezember 2016, in einer Brunnenbohrung in weniger als 3km Entfernung vom Geothermieprojekt Pohang, in 2274 m Tiefe, installieren. Der GEOBEST-Bohrlochsensor, POH01, ergänzt ein seismisches Monitoringsystem des Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), das aus Oberflächenstationen, flachen Bohrlochstationen und eine Bohrlochkette mit 3 Sensoren in einer Tiefe von 1.3 km direkt über der Stimulation, die in 4.3km Tiefe stattfand, besteht (Abb. 5).

Abbildung 5: Seismologisches Überwachungsnetz des Geothermieprojektes Pohang in Südkorea. Die Station POH01, die mit GEOBEST-Instrumenten betrieben wird und deren Daten täglich zum SED übertragen werden, ist als roter Stern eingezeichnet (verändert nach Kim et al., 2017).



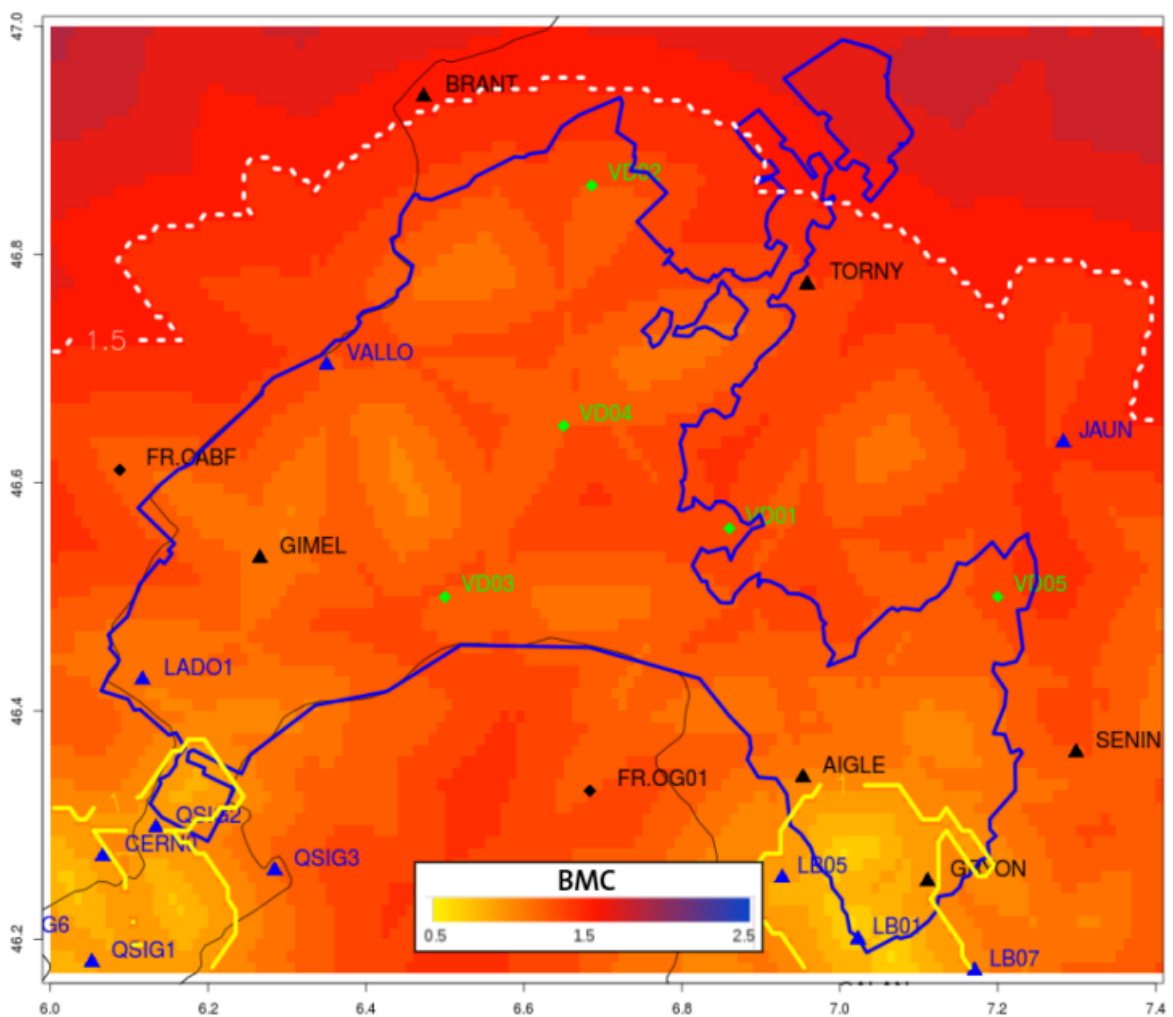
Die Daten der Bohrlochstation POH01 werden täglich per Internet zum SED übertragen und dort im Datenarchiv des SED gespeichert. Online-Zugriff auf die Daten haben vorerst nur

die Projektpartner von DESTRESS. Das Bohrlochseismometer hat im Laufe des Jahres 2017 zwei hydraulischen Stimulationen überwacht und mehrere hundert Mikroerdbeben aufgezeichnet. Die Daten werden derzeit von Experten des KIGAM, GFZ-Potsdam und GES im Rahmen von DESTRESS ausgewertet.

2.5 Beratung des Kanton Waadt

Der SED hat mit Unterstützung von GEOBEST-CH im Auftrag des Kanton Waadt ein Gutachten zur natürlichen Seismizität des Kantons erstellt und Vorschläge zur Verbesserung der seismologischen Überwachung und zum Umgang mit der induzierten Seismizität im Zusammenhang mit Tiefengeothermieprojekten erstellt.

Abbildung 6: Abschätzung der Detektionseigenschaften eines möglichen zukünftigen Überwachungsnetzes für den Kanton Waadt (grün). Die existierenden (schwarz) und die bereits geplanten (blau) Stationen des SED wurden berücksichtigt. Die Farbcodierung im Hintergrund gibt die erwartete Vollständigkeitsmagnitude (BMC) an, die mit der Formel von Kraft et al. (2013) berechnet wurde.

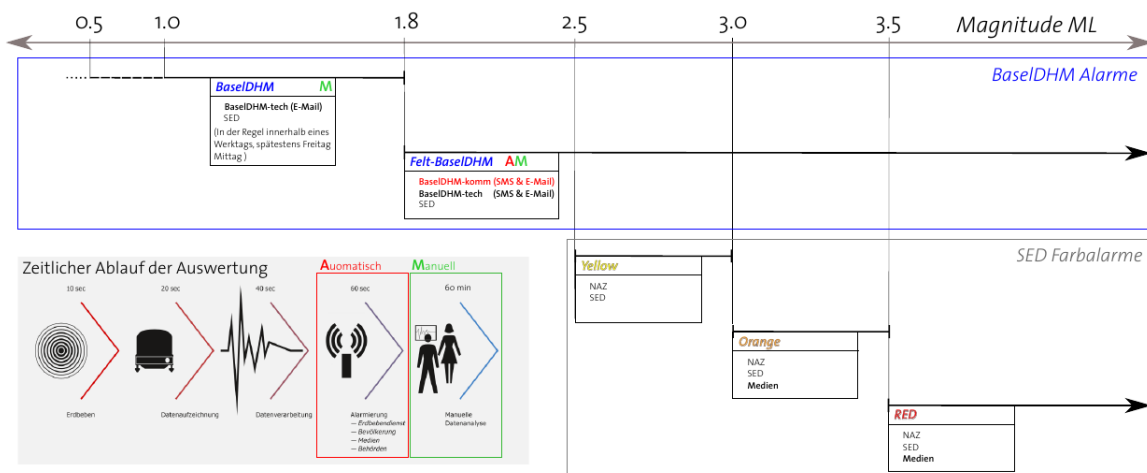


2.6 Beratung des Kanton Basel-Stadt und Überwachung des Druckabbaus am DHM-Basel

Seit dem Mai 2012 wurde in dem im Dez. 2006 hydraulisch stimulierten Volumen des Projektes Deep Heat Mining (DHM) Basel ein Anstieg der Seismizität beobachtet. Ein von Kanton Basel-Stadt beauftragtes Gutachten des SED (Wiemer et al., 2016) legte nahe, dass diese Seismizität mit dem Verschluss der Bohrung Basel-1 im April 2011 und dem danach beobachteten Druckerhöhung am Bohrlochkopf in Zusammenhang steht. Der SED hat den Kanton und die Projektverantwortlichen über die Ergebnisse der Studie auf eine Sitzung Anfang 2017 informiert. Diese haben daraufhin beschlossen, den Überdruck am Bohrlochkopf (von knapp 9 bar im Dezember 2016) schrittweise zu reduzieren und innerhalb von 10 Wochen vollständig abzubauen.

Abbildung 7: Magnitudenabhängiges Alarmierungskonzept des SED für die Druckabbauphase an der Bohrung Basel-1. Neben der SED-Farbalarmen die für alle möglicherweise spürbaren Erdbeben in der Schweiz versandt werden, wurden zwei projektspezifische Alarme (Felt-BaselDHM für $ML \geq 1.8$ und BaselDHM für $ML < 1.8$) eingeführt, die nur an definierte Projektgruppen des Kantons und des Betreibers versandt werden.

Magnitudenabhängige Alarmierung für den Perimeter BaselDHM



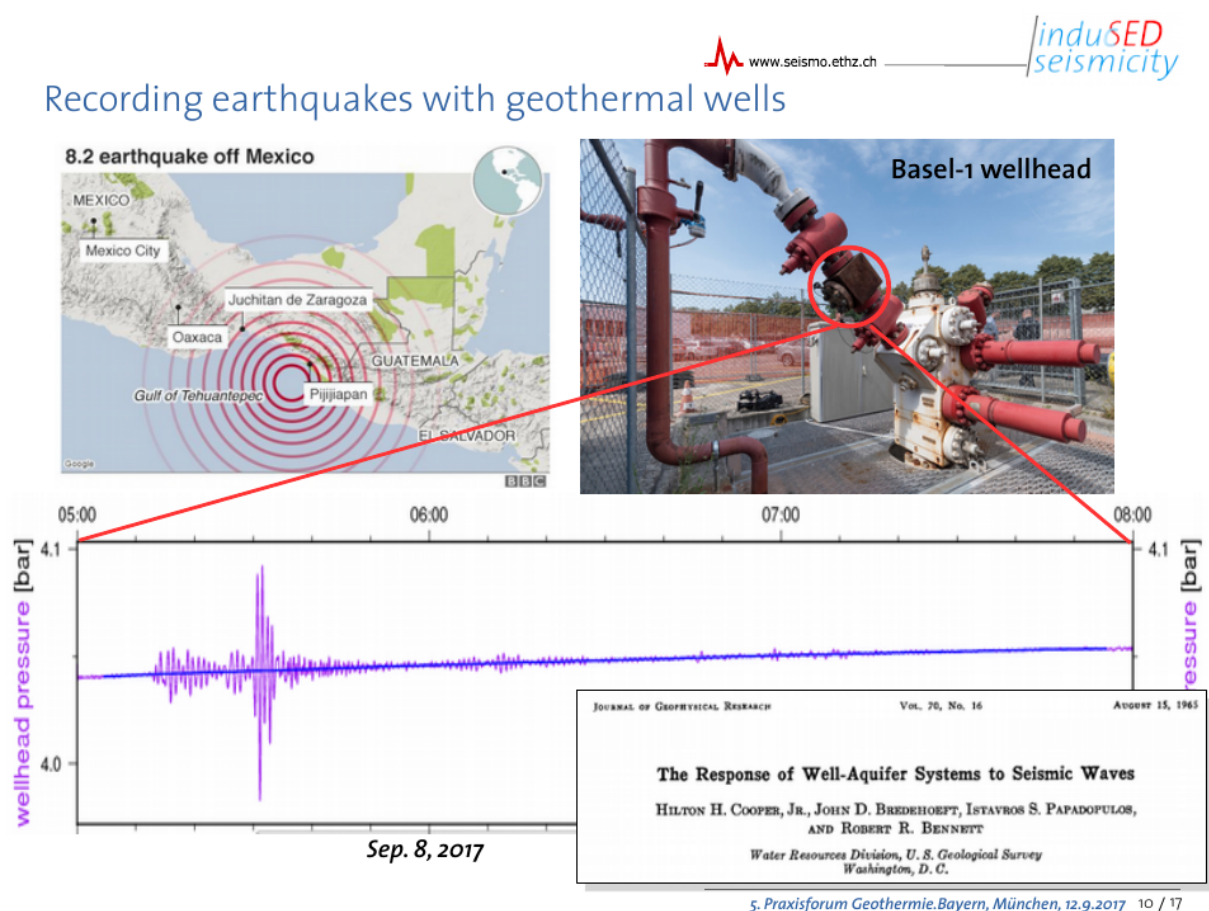
Das Öffnungskonzept der Industriellen Werke Basel (IWB), der Eigentümerin der Bohrung Basel-1, sieht vor, den Druck in wöchentlichen Schritten von 0.5 - 1.0 bar zu reduzieren. In den Phasen zwischen den Druckschritten soll die Seismizität überwacht werden. IWB will ein klassisches magnitudenbasiertes Ampelsystem, das zusätzlich die beobachteten Erdbebenraten berücksichtigt, einsetzen, um die seismische Reaktion des Untergrundes auf die Druckreduktion zu beurteilen und gegebenenfalls längere Wartezeiten zwischen den Druckschritten einzuhalten.

Der SED führt im Auftrag des Kanton Basel-Stadt und der IWB die seismische Überwachung während der Druckreduktionsphase im Rahmen von GEOBEST-CH durch. Dazu analysiert er die Daten der Bohrlochstation OTER2 (in 2.7km Tiefe) täglich mit der Template-Matching Methode von Herrmann et al. (2017), um Mikrobeben bis zu einer Magnitude von ca. ML-2.0 zu detektieren. Erdbeben grösser als ca. ML0.5 können mit dem derzeitigen Überwachungsnetz des SED lokalisiert werden. Automatische Lokalisierungen stehen innerhalb von ca. einer Minuten zur

Verfügung und lösen eine sofortige Alarmierung der Projektbeteiligten per SMS und E-Mail aus (Abb. 7).

Alle lokalisierten Erdbeben werden innert 24 Stunden relativ zu den schon bekannten Beben lokalisiert, um ihre genaue Lage in der seismischen Wolke zu bestimmen. Erdbeben die nicht lokalisiert werden können, werden über die Ähnlichkeit ihrer Seismogramme zu bekannten, gut lokalisierten Erdbeben, einer bestimmten Region des Reservoirs zugeordnet, wobei eine Genauigkeit von ca. 200m erreicht werden kann.

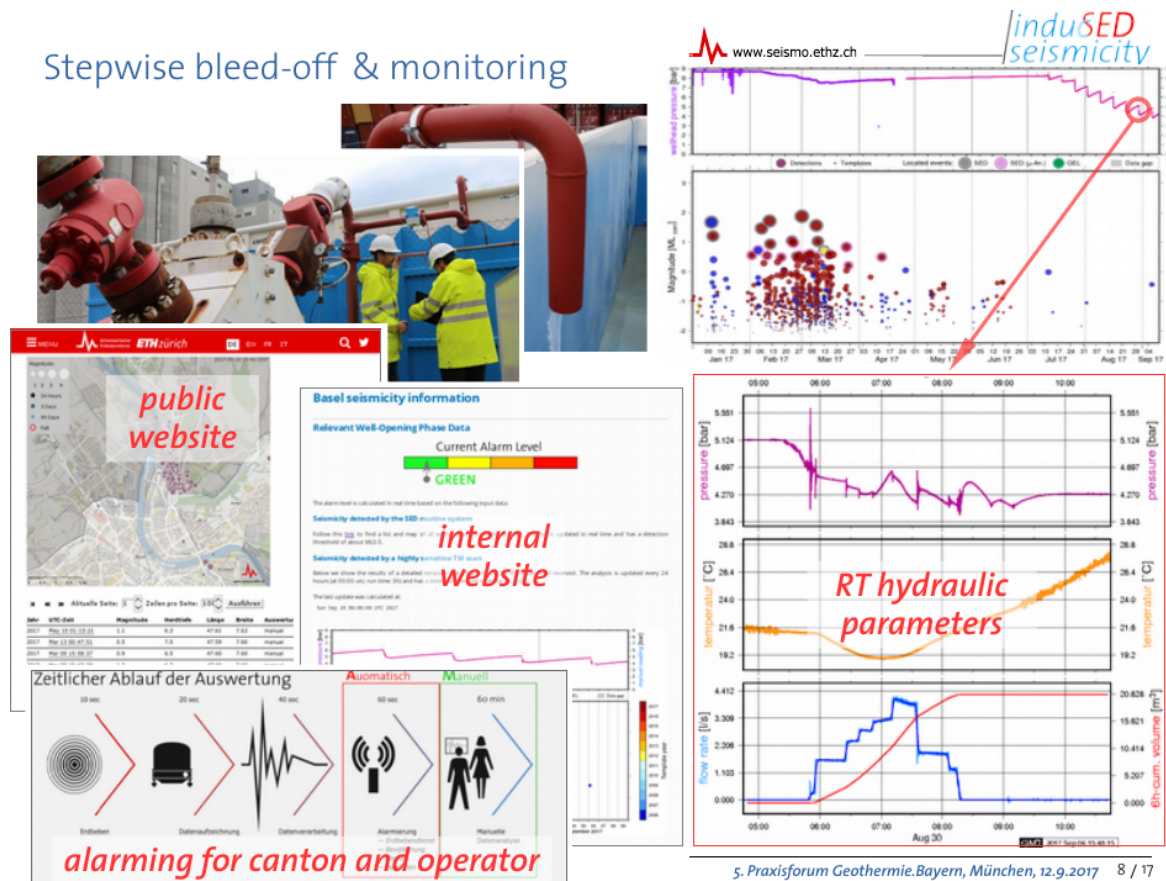
Abbildung 8: Beispiel des Hydroseismogramms des M8.2 Mexiko Erdbebens vom 8. September 2017, das am Drucksensor des Bohrlöchkopfes von Basel-1 aufgezeichnet wurde.



Neben der seismischen Daten zeichnet der SED auch die hydraulischen Daten, die am Bohrlöchkopf gemessen werden, mit einem GEOBEST-Messgeräte auf und überträgt sie in Echtzeit an das Datenarchiv des SED. Dabei werden Bohrlöchkopftemperatur, Fließrate aus der Bohrung und Bohrlöchkopfdruck mit einer Abtastrate von 20 Hz aufgezeichnet. Der hohe dynamischen Amplitudenbereich der 24-bit Messung erlaubt die Aufzeichnung von sehr kleinen Druckschwankungen. Daher können neben den Gezeiten der festen Erde auch Hydroseismogramme von starken Regional- und Fernbeben (ab ca. ML6) aufgezeichnet werden. Diese Druckschwankungen sind auf poro-elastische Phänomene zurückzuführen und enthalten Informationen über die hydraulischen Eigenschaften des Untergrundes um die Bohrung. Daher können diese Parameter aus den Messungen abgeleitet werden. Falls es die Datenqualität

zulässt, kann so die Veränderung der hydraulischen Eigenschaften des stimulierten geothermischen Reservoirs, über mehr als 10 Jahre rekonstruiert werden. Die Daten sollen im Rahmen einer Masterarbeit am SED analysiert werden.

Abbildung 9: Datenprodukte die der SED bei der seismischen Überwachung des Druckabbaus an der Bohrung Basel-1 den Betreibern, dem Kanton und der Öffentlichkeit zur Verfügung stellt.



Der SED hat eine internen Webseite für den Kanton und die Betreiber aufgesetzt, auf der in Echtzeit über die aktuelle Seismizität und das aktuelle Alarmlevel informiert wird. Ausserdem können die hydraulischen Parameter, die am Bohrlochkopf gemessen werden minuten-aktuell gesichtet werden. Eine öffentliche Webseite³ informiert die Öffentlichkeit über die vom SED lokalisierten Erdbeben in der Nähe der Tiefbohrung, die mit dem ehemaligen Geothermieprojekt in Zusammenhang stehen könnten. Wie auf der Startseite des SED, werden dabei die Beben der letzten 90 Tage farbcodiert nach Aktualität dargestellt. Um den Kontext zur induzierten Seismizität der Jahre 2006/2007 herzustellen, sind diese Beben ebenfalls dargestellt. Über eine Liste können alle Erdbeben im Detail begutachtet und zusätzliche seismologische Hintergrundinformationen abgefragt werden (Abb. 9). Weiterführende Seiten geben Hintergrundinformationen zum Geothermieprojekt und der Druckabsenkung am Bohrloch. Die transparente Information der Öffentlichkeit wird vom Kanton und IWB unterstützt und durch eigene Pressemitteilungen ergänzt.

³ <http://www.seismo.ethz.ch/en/earthquakes/monitoring/geothermal-energy-basel/Monitoring-geothermal-borehole-in-Basel>

Lehren aus der Überwachung der Druckabsenkung in Basel-1:

- 1) Die transparente Information der Öffentlichkeit wurde von allen Beteiligten positiv bewertet und hat zu einer objektiven Berichterstattung über die geplanten Arbeiten beigetragen.**
- 2) Die interne Webseite mit detaillierten minuten-aktuellen Informationen zur Seismizität, hydraulischen Parametern und Alarmlevel hat sich als sehr hilfreich für alle Beteiligten erwiesen und zur bisherigen erfolgreichen Durchführung des Projektes beigetragen.**
- 3) Die tägliche, hoch-genaue, automatische Analyse der Mikroseismizität, mit einer Genauigkeit, die um mehrere Grössenordnungen höher ist als bei der Standardüberwachung des SED, hat das Vertrauen in die seismologische Überwachung gestärkt und bisher zu einem reibungslosen Ablauf der Operation beigetragen.**
- 4) Die Überwachung der hydraulischen und seismologischen Daten mit gleicher Zeitbasis und -genauigkeit, ermöglicht erstmals die Auswertung poro-elastischer Phänomene, die zur besseren Charakterisierung des geothermischen Reservoirs in Basel beitragen können.**

2.7 Webseite Geothermie und Erdbeben

Der SED hat weiter an der Bereitstellung von Hintergrundinformationen zur Geothermie und induzierter Erdbeben gearbeitet⁴. Der SED informiert zudem regelmässig in seinen Aktuell-Beiträgen über induzierte Erdbeben in der Schweiz. Die Forschungsgruppe Induzierte Seismizität stellt ihre Arbeit ebenfalls auf der Webseite vor, die regelmässig aktualisiert wird.

Der Betrieb der Website ist sehr hilfreich für die tägliche Kommunikation des SED mit der Öffentlichkeit und den Medien. Mit Hilfe der Grafiken und Informationen des SED und weiterführender Links zu vertieften Hintergrundinformationen, können Anfragen meist sehr effektiv und zufriedenstellend beantwortet werden.

2.8 Internationaler Workshop in Davos

Im März 2017 wurden zum zweiten mal der dreitägige Schatzalp Workshop on Induced Seismicity in Davos durchgeführt. Nach dem grossen Erfolg im Jahr 2015, führte der SED den Workshop mit Unterstützung des Swiss Competence Center SCCER-SoE und des EU-Horizon-2020 Projektes DESTRESS⁵ nach gleichem Muster durch. Neben 19 eingeladenen Keynote-Vorträgen von ausgezeichneten internationalen Experten aus verschiedenen Fachbereichen der induzierten Seismizität, wurden 25 Fachvorträge und 80 Poster auf der Tagung präsentiert. Der klausurartige Charakter der Tagung, im ehemaligen Sanatorium Schatzalp oberhalb von Davos, fördert in besonderem Masse den wissenschaftlichen Austausch abseits des Tagungsprogramms und wurde auch dieses mal von mehr als 160 Wissenschaftlern und Fachleuten der Industrie besucht

⁴ <http://www.seismo.ethz.ch/en/knowledge/things-to-know/geothermal-energy-earthquakes/geothermal-energy-in-a-nutshell/>

⁵ <http://www.destress-h2020.eu>

(Abb. 10). Nähere Informationen zur Tagung, zum Programm sowie die PDFs der gehaltenen Vorträge und gezeigten Poster können auf der SED-Webseite⁶ abgerufen werden.

Abbildung 10: Gruppenbild der mehr als 160 Teilnehmer des 2ten Schatzalp Workshop on Induced Seismicity in Davos, im März 2017 vor dem Tagungshotel Schatzalp.



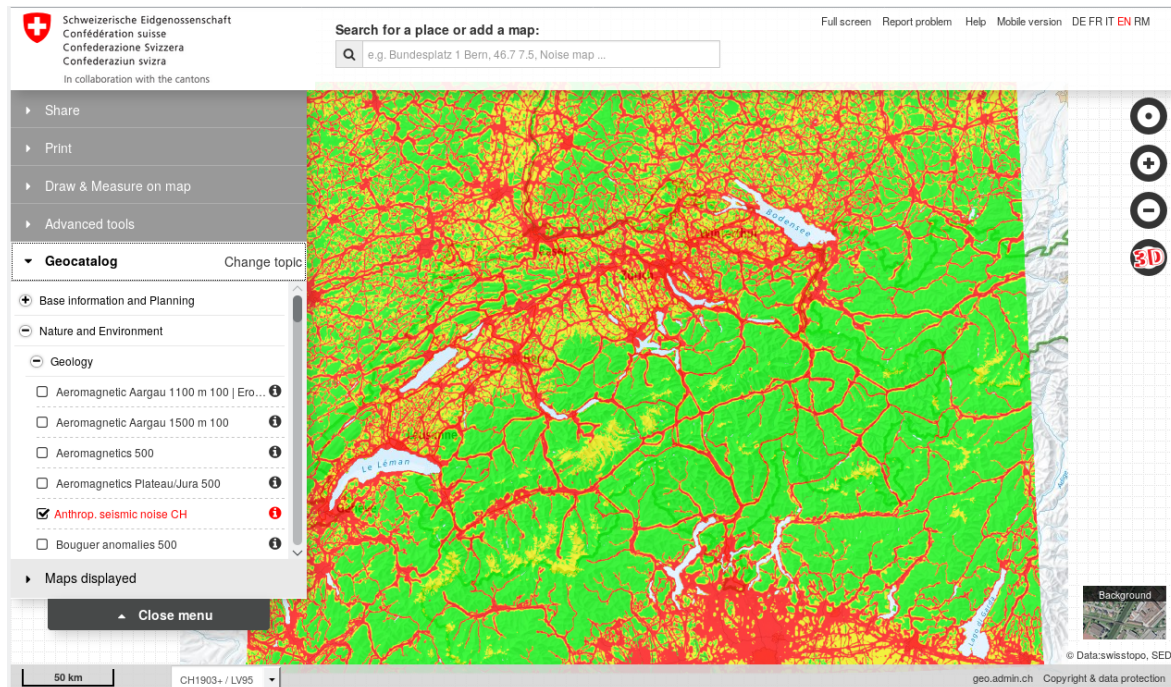
2.9 Bodenunruhekarte bei SwissTopo

Um gezielt gute Standorte für die Installation seismischer Netze zu finden wurde von Kraft (2016) ein Modell der menschengemachten seismischen Bodenunruhe erstellt. Dieses Modell wurde in Form einer Kartenebene im Geodatenportal des Bundes map.geo.admin.ch, das von swisstopo betrieben wird, publiziert. Es ist nun möglich das Modell mit verschiedenen anderen Themenkarten zu verschneiden, die von swisstopo zur Verfügung gestellt werden und so sehr effizient geeignete Standorte für seismologische Stationen zu finden.

Die Karte kann über das Eingabe des Suchbegriffes "Unruhe" im Suchfeld der Hauptseite des Datenportals gefunden oder im Themenkatalog "Geokatalog" unter "Natur und Umwelt" -> "Geologie" -> "Anthrop. Bodenunruhe CH" ausgewählt werden (Abb. 11).

⁶ <http://www.seismo.ethz.ch/de/research-and-teaching/schatzalp-workshop/>

Abbildung 11: Kartenebene "Anthropogene Seismische Bodenunruhe in der Schweiz" auf dem Geodatenportal des Bundes www.map.geo.admin.ch.

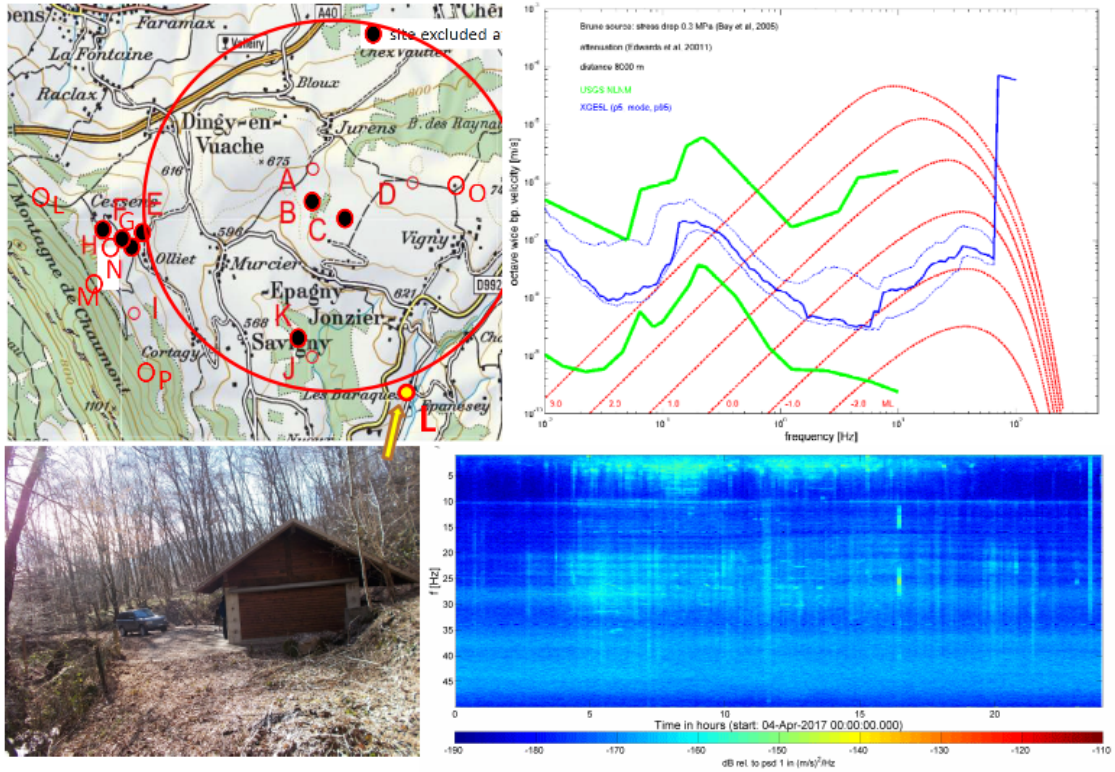


2.10 Geothermie 2020 Genf

Die Services Industriels de Genève (SIG) führen im Rahmen der Projektes GEOTHERMIE 2020 vielseitige Untersuchungen durch, um die Eignung des Genfer Beckens für die Geothermienutzung zu erkunden. Als Teil dieser Untersuchungen sind SIG daran interessiert ein besseres Verständnis der natürlichen seismischen Aktivität in diesem Bereich zu bekommen und eine seismologische Grundüberwachung für mögliche zukünftige Tiefengeothermieprojekte in der Region zu erstellen. Eine Netzwerkoptimierung, über die schon früher berichtet wurde (Kraft und Wiemer, 2016), hat ergeben, dass dieses Ziel mit einer Erweiterung des bestehenden seismologischen Netzes mit 7 Stationen erreicht werden kann.

In Zusammenarbeit mit der Universität Genf und SIG hat der SED im Berichtsjahr 2017 Standorterkundungen und Testmessungen für alle 7 Standortregionen der Netzwerkoptimierung durchgeführt. Dazu wurden 4 Mobilstationen aus dem GEOBEST-CH Instrumentenpool eingesetzt. Die Standortauswahl wurde nach der Methode von Plenkers et al. (2015) durchgeführt, die mit Unterstützung von GEOBEST-CH vom SED entwickelt wurde (Abb. 12). Im Sommer 2017 hat der SED die Ergebnisse der Testmessungen an eine Sitzung mit SIG vorgestellt. Danach wurden 4 Standortentscheidungen getroffen. An zwei Standorten wurden Testmessungen wiederholt, um zu entscheiden ob dort Bohrlochstationen nötig sind. Die SIG ist derzeit dabei Nutzungsverträge für die Standorte abzuschliessen. Mit etwas Glück kann ein Grossteil des Überwachungsnetzes vor Ende des Jahres seinen Betrieb aufnehmen.

Abbildung 12: Elemente der Standortsuche und Testmessungsauswertung nach Plenkers et al. (2015) für den Perimeter 5 (Savigny/F) des neuen Überwachungsnetzwerks für das Genfer Becken. Die Analyse lässt vermuten, dass Erdbeben mit Magnitude $ML > 0.0$ in 8km Entfernung von der Station mit ausreichendem Signal-Rausch-Verhältnis aufgezeichnet werden können.



3 Referenzen

Baisch Stefan, Carbon David, Dannwolf Uwe, Delacou Bastien, Devaux Mylène, Dunand François, Jung Reinhard, Koller Martin, Martin Christophe, S.M., Secanell Ramon, V. R. (2009). Deep Heat Mining Basel Seismic Risk Analysis SERIANEX, p. 21.

http://www.wsu.bs.ch/dms/wsu/download/abgeschlossene-dossiers/serianex_teil_1_english.pdf

Frieg et al. (2015) Novel Approach for the Exploration of the Muschelkalk Aquifer in Switzerland for the CO₂-free Production of Vegetables. Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, 19-25 April, pp. 10,

Häring, M. O., Schanz, U., Ladner, F., & Dyer, B. C. (2008). Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system. *Geothermics*, 37(5), 469–495.

<http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2008.06.002>

Herrmann, M., T. Kraft, T. Tormann, L. Scarabello & S. Wiemer (2017). A consistent high-resolution catalog of the induced earthquakes in Basel based on template matching. 2nd Schatzalp Workshop on Induced Seismicity, 14.-17.3.2017, Davos, Switzerland.

Karvounis, D. & S. Wiemer (2017) Comparing strategies for stimulating and relieving an EGS reservoir with 3D Monte Carlo simulations. 2nd Schatzalp Workshop on Induced Seismicity, 14.-17.3.2017, Davos, Switzerland.

Kim, M., B. Yoon, F. Bethmann, K.-I. Kim, K.-B. Min, C. Jaiwon & P. Meier (2017) Induced Seismicity During Hydraulic Stimulation in Pohang (Korea) in Comparison to Basel (Switzerland).

Kraft, T. (2016). A high-resolution and calibrated model of man-made seismic noise for Europe, 76. DGG Annual Meeting, Münster, Germany, 16. März 2016.

Kraft, T., Mignan, A., & Giardini, D. (2013). Optimization of a large-scale microseismic monitoring network in northern Switzerland. *Geophysical Journal International*, 195(3), 474–490. <http://doi.org/10.1093/gji/ggt225>

Kraft, T., T. Diehl, T. Tormann, M. Herrmann, B. Frieg (2017a). Induced Seismicity at the geothermal project Schlattingen, CH. 2nd Schatzalp Workshop on Induced Seismicity, 14.-17.3.2017, Davos, Switzerland.

Kraft, T., M. Herrmann and T. Diehl (2017b). Analysis of induced microseismicity at the geothermal project Schlattingen, Thurgau. Nagra Projektbericht NPB 17-??, Wettingen, pp. 18, in press.

Kraft, T. and S. Wiemer (2016). Zweiter Zwischenbericht, Projekt GEOBEST-CH, Bericht des SED zu Händen von energieSchweiz. Zürich, Dezember 2016, pp. 27

Megies, T. & T. Kraft (2017). pyNetOpt3D – A Python API for Monitoring Network Optimization. 2nd Schatzalp Workshop on Induced Seismicity, 14.-17.3.2017, Davos, Switzerland.

Vouillamoz, N., T.Kraft, M. Abednego and T. Diehl (2017) Lowering microseismic detection threshold in Northeastern Switzerland using sonogram analysis and template matching. NAGRA Arbeitsbereich, NAB 16-72, Wettingen, November 2016, pp. 53, (unpublished).

Wiemer, S., T. Tormann, M. Herrmann, D. Karvounis & T. Kraft (2016) Induced Seismicity at the Basel Deep Heat Mining Site. Investigation of seismicity rate changes after the permanent shut-in of Basel-1 in 2011 and recommendations for hazard mitigation. Report of the Swiss Seismological Service to Canton Basel Stadt. Nov. 2016, pp. 38.