



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und
Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Cleantech

Schlussbericht vom 01.12.2015

GEOBEST: „Best Practice“ – Überwachung und Risikoabschätzung von induzierter Seismizität in Tiefengeothermie-Projekten



Datum: 01.12.2015

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Schweizerische Eidgenossenschaft, handelnd durch das
Bundesamt für Energie BFE
Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramm
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger:

Schweizer Erdbebendienst (SED) an der ETH Zürich
ETH, NO H69.1
Sonneggstrasse 5
CH-8092 Zürich
www.seismo.ethz.ch

Autoren:

Dr. Toni Kraft, SED ETH Zürich, toni.kraft@sed.ethz.ch
Prof. Dr. Stefan Wiemer, SED ETH Zürich, stefan.wiemer@sed.ethz.ch

BFE-Programmleitung: Yasmine Calisesi, yasmine.calisesi@bfe.admin.ch
BFE-Projektbegleitung: Gunter Siddiqi, gunter.siddiqi@bfe.admin.ch
BFE-Vertragsnummer: SI/500557-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Abschlussbericht

Projekt – GEOBEST

Berichtszeitraum: Okt. 2011 – Nov. 2015



Bericht des Schweizerischen Erdbebendienstes
zu Händen des
Bundesamtes für Energie

Dezember 2015

Document-ID:

SED-SpecNet-P060003-20151204-TK

Authors:

Dr. Toni Kraft

Prof. Dr. Stefan Wiemer

Swiss Seismological Service

ETH-Zurich

Sonneggstrasse 5

8092 Zurich, Switzerland

Telfon: +41 (0)44 633 4455

Fax: +41 (0)44 633 1065

Internet: <http://www.seismo.ethz.ch>



1 Ziele des Projektes

Ziel des Projektes GEOBEST ist, einen Beitrag zur langfristigen Entwicklung der Tiefengeothermie als wesentlichem Bestandteil des zukünftigen schweizerischen Energiemixes zu leisten. Dazu will der Schweizerische Erdbebendienst (SED, www.seismo.ethz.ch) einerseits gezielt jeweils 1-2 Pilotprojekte in den drei seismotektonisch stark unterschiedlichen Zielregionen der Tiefengeothermie in der Schweiz bei der notwendigen seismischen Überwachung und Gefährdungsabschätzung unterstützen. Andererseits will der SED durch die Entwicklung eines Leitfadens zu diesen beiden Themen zur Planungssicherheit von zukünftigen Projekten beitragen. Speziell ist geplant:

1. Unterstützung ausgewählter Pilotprojekte bei der seismologischen Überwachung und Dateninterpretation. Ziel ist dabei, den Dialog zwischen SED und Betreibern zu fördern und dem SED Zugang zu den relevanten Betriebsdaten zu ermöglichen sowie anhand der Pilotprojekte praktische Erfahrungswerte zu sammeln und hochqualitative Daten zu erheben. Es soll jedoch keine Langzeitüberwachung des Betriebes aufgebaut, sondern gezielt in der Anfangsphase der Projekte (12-24 Monate) ausgeholfen werden.
2. Entwicklung eines Leitfadens zur Erstellung, Betrieb und Beurteilung von seismischen Überwachungsnetzen von Tiefengeothermie-Projekten sowie zur Auswertung und Dokumentation der registrierten Seismizität (Lokalisierungsmethoden, Magnitudenbestimmung, Bodenunruhe, optimale Netzwerkkonfiguration), in Abstimmung mit Betreibern, Kantonen und Bund sowie der Serviceindustrie. Der Leitfaden basiert dabei auf den Erfahrungen aus GEOBEST und ist gleichzeitig eng mit dem EU FP7 Projekt GEISER (www.geiser-fp7.eu) koordiniert. GEISER hat eine ähnliche Zielsetzung auf europäischer Ebene, wengleich keine aktive Messkomponente. Der SED nimmt in GEISER eine Schlüsselfunktion in der Entwicklung von Guidelines zur Überwachungs- und Gefährdungsanalyse ein.
3. Entwicklung eines Leitfadens für die seismische Gefährdungs- und Risikoabschätzung von Tiefengeothermie-Projekten, inklusive Massnahmenkonzepten. Dieser Leitfaden wird in Abstimmung mit Betreiber, Kantonen und Bund sowie mit den zuständigen Stellen im benachbarten Ausland und dem EU Projekt GEISER abgestimmt. Der Leitfaden beinhaltet unter anderem eine Zusammenstellung der ‚Best Practice‘ im Bereich Risikoanalysen und Interventionskonzepte sowie Vorschläge für Richtwerte für maximal zulässige Magnituden und Bodengeschwindigkeiten oder probabilistische Erwartungswerte dieser Grössen.
4. Entwicklung von Open-Source-Software zur Planung und Beurteilung von seismischen Überwachungsnetzen und der Risikoabschätzung.

2 Ergebnisse des Projektes

2.1 GEOBEST-Instrumenten-Pool

Im Laufe der Projektlaufzeit wurde ein seismologischer Instrumenten-Pool aufgebaut der zur Überwachung von Tiefengeothermieprojekten in der Schweiz genutzt werden kann. Aus projekteigenen Mitteln wurde Ende 2010 die Hardware für 12 seismologische Messstationen beschafft. Aus den Beständen der aufgelösten SED-Gruppe "Spezialnetze" wurden 2013 zusätzliche seismologische Instrumente in den GeoBest-Pool übernommen. Hierzu zählen 2 Strarkbeben-Sensoren (Kinometrics EpiSensor) und 4 Nannometrics Taurus Digitizer. Mit Unterstützung der Sankt Galler Stadtwerke wurde die Hardware zur Aufrüstung von 4 Mobilstationen auf Solarbetrieb und Echtzeitdatenübertragung beschafft. Diese Stationen gehen in den GeoBest-Pool ein und können zukünftig für kurzfristige Verdichtungen von Überwachungsnetzen in kritischen Projektphasen (z.B. hydraulische Stimulation) genutzt werden. Mit Unterstützung des BfE konnte von der Firma GeoExplorers ein Bohrlochsensor mit 3km Kabel übernommen werden, das im Jahre 2006 im Deep Heat Mining Projekt Basel eingesetzt war und dem GeoBest Pool zugeführt werden. Teile des Kabels wurden bei der Überwachung des Geothermieprojektes Schlattingen leider beschädigt und mussten entsorgt werden. Tabelle 2.1 fasst den Gerätebestand zusammen; diese Geräte werden nun im von EnergieSchweiz geförderten Nachfolgeprojekt weiterhin in Kontext der Geothermieförderung eingesetzt.

Tabelle 2.1) Hardware Bestand des GeoBest-Instrumenten-Pools

Anzahl	Instrumenten typ	Budget Projekt
10	<i>Nannometrics Trillium-compact Breitbandseismometer</i>	<i>GeoBest (2010)</i>
10	<i>Nannometrics Taurus 24bit-Digitizer</i>	<i>GeoBest (2010)</i>
2	<i>Kinnometrics Q330S+ 24-bit Digitizer (6-Kanal)</i>	<i>GeoBest (2010)</i>
2	<i>Bohrlochseismometer IESE S21g</i>	<i>GeoBest (2010)</i>
2	Kinnometrics EpiSensor Accelerometer	SpecNet (2013)
4	Nannometrics Taurus 24bit-Digitizer	SpecNet (2013)
4	Hardware: Solar- und Echtzeitdatenübertragung	GTh St. Gallen (2013)
1	Bohrlochakzelerometer & 3km Datenkabel	GTh Schattlingen (2013)

2.2 Pilotprojekte

Leider waren während der Projektlaufzeit nur wenige Tiefengeothermieprojekte in der Schweiz aktiv, so dass nur eine geringe Anzahl von Pilotprojekten mit semiologischer Überwachung begleitet werden konnte. Andererseits war das Projekt St. Gallen deutlich aktiver und zeitintensiver als vorhergesehen. Es konnten zudem mehrere Projekte, die sich in der Beantragungs- und Planungsphase befanden, beratend begleitet werden. Bei der Zusammenarbeit mit den Betreibern und den kantonalen Behörden konnten wichtiger Erfahrungen gesammelt werden, die Einfluss auf die Erstellung der Leitfäden.

**SED**Schweizerischer Erdbebendienst
Swiss Seismological Service**Projekt – Lavey-les-Bains:**

Eines der ersten Geothermieprojekte, das der SED im Rahmen von GeoBest begleiten konnte war das Projekt „Alpine Geothermal Power Production (AGEPP)“ bei Lavey-les-Bains. Leider konnte das Projekt bis zum heutigen Tag noch nicht realisiert werden, so dass keine seismologische Überwachung durchgeführt werden konnte. Der SED hat im Laufe der Projektlaufzeit zwei seismotektonische Gutachten für die Region der unteren Rhonetals zu Händen von AGEPP erstellt (Kraft et al., 2010; Obermann et al. 2015). Der SED hat eine Studie zur optimalen seismologischen Überwachung des Geothermieprojektes durchgeführt und eine aufwendige Standortsuche für möglichen seismologische Messtationen durchgeführt (Kraft, 2015).

Auf Anfrage des Kanton Waadt hat der SED das Baugeruchsverfahren für des Projekt AGEPP auf Seiten der Kanton begleitet. Dabei hat er Empfehlungen zum Inhalt der von Betreiber durchzuführenden Risikostudie gegeben und Stellungnahmen zu den eingereichten Voruntersuchungen für den Kanton angefertigt. Die Erfahrung aus der begleitenden gutachterlichen Tätigkeit für den Kanton sind in die GeoBest-Leitfäden eingeflossen (Kraft et al., 2015).

Projekt – St. Gallen:

Das Tiefengeothermieprojekt der Stadt Sankt Gallen hat im Juli 2013 ein Erdbeben der Magnitude $M_L 3.4$ ausgelöst und wurde im Frühjahr 2014 eingestellt. Der SED hat das Projekt im Rahmen von GeoBest schon sehr früh begleitet. So hat er den Projektbetreiber, die Sankt Galler Stadtwerke (sgsw), in der Planungsphase seismologisch beraten und bei der Entwicklung des Mitigationskonzeptes für induzierte Beben unterstützt.

Der SED hat das seismologische Überwachungssystem entworfen und mit Unterstützung der sgsw und Instrumenten des GeoBest-Pools von Frühjahr 2012 bis heute betrieben. Aus dieser Zusammenarbeit ist ein hochqualitativer Datensatz entstanden der intensiv ausgewertet wurde und wird. Dabei sind zahlreiche wissenschaftliche Veröffentlichungen entstanden oder noch in Vorbereitung. (Kraft et al., 2013; Diehl et al. 2014a; Diehl et al. 2014b; Edwards et al., 2015; Obermann et al., 2015; ...).

Durch die seismologische Überwachung des Projektes im Rahmen von GeoBest konnte der SED seine Unabhängigkeit gegenüber dem Betreiber waren, war aber gleichzeitig in der Lage das Projekt aus nächster Nähe zu verfolgen. Der SED konnte so, bei der Beurteilung der Situation nach dem durch die Bekämpfung eines Gasausbruchs induzierten Erdbeben, wichtige und hochauflösende Analysen erstellen und den Betreibern und Behörden zur Verfügung stellen. Gleichzeitig konnte er auch wichtige projektinterne Informationen zum Ablauf des Zwischenfalls zeitnah und aus erste Hand erhalten. Eine wichtige Erkenntnis aus dem Projekt St.Gallen ist, dass seismologische Reaktionspläne immer in Zusammenarbeit mit allen an der Tiefbohrung beteiligten Fachpersonen (Geologe, Bohringenieur, Seismologe) erstellt werden müssen, um mögliche Konflikte frühzeitig zu erkennen. Diese und weitere Erfahrungen sind in die im Rahmen von GeoBest entwickelten Leitfäden eingeflossen (Kraft et al., 2015). Insbesondere in der Wochen und Monaten nach dem Magnitude 3.4 hat der SED intensiv in der Beratung und Kommunikation der Behörden, sgws und Öffentlichkeit involviert, und dank dem Projekt GFEOBEST auch mit dem Projekt auch schon eng vertraut, ein grosser Mehrwert und eine Bestätigung, dass die Ziele von GEOBEST sinnvoll sind und erreicht wurden.

Projekt – GeoEnergie Suisse AG (Multifrac – EGS)

Die GeoEnergie Suisse AG (GES) plant die Technologie der Enhanced Geothermal Systems (EGS) weiterzuentwickeln und in der Schweiz zum Einsatz zu bringen. Bei der EGS Technologie wird das geothermische Reservoir, das zur Gewinnung der Erdwärme genutzt werden soll, mittels hydraulische Stimulation künstlich erzeugt. In der Hoffnung, die Gefahr induzierter Erdbeben während der Reservoirserzeugung zu minimieren, entwickelt GES ein Multifrac-Verfahren bei dem die hydraulische Stimulation in vielen kleinen kontrollierbaren Schritten erfolgt.

Im Rahmen zweier von der eidgenössischen Kommission für Technologie und Innovation (KTI) geförderten Projekten (GeoSIM und RT-RAMSIS) entwickelt der SED zusammen mit der GES ein Adaptives Ampelsystem (ATLS) für EGS Projekte. Diese ATLS soll aufgrund der beobachteten induzierten Mikroseismizität Vorhersagen über die Gefährdung und das Risiko durch induzierte Seismizität in den nächsten Stunden erstellen. Dabei soll der bisherige und geplante Verlauf der hydraulischen Stimulation berücksichtigt werden. Dieser Arbeit wurden durch den GeoBest Projektseismologen unterstützt. Die Resultate der Modellierungen für ein Multifrac-System mit ATLS sind in Gischig et al. (2014) dokumentiert; sie sind ein wesentliches Element in der Risikoabschätzung des Kantons und im der geplanten Herangehensweise im Pilotprojekt Haut-Sorne. Die auch im Kontext von GEOBEST erstellen Herangehensweisen werden im EU Horizon2020 Projekt DESTRESS (3/2016 – 3/2020) europaweit angewendet.

In Zusammenarbeit mit dem Projekt GEOTHERM-II hat der SED erstmals eine ‚Testbench‘ zur Validierung von Vorhersagemodellen in der Geothermie entwickelt und systematisch auf zwei Datensätze angewendet (Király et al, 2015a,b). Dabei hat sich auch bestätigt, dass die Vorhersage von induzierter Seismizität mit Hilfe von sogenannten ‚Ensemble Modellen‘ robuster und präziser ist als einzelne Modelle.

Des Weiteren wurden mit der im Projekt GeoBest entwickelten Optimierungssoftware verschiedene Überwachungsszenarien entworfen und geprüft. So wurde für zwei Standorte im Jura und im Thurgau überprüft ob Bohrlochstationen zur Überwachung nötig sind, in welcher Tiefe sie installiert werden müssen und wie die Geometrie der Überwachungsnetze optimiert werden kann (Kraft et al., 2013b). Im Dezember 2015 wurde eine erste Überwachungsstation aus dem GeoBest-Gerätepool in Kanton Jura errichtet die eine verbesserte Überwachung der Standortregion des GES-Projektes bei Haute Sorne ermöglichen soll.

Im Rahmen von GeoBest hat der SED das Baugesuchsverfahren für das geplante Tiefengeothermieprojekt der GES in Haute Sorne / JU auf Wunsch und auf Seiten des Kantons Jura intensiv beratend und gutachterlich begleitet. Dieses Vorgehen hat sich als sehr geeignet erwiesen, da durch die begleitende gutachterliche Tätigkeit des SED die Flexibilität in dem Verfahrenen verwirklicht werden konnte, die nötig war um der Komplexität der zu beurteilenden Fragestellungen und dem Politcharakter des Projektes gerecht zu werden. Die Erkenntnisse und Lösungen, die in diese Zusammenarbeit mit den kantonalen Behörden und den Antragstellern erarbeitet wurden, sind massgeblich in die in GeoBest entwickelten Leitfäden eingeflossen (Kraft et al., 2015).

Projekt – Schlattigen:

Das privat initiierte Geothermieprojekt der Firma Grob Gemüse und Landbau bei Schlattigen wurde im Rahmen von GeoBest in zwei Phasen seismologisch überwacht: Während der Erstellung der zweiten Tiefbohrung und der anschliessenden Säuerung im Sommer 2013 und während des Langzeit-Pumpversuches mit erneuter Säuerung. Hierfür wurden fünf Überwachungsstationen aus dem GeoBest-Pool im Offline-Modus betrieben, die durch ein Bohrlochseismometer in der ersten Tiefbohrung des Geothermieprojektes (1100m Tiefe)

**SED**Schweizerischer Erdbebendienst
Swiss Seismological Service

ergänzt wurden. Während den Säuerungen im Jahr 2013 wurden zahlreiche Mikroeben detektiert, eine genaue Analyse der Daten wird Anfang 2016 durchgeführt. Im Mai 2015 ereignete sich in unmittelbarer Nähe des Geothermieprojektes (Entfernung ca. 2km) ein sehr wahrscheinlich natürliches Erdbeben der Magnitude $M_{L2.3}$. Das Überwachungsnetz wurde daraufhin für ca. einen Monat re-installiert, um möglichen Nachbeben aufzuzeichnen. Über die Überwachung des Projektes Schlattigen wurde in den Zwischenberichten III und VI berichtet. (Kraft & Wiemer 2014, 2015).

Die Erfahrungen aus dieser Überwachung haben bestätigt, dass die Echtzeit-Datenübertragung bei der seismologischen Überwachung von Geothermieprojekten essentiell ist. Durch die dadurch mögliche kontinuierliche Qualitätskontrolle der Daten, lassen sich Datenverluste minimieren. Da die Daten in Echtzeit zur Analyse zur Verfügung stehen, kann bei unerwartet auftretender Seismizität schnell untersucht werden ob es sich um ein natürliches oder induziertes Ereignis handelt. An den meisten Standorten in der Schweiz ist die Datenübertragung über Mobilfunknetze mit geringen Mehrkosten gegenüber der Offline-Variante möglich. Die Mehrkosten werden durch die erhebliche Vereinfachung und Verringerung des Betreuungsaufwandes und der oben erwähnten operativen Vorteil bei weitem kompensiert. Die in GeoBest entwickelten Leitfäden empfehlen deshalb eine Echtzeit-Datenübertragung für die seismologische Überwachung von Tiefengeothermieprojekten (Kraft et al., 2015).

Projekt – Basel

GeoBest hat einen Beitrag dazu geleistet, dass der Datensatz der kontinuierlichen Aufzeichnung von sechs Bohrlochstationen des Betreiberetzes, aus verschiedenen Datenformaten in ein seismologisches Standardformat (SEED) gewandelt wurde. Die Daten decken den nun nahezu vollständig den Zeitbereich von Januar 2006 bis heute ab. Anhand dieser Daten konnte der erste konsistente Erdbebenkatalog für die induzierte Seismizität im Zusammenhang ist dem Geothermieprojekt Basel erstellt werden. Dieser Datensatz erlaubt erstmals die detaillierte Analyse des Abklingverhalten der induzierten Erdbebensequenz. Die Ergebnisse der Analyse werden derzeit zu einer wissenschaftlichen Veröffentlichung zusammengestellt (Herrmann et al., in Vorbereitung; siehe auch Kraft & Wiemer, 2015).

Der Datensatz bildet ausserdem die Grundlage für die Beurteilung eines möglichen Wiederanstieges der Seismizität, der sich seit dem May 2012 andeutet. Ob dieser im Zusammenhang mit dem beobachteten Anstieg des Bohrlochkopfdruckes, nach dem Verschluss der Bohrung im Jahre 2011, steht und welche Massnahmen unternommen werden müssen, um dem möglichen Wiederanstieg der Seismizität entgegenzuwirken, wird Anfang 2016 mit den Betreibern und dem Kanton Basel-Stadt besprochen.

Project - Geothermie 2020 (Genf)

Der Geobest-Projektseismologe hat die Erstellung eine seismotektonischen Berichtes für die Region Genf zu Händen der Services Industriels de Genève unterstützt (Wiemer et al., 2015a).

Projekt - La Cote

Der Geobest-Projektseismologe hat die Erstellung eine seismotektonischen Berichtes für die Region Genf zu Händen von energieo La Cote unterstützt (Wiemer et al., 2015b).

2.3 Verwandte Überwachungskampagnen

Diemtigen Erdbebenschwarm

Erdbebenschwärme zeigen eine hohe Ähnlichkeit zu induzierten Erdbebensequenzen wie sie in der Geothermie auftreten. Sie eignen sich deshalb sehr gut um Überwachungsmethoden und -strategien zu testen, die für induzierte Erdbebensequenzen eingesetzt werden sollen. Im Rahmen des Projektes wurde deshalb einer der aktivsten Erdbebenschwärme der letzten Jahre bei Diemtigen/BE überwacht.

Mit Hilfe von drei Mobilstationen konnte ein hochauflösendes Bild der Entwicklung der seismischen Aktivität auf einer 500x700 m grossen Bruchfläche in 9 km Tiefe erstellt werden. Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse ist im Jahresbericht des SED enthalten (Diehl et al., 2015; siehe auch Kraft & Wiemer, 2014, 2015).

2.4 Seismologische Beratung von kantonalen Stellen

Kanton Thurgau

Für den Kanton Thurgau wurde eine Studie durchgeführt die Frage beantworten sollte, ob eine Verdichtung des bestehenden seismologischen Überwachungsnetzes ausreichen würde um zukünftige Projekte im Kanton zu überwachen. Hierfür wurde die im Rahmen von GeoBest entwickelte Optimierungssoftware verwendet, um geeignete Netzwerkkonfigurationen mit bis zu 25 neuen Stationen zu berechnen und zu evaluieren. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass selbst mit 25 zusätzlichen Stationen im Kanton Thurgau eine flächendeckende Überwachung mit der gewünschten Detektionsempfindlichkeit und Lokalisierungsgenauigkeit nicht erreicht werden kann. Andererseits sind diese Ziele im Nahbereich eines Geothermieprojektes schon mit wenigen Stationen zu erreichen. Eine projektbezogene Überwachung ist somit einer kantonsweiten Netzwerkverdichtung aus seismologischen und wirtschaftlichen Überlegungen deutlich vorzuziehen. Dieses Ergebnis für den Kanton Thurgau (Kraft, 2015) lässt sich auf den Grössten Teil der Schweiz übertragen und ist in die GeoBest-Leitfäden eingeflossen (Kraft et al., 2015).

Kanton Waadt

Neben der Beratung des Kantons Waadt im Rahmen der Genehmigungsverfahren für das geplante Geothermieprojekt Lavey-les-Bains (siehe Abschnitt 2.2), hat der SED auf Anfrage des Kantons Stellungnahmen zu seismologischen Fragen im Zusammenhang mit beim Kanton eingereichten Gutachten zur Umweltverträglichkeit von Tiefbohrungen. Obwohl es sich nicht um Geothermieprojekte handelte, waren die zu beantwortenden Fragestellungen (Gefährdung durch induzierte Erdbeben und Form der seismologischen Überwachung) sehr verwandt mit solchen die in der Tiefengeothermie auftreten. Die Erfahrungen aus dieser Arbeit konnten deshalb sehr gut in das GeoBest-Projekt einfließen.

Kanton Zug

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie für zukünftige Geothermieprojekte im Kanton Zug hat der SED auf Wunsch des Kanton ein seismotektonisches Gutachten für das Kantonsgebiet erstellt. Die Arbeiten wurden im Rahmen des GeoBest-Projektes. Der Bericht ist auf der Webseite des Kanton Zug veröffentlicht (Landwig et al., 2014). Die Erfahrungen aus dieser Arbeit sind in die GeoBest-Leitfäden einfließen.

**SED**Schweizerischer Erdbebendienst
Swiss Seismological Service

Kanton Jura

Im Rahmen von GeoBest hat der SED das Baugesuchverfahren für das geplante Tiefengeothermieprojekt der GES in Haute Sorne / JU auf Wunsch und auf Seiten des Kantons Jura beratend und gutachterlich begleitet.

2.5 Entwicklung von Software

Im Rahmen des Projektes wurde Software zur Planung von mikroseismischen Überwachungsnetzen entwickelt. Die Software ermöglicht es, die Anzahl und Standorte der benötigten seismologischer Stationen zu ermitteln, die zum Erreichen eines vorgegebenen Überwachungszieles benötigt werden. Dabei können existierende Netze geprüft und erweitert, oder neue Netze erstellt werden.

Grundlage der Software bildet unter anderem ein Modell der menschengemachten Bodenunruhe, das mit Daten aus mehreren hundert Testmessungen in der Schweiz und Deutschland kalibriert wurde. Das Modell liefert für beliebige Standorte in Europa eine erste Einschätzung der erwarteten menschengemachten Bodenunruhe.

Die Software wurde bei der Planung verschiedenen Netzwerke in der Schweiz und im benachbarten europäischen Ausland verwendet (z.B., St.Gallen, Thurgau, Schaffhausen, Lavey-les-Bains, Genf, München; siehe GeoBest-Zwischenberichte).

Während der Projektlaufzeit wurde ausserdem eine Software zur hochempfindlichen Detektion von kleinsten Erdbeben in einer Erdbebensequenz entwickelt. Der Ansatz beruht auf dem Prinzip der Mustererkennung und kann eine Verringerung der Detektioschwelle von mehr als einer Magnitudeneinheit bewirken. Die Software wurde erfolgreich an Datensätzen von natürlichen und induzierten Erdbebensequenzen getestet (Diehl et al. 2015; Herrmann et al., 2016).

Im Rahmen des Projektes wurde Matlab-Software für vermiedene Zwecke entwickelt und auf wissenschaftlichen Tagungen vorgestellt: Abschätzung der Detektionswahrscheinlichkeit für Verwerfung unterschiedlicher Grösse und Orientierung in 3D-Seismik-Messungen entwickelt und auf der Jahrestagung der AGU vorgestellt (Goertz et al., 2012b); Abschätzung der Tiefenabhängigkeit des Störsignalniveaus in Bohrlöchern (Goertz et al. 2012a).

Im Rahmen des Projektes wurde Software zur Beurteilung der Gefährdung und des Risikos durch induzierte Seismizität bei Tiefengeothermieprojektes entwickelt. Mignan et al. (2015) haben damit eine probabilistische Risikoabschätzung zur induzierten Seismizität durch das Deep Heat Mining (DHM) Basel Projekt angefertigt die erstmals epistemische Unsicherheiten der Eingangsparameter durch einen Logic-Tree-Ansatz berücksichtigt (Kraft & Wiemer, 2014).

2.6 Nationaler und internationaler Wissenstransfer

Die Erkenntnisse die im Laufe des Projektes GeoBest gesammelt wurden, wurden regelmässig auf nationalen und internationalen Workshops vorgestellt und mit Fachkollegen diskutiert. Der SED hat den Stand und die Ergebnisse des Projektes GeoBest regelmässig auf dem Roundtable Geothermie vorgestellt, der jährlich vom Bundesamt für Energie durchgeführt wird und der Betreiber, Behördenvertreter und Wissenschaft an eine Tisch bringt.

Ein grosser Erfolg war der vom SED durchgeführte International Workshop on Induced Seismicity im März 2015 in Davos. Mehr als 160 Fachpersonen aus mehr als 20 Ländern haben dort über induzierte Erdbeben berichtet und diskutiert. Alle Vorträge und Poster die auf dem Workshop präsentiert wurden sind auf der Workshop Internetseite abrufbar (<http://www.seismo.ethz.ch/research/groups/schatzalp>).

2.7 Entwicklung von Leitfäden

Die Erfahrungen aus den oben beschriebenen Überwachung von Pilotprojekten (Abschnitt 2.2 und 2.3) und der seismologischen Beratung von Betreibern und kantonalen Stellen (Abschnitt 2.4) sind in den erstellten Leitfäden eingeflossen. Diese Erfahrungen wurden in nationalen und internationalen Workshops mit Betreibern, Behörden und Fachkollegen diskutiert und gegebenenfalls angepasst (Abschnitt 2.6).

Zum Thema seismologische Überwachung hat der SED massgeblich an der FKPE-Richtlinie zu diesem Thema (Baisch et al., 2012) mitgewirkt. Diese Richtlinie wurde auf die Gegebenheiten in der Schweiz angepasst und in weiten Tiefen ergänzt und liegt diesem Bericht bei (Kraft et al., 2015). Die Erfahrungen des SED bei der Standortsuche für mikroseismischen Überwachungsstationen, die zum Teil auch im GeoBest erlangt wurden, sind ausführlich in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung dokumentiert worden (Plenkens et al., 2015). Neben den Kriterien die zur Auswahl eines geeigneten Standortes erfüllt sein müssen, wird in der Veröffentlichung auch ein Bewertungsschema beschrieben, dass die Dokumentation der Standortfestlegung vergleichbar und gegenüber Dritten (z.B. den Genehmigungsbehörden) nachvollziehbar macht.

Die Komplexität und die fallspezifische Natur der induzierten Seismizität in der Tiefengeothermie erfordert die Kombination von technischen und soziologischen Elementen zu Klassifikation der damit verbundenen Risiken. Die Kontextabhängigkeit bedeutet, dass verschiedene Geothermie-Projekte sind im Hinblick auf die Erdbebengefährdung, Risiko und gesellschaftliche Anliegen unterscheiden und erfordern daher unterschiedliche Risk-Governance-Prozesse. Trutnevyte et al. (2016) haben einen neuen Geothermal Risk of Induced seismicity Diagnosis (GRID) Score für die Charakterisierung der verschiedenen geothermischen Projektkategorien in Bezug auf die Gefahren, Risiken und sozialen Kontexte vorgeschlagen, der auch in den GeoBest-Leitfäden Verwendung findet. Basierend auf der Einordnung des geplanten Projektes nach dem GRID-Score geben die GeoBest-Richtlinien vor welche Form der seismologischen Überwachung zu wählen ist und welchen Risikoabschätzung in den verschiedenen Projektphasen zu erstellen sind. Dabei wird eine fortwährende gutachterlichen Begleitung des Projektes empfohlen, bei der, auf Grundlage des ansteigenden Erkenntnisgewinns über den Projektverlauf hinweg, Neubewertungen vorgenommen und Umklassifizierungen des Projektes innerhalb des GRID-Score möglich sind.

Ein fortgeschrittener Entwurf der GeoBest-Richtlinien liegt diesem Bericht bei. Die Richtlinie ist in englischer Sprache verfasst, um einen internationalen Begutachtungsprozess zu ermöglichen. Nach Abschluss der externen Begutachtung wird die Richtlinie auf der Webseite des SED veröffentlicht und an die betroffenen Behörden verteilt.



2.8 Literatur

- Baisch, S., R. Fritschen, J. Groos, T. Kraft, Th. Plenefisch, K. Plenkens, J. Ritter, & J. Wassermann (2012). *Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität – Positionspapier des FKPE*, in Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, 3, 17-31, ISSN 0934-6554; also at: www.fkpe.org
- Diehl, T., T. Kraft, E. Kissling, N. Deichmann, J. Clinton & S. Wiemer (2014). High-precision relocation of induced seismicity in the geothermal system below St. Gallen (Switzerland). EGU General Assembly 2014, Vienna, Austria.
- Diehl et al. (2015). Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2014. *Swiss Journal of Geosciences*, DOI:10.1007/s00015-015-0204-1.
- Edwards, B., Kraft, T., Cauzzi, C., Kästli, P., & Wiemer, S. (2015). Seismic monitoring and analysis of deep geothermal projects in St Gallen and Basel, Switzerland. *Geophysical Journal International*, 201(2), 1020-1037.
- Gischig, V.S. & S. Wiemer (2013). A stochastic model for induced seismicity based on non-linear pressure diffusion and irreversible permeability enhancement. *Geophysical Journal International*.
- Gischig, V., S. Wiemer & A. Alcolea (2014). Balancing reservoir creation and seismic hazard in enhanced geothermal systems. *Geophysical Journal International*, 198(3), pp.1585– 1598.
- Goertz, A., Riahi, N., Kraft, T. & Lambert, M. (2012a). Modeling detection thresholds of microseismic monitoring networks. SEG, 82nd Annual Meeting, Las Vegas, 4-9 November 2012.
- Goertz, A., T. Kraft, S. Wiemer & M. Spada (2012b). Estimating the detectability of faults in 3D-seismic data - A valuable input to Induced Seismic Hazard Assessment (ISHA). AGU Annual Meeting, San Francisco, 1-6 December 2012.
- Herrmann, M. et al. (2016) Long-term decay and possible reactivation of the induced seismicity associated with the Basel geothermal projekt, in Vorbereitung.
- Kiraly, E., V. Gischig, J.D. Zechar & S. Wiemer (2015a) *Validating induced seismicity forecast models - Part 1: Induced Seismicity Test Bench*. Submitted to *J. Geophys. Res.*
- Kiraly, E., V. Gischig, J.D. Zechar, D. Karvounis, J. Doetsch & S. Wiemer (2015b). *Validating induced seismicity forecast models - Part 2: Application of statistical, hybrid, and ensemble models to the Basel and Soultz-sous-Forets geothermal reservoirs*. Submitted to *J. Geophys. Res.*
- Kraft, T., Deichmann, N. und Marschall, I. (2008). Die Seismizität und Seismotektonik des unteren Rhonetales zwischen Martigny und Lac Léman", Bericht des Schweizerischen Erdbebendienstes zu Händen AGEPP, Juli 2008, 32 S.
- Kraft, T. & Wiemer, S. (2011). Zwischenbericht I, Projekt GEOBEST, Bericht des Schweizerischen Erdbebendienstes zu Händen des Bundesamtes für Energie, August 2011, 61 S.
- Kraft, T. & Wiemer, S. (2012). Zwischenbericht II, Projekt GEOBEST, Bericht des Schweizerischen Erdbebendienstes zu Händen des Bundesamtes für Energie, September 2012, 12 S.
- Kraft, T., A. Mignan & D. Giardini (2013a). *Optimization of a large-scale microseismic monitoring network in northern Switzerland*. *Geophys. J. Int.*, 195, 474–490.

- Kraft, T., M. Herrmann & S. Wiemer (2013b). *Untersuchung geeigneter seismologischer Überwachungsnetze für geplante Tiefengeothermieprojekte der Geo-Energie Suisse AG*. Bericht des Schweizerischen Erdbebendienstes zu Händen der GeoEnergie Suisse AG, Mai 2013, 325 S.
- Kraft, T. & Wiemer, S. (2014). Zwischenbericht III, Projekt GEOBEST, Bericht des Schweizerischen Erdbebendienstes zu Händen des Bundesamtes für Energie, November 2014, 20 S.
- Kraft, T., (2014). *A high-resolution ambient seismic noise model for Europe*. EGU General Assembly Conference Abstracts. Vol. 16. 2014.
- Kraft, T. & Wiemer, S. (2015a). Zwischenbericht IV, Projekt GEOBEST, Bericht des Schweizerischen Erdbebendienstes zu Händen des Bundesamtes für Energie, December 2015, 11 S.
- Kraft, T. (2015a) *Untersuchung der Eignung verschiedener Netzwerkgeometrien zur seismologischen Überwachung von Tiefengeothermieprojekten im Kanton Thurgau*. (2015). Bericht des Schweizerischen Erdbebendienstes zu Händen des Amt für Umwelt des Kanton Thurgau, März 2015, 60 S.
- Kraft T. (2015b) *Planung eines seismischen Überwachungsnetzes für das AGEPP Projekt*. Bericht des Bericht des Schweizerischer Erdbebendienst zu Händen von AGEPP, November 2015, 22 S.
- Kraft T., S. Wiemer & E. Trutnevyte (2015b). *A Guideline for Handling Induced Seismicity in Geothermal Energy Projects*. Swiss Seismological Service, Dec. 2015, 55 S.
- Kraft, T., et al. (2016). *Analysis of waveform similarity in the SG induced earthquake sequence*, in Vorbereitung.
- Landtwing, D., T. Kraft, S. Wiemer (2014). *Erdbebengefährdung und induzierte Seismizität im Kanton Zug*, Kurzgutachten zu Händen Amtes für Umweltschutz des Kantons Zug, 24. Januar 2014, pp. 91, https://www.zg.ch/behoerden/audirektion/amt-fuer-umweltschutz/download-dokumente/dokumente/Tiefengeothermie_SED.pdf
- Mignan, A., D. Landtwing, P. Kästli, B. Mena & S. Wiemer (2015). *Induced seismicity risk analysis of the 2006 Basel, Switzerland, Enhanced Geothermal System project: Influence of uncertainties on risk mitigation*. *Geothermics*, 53, 133-146.
- Mignan, A., D. Landtwing, B. Mena and S. Wiemer (2015). *Induced seismicity risk analysis of the 2006 Basel, Switzerland, Enhanced Geothermal System project: Influence of uncertainties on risk mitigation*. *Geothermics*, 53, 133-146.
- Plenkens, K., Husen, S., & Kraft, T. (2015). *A Multi-Step Assessment Scheme for Seismic Network Site Selection in Densely Populated Areas*. *Journal of Seismology*, 19(4), 861-879.
- Obermann A., T. Diehl, T. Kraft & S. Wiemer (2015). *Seismizität und Status der seismischen Überwachung im unteren Rhonetal zwischen Jan. 2007 - Jul. 2015. Aktualisierender Anhang zum Bericht "Die Seismizität und Seismotektonik des unteren Rhonetales zwischen Martigny und Lac Léman."* von Kraft, Deichmann und Marschall, Jul 2008. Bericht des Schweizerischer Erdbebendienst zu Händen von AGEPP, Juli 2015, 15 S.
- Tormann, T. et al. (2016) *High resolution statistical analysis of natural and induced seismicity*. in Vorbereitung.
- Trutnevyte et al. (2016). *Induced seismicity risk governance of geothermal energy projects*. in Vorbereitung.



SED

Schweizerischer Erdbebendienst
Swiss Seismological Service

Wiemer S., T. Kraft, T. Diehl, and E. Kissling (2014) *Insights from the 2013 St. Gallen induced earthquake sequence*. In Vorbereitung.

Wiemer, S., P. Dublanchet, T. Kraft, T. Diehl, A. Obermann, A. Mignan & G. Hétenyi (2015a). *Projet Géothermie Profonde à Genève. Rapport sur l'activité, l'aléa et la surveillance sismique. Bericht des Schweizerischen Erdbebendienstes zu Händen von Services Industriels de Genève*, Juli 2015, 36 S.

Wiemer, S., P. Dublanchet, T. Kraft, T. Diehl, A. Obermann, A. Mignan & G. Hétenyi (2015b). *Projet Géothermie Profonde sur la Cote Vaudoise. Rapport sur l'activité, l'aléa et la surveillance sismique. Bericht des Schweizerischen Erdbebendienstes zu Händen von energieo La Cote*, Juni 2015, 35 S.