
Zusammenfassung der Untersuchungen zum Erdbeben vom November 2017 in Pohang, Südkorea, und der Auswirkungen auf das Geothermieprojekt Haute-Sorne

Olivier Zingg, Dr. Peter Meier

Geo-Energie Suisse AG

März 2019 (übersetzt aus der Französischen Originalfassung vom Januar 2019)

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
1	Hintergrund	3
2	Methodologie	3
3	Ergebnisse	3
2	Das Pohang EGS-Projekt und sein Zusammenhang mit dem Erdbeben vom November 2017	4
	Rolle der Geo-Energie Suisse im Pohang-Projekt	6
3	Seismotektonische Situation in Südkorea	6
	Einfluss tektonischer Ereignisse in Japan auf die koreanische Halbinsel.....	7
4	Auswirkungen der bisherigen Ergebnisse auf das Projekt Haute-Sorne	8
5	Stopp-Kriterien für die Beendigung des Haute-Sorne-Projekts und Vergleich mit dem, was in Pohang getan wurde.....	11
1	Genehmigungsaufgabe 55 - Entwicklung der Seismizität außerhalb des Speichers.....	11
2	Genehmigungsaufgabe 60 - Verfahren bei Überschreitung eines vorgegebenen Grenzwertes ...	13
6	Schlussfolgerung	13
7	Nächste Schritte für das Haute-Sorne-Projekt	16

1 Einführung

1 Hintergrund

Am 15. November 2017 ereignete sich in der Nähe eines im Bau befindlichen Geothermieprojekts in Pohang, Südkorea, ein Erdbeben der Stärke 5.4. Auf der Grundlage der verfügbaren Informationen und einer eigenen Situationsanalyse beschloss Geo-Energie Suisse AG (GES), die Regierung des Kantons Jura unverzüglich über die Situation zu informieren. Diese reagierte am 28. November 2017 mit der Aufforderung an Geo-Energie Suisse, einen Bericht über die Ereignisse in Pohang und über die möglichen Auswirkungen ihrer Schlussfolgerungen auf das Haute-Sorne-Projekt vorzulegen.

2 Methodologie

Durch die Beteiligung von GES am europäischen Forschungsprojekt DESTRESS, an dem auch einige Partner des koreanischen Projekts teilnehmen, konnte GES auf fast alle für die Analyse notwendigen Daten des Pohang Projektes zugreifen. Dazu gehören mikroseismische Daten, Bohrlochmessungen, Protokolle und hydraulische Parameter der Stimulationsarbeiten (Hochdruckinjektionen zur Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit des Gesteins). Zusätzlich zu diesen Projektdaten existieren öffentlich zugängliche Daten, wie z.B. Aufzeichnungen von nationalen seismischen Überwachungsnetzen, GPS-Messstationen und Satellitendaten zur Messung von Erdverformungen (InSAR). Acht Spezialisten aus verschiedenen Disziplinen der Ingenieur- und Geowissenschaften arbeiteten fast ein Jahr lang daran, diese Daten zu sammeln, nutzbar zu machen, zu analysieren, zu modellieren und zu interpretieren.

In Korea beauftragte die Regierung nach dem Erdbeben und der Kontroverse über seine Ursachen die Geological Society of Korea mit der Einsetzung einer Untersuchungskommission zur Ermittlung der Ursachen des Erdbebens. Die Untersuchungskommission besteht aus einer Gruppe von 12 koreanischen Spezialisten aus verschiedenen geowissenschaftlichen Disziplinen und einer internationalen Gruppe von 5 weltweit anerkannten Spezialisten. Die Schlussfolgerungen dieser Kommission werden für März 2019 erwartet.

Viele der für das Verständnis des Erdbebens von Pohang notwendigen Daten wurden GES unter der Bedingung zur Verfügung gestellt, dass die detaillierten Ergebnisse der Interpretationen zunächst nur den Behörden des Kantons Jura und der koreanischen Untersuchungskommission übermittelt werden. Erst wenn die Schlussfolgerungen dieser Kommission veröffentlicht sind, können die detaillierten Ergebnisse der GES auch in der wissenschaftlichen Presse veröffentlicht werden.

3 Ergebnisse

Der GES-Bericht besteht aus den folgenden Studien:

1. Seismizitätsanalyse mit räumlichem oder zeitlichem Bezug zum Tiefengeothermieprojekt in Pohang während 2016/2017.
2. Auswertung der hydraulischen Daten der Stimulation im abgelenkten Bohrloch.
3. Geologische Auswertungen basierend auf den Bohrlochmessungen.
4. Regionales und lokales Gebirgsspannungsfeld
5. Oberflächenverformungen vor und nach dem Erdbeben basierend auf Satellitenmessungen

6. Numerische Modellierung der Spannungsänderungen auf der Fläche der Erdbebenstörzone durch Hochdruck-Wasserinjektion im vertikalen Bohrloch.
7. Eine vergleichende Bewertung der seismotektonischen Bedingungen in Pohang (Südkorea) und Haute-Sorne (Schweiz).
8. Ein zusammenfassender Fachbericht zu diesen Studien
9. Die vorliegende öffentliche Zusammenfassung.

Die vollständigen Berichte der Geo-Energie Schweiz wurden Anfang Januar 2019 bei den Behörden des Kantons Jura eingereicht. Wie in ihrer Pressemitteilung vom 28. November 2017 angekündigt, wird die Regierung diese nun unabhängigen Experten zur Beurteilung vorlegen.

In ihrer Studie konzentrierte sich die GES basierend auf den ihr zur Verfügung gestellten Daten auf die Untersuchung der in Pohang durchgeführten hydraulischen Stimulationen im vertikalen und im abgelenkten Bohrloch und ihres Zusammenhangs mit dem Erdbeben. Mehrere wissenschaftliche Arbeiten, die unabhängig vom Projekt während der letzten Dekaden publiziert wurden, zeigen aber auch, dass die natürliche Seismizität in dieser Region eine wichtige Rolle spielt. Eine Abwägung zwischen der relativen Beiträge von Bohrlochinjektionen und natürlichen Ursachen, die zum Ausbruch des Erdbebens vom 15. November 2017 geführt haben können, ist noch nicht möglich. Es wird Aufgabe der Südkoreanischen Untersuchungskommission sein, diese Frage zu beantworten, vielleicht auf der Grundlage neuer Erkenntnisse oder Daten, die GES nicht zur Verfügung stehen.

2 Das Pohang EGS-Projekt und sein Zusammenhang mit dem Erdbeben vom November 2017

Die Entwicklung des Tiefengeothermieprojektes in Pohang reicht bis in die frühen 2000er Jahre zurück. Viele Studien haben das Vorhandensein einer geologischen Störzone hervorgehoben, die für die Entwicklung der Geothermie als günstig angesehen wird, weil darin die Zirkulation von heissem Wasser vermutet wurde. Deshalb wurden in den Jahren 2015 und 2016 zwei Tiefbohrungen - eine vertikale und eine abgelenkte - für das EGS-Projekt in Pohang abgeteuft¹.

Das erste vertikale Bohrloch durchquerte zwar eine größere geologische Störung, nicht aber die zweite abgelenkte Bohrung, was dazu führte, dass die geologische Störung zwischen den beiden Bohrlöchern liegt. Zudem ist die geologische Störungszone auf der der abgelenkten Bohrung zugewandten Seite relativ dicht (diese Situation ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt). Fast zwei Jahre lang wurden zahlreiche Wasserinjektionen (Stimulationen) durchgeführt, um zu versuchen, Wasser zwischen den beiden Bohrlöchern zirkulieren zu lassen. Um dies zu erreichen, wurden in der vertikalen Bohrung sehr hohe Drücke aufgebracht, bis zu 900 bar an der Oberfläche, u.a. weil die dichte Seite der geologischen Störung eine Wasserzirkulation verhinderte. Ein Druck von 900 bar ist mehr als das Dreifache des maximalen Injektionsdrucks in Basel und mehr als das Neunfache des in

¹ Die ersten Bohrarbeiten wurden 2012 im Rahmen des Projekts Pohang durchgeführt. Der Einfachheit halber bezieht sich dieser Bericht nur auf die beiden Hauptbohrungen der Jahre 2015 und 2016, in denen eine hydraulische Stimulation durchgeführt wurde.

Frankreich zulässigen Drucks. Ein Druck von 900 bar reicht theoretisch aus, um die gesamte Gesteinssäule über dem Injektionspunkt in 4200 m Tiefe anzuheben.

		Vertikale Bohrung P _{max} = 900 bar	Abgelenkte Bohrung P _{max} < 300 bar
2015	1		
	2		
	3		
	4	Bohrarbeiten	
	5		
	6		
	7		
	8		
	9		
	10		
	11		
	12		
2016	1	Stimulation 1 29.01-20.02	
	2		
	3		
	4		
	5		
	6		
	7		Bohrarbeiten
	8		
	9		
	10		
	11		
	12		Stimulation 2 15.12-11.01
2017	1		
	2		
	3	Stimulation 3 16.03-16.04	
	4		
	5		
	6		
	7		Stimulation 4 7.08-14.08
	8	Stimulation 5 29.08-23.09	
	9		
	10		
	11		
	12		

Abbildung 1: Zeitplan für die Fertigstellung und Stimulation der beiden Hauptbohrungen des Pohang EGS-Projekts.

Wiederholte Injektionen mit sehr hohen Drücken in die vertikale Bohrung führten jedoch zu einer Druckerhöhung und eines Druckaufstaus an der geologischen Störzone, die auf der einen Seite dicht ist und die sich wahrscheinlich bereits in einem natürlich instabilen Zustand befand. In der Tat zeigen die Studie des Gebirgsspannungsfeldes sowie die numerischen Modellierungen, dass die lokale Ausrichtung der natürlichen tektonischen Gebirgsspannungen die Aktivierung dieser geologischen Störung begünstigt haben könnte. Jüngste wissenschaftliche Studien zeigen zudem, dass die seismische Aktivität in der gesamten Region Süd-Ostkoreas nach dem Megaerdbeben der Stärke 9 in Japan im Jahr 2011 («Fukushima-Erdbeben») zugenommen hat (siehe Kapitel 3).

Es ist daher wahrscheinlich, dass die im vertikalen Bohrloch durchgeführten Hochdruckinjektionen diese ohnehin schon natürlich instabile geologische Störung vollständig destabilisiert und damit zur Auslösung des Erdbebens vom 15. November 2017 beigetragen haben. Die relativen Beiträge von Naturphänomenen und menschlichen Einflüssen können derzeit noch nicht abschließend bestimmt werden. Dieses Thema steht im Mittelpunkt der Arbeit der nationalen Südkoreanischen Untersuchungskommission.

Rolle der Geo-Energie Suisse im Pohang-Projekt

- GES ist nicht Partner im Pohang-Projektconsortium, wie manchmal fälschlicherweise in der Presse berichtet wurde. GES ist einer der Partner im europäischen Forschungsprojekt DESTRESS, das im März 2016 begann und an dem auch einige Mitglieder des koreanischen Projekts mitwirken. Die ersten Bohrungen für das Projekt Pohang begannen 2012, und das Projekt war bereits weit fortgeschritten, als einige seiner Partner in DESTRESS mitmachten.
- Im Rahmen des DESTRESS-Projekts beschränkte sich die GES-Unterstützung auf die Bohrtechnik und die Messtechnik. Im Dezember 2016 wurde auf Wunsch der Pohang-Projektpartner ein 2,5 km vom Projekt entferntes Beobachtungsbohrloch von GES mit einem Bohrlochseismometer in einer Tiefe von 2.500 m ausgerüstet. Dieses Instrument, das bereits für das Baseler Projekt eingesetzt wurde, hat auch wertvolle Daten geliefert, die nun dazu beitragen, den Zusammenhang zwischen den Stimulationen und dem Erdbeben vom November 2017 zu verstehen.
- GES trug im Zusammenhang mit der Risikobewertung keine Entscheidungsverantwortung oder Haftung. Darüber hinaus war keiner der europäischen Partner von DESTRESS an der Planung und Umsetzung der Hochdruck-Stimulation beim vertikalen Bohren beteiligt.

3 Seismotektonische Situation in Südkorea

Obwohl der kausale Zusammenhang zwischen dem Geothermieprojekt und dem Erdbeben in Pohang als sehr wahrscheinlich erscheint, muss beim Verständnis dieses Ereignisses auch der spezifische geologische Kontext Südkoreas berücksichtigt werden.

Südostkorea wird von mehreren großen geologischen Störungen durchzogen (Yangsan, Ulsan, Ocheon – siehe Abbildung 2). Die bekannteste, die Yangsan-Störzone, ist mehr als 150 Kilometer lang und nur etwa 10 Kilometer vom Geothermieprojekt Pohang und der Störung entfernt, auf der das Erdbeben vom November 2017 stattfand. Zum Vergleich: Die Länge der Yangsan-Störung entspricht der Entfernung Delémont - Genf. Entlang der Yangsan-Störung fanden in den letzten 2000 Jahren etwa zehn Erdbeben mit einer Intensität größer oder gleich VIII² (d.h. Größen nahe 6 und mehr) statt, was deutlich auf eine seismisch aktive Region hinweist.

² Die Intensität eines Erdbebens bezieht sich auf seine Oberflächenwirkung und wird auf der modifizierten Mercalli Intensitätsskala (MMI) von I bis X (1 bis 10, in römischen Ziffern) gemessen. Diese Skala ist die einzige, die direkt auf historische Erdbeben anwendbar ist, für die es nur Beschreibungen über das Ausmaß der Zerstörung gibt. Eine Intensität VIII bedeutet, dass nur speziell konstruierte Gebäude geringfügige Schäden erleiden, andere schwere Schäden.

Die Größe hingegen wird auf der offenen Richterskala gemessen und ist ein Indikator für die durch das Erdbeben freigesetzte Energie. Sie wird mit Hilfe von Seismometern gemessen. MMI-Intensitäten von VIII und darüber entsprechen Erdbeben der Größenordnung nahe 6 und darüber.

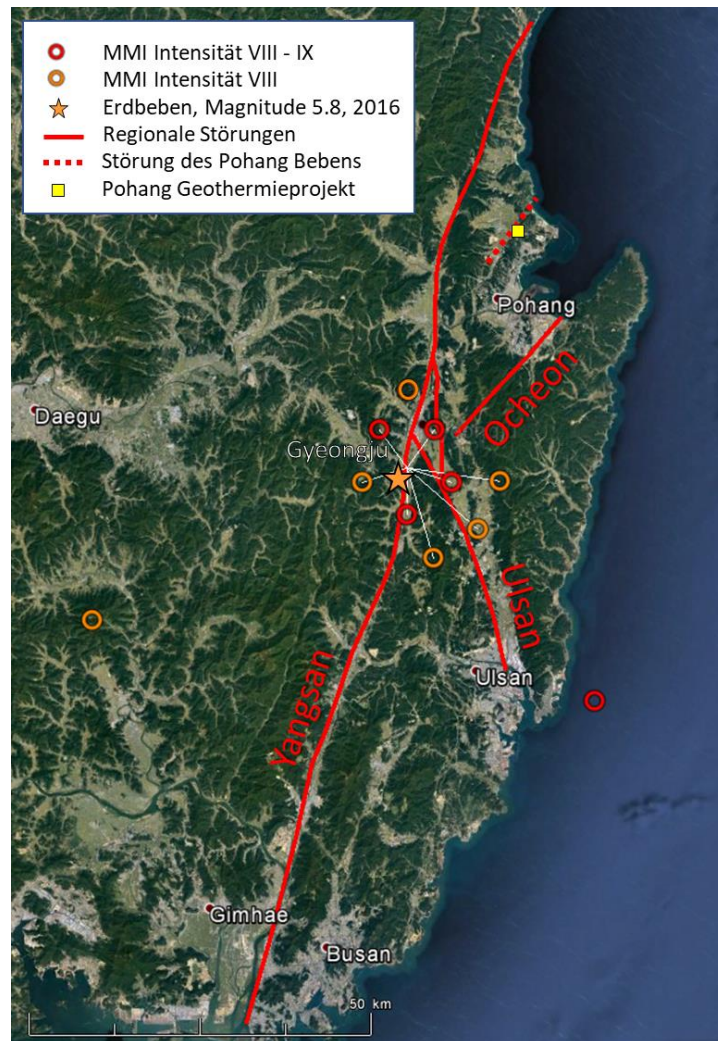


Abbildung 2: Südostkorea. Die wichtigsten geologischen Störungszonen Yangsan, Ulsan und Ocheon sind ebenso dargestellt wie historische Erdbeben von MMI-Intensität größer oder gleich VIII (letzte 2000 Jahre nach KIGAM³). Viele von ihnen konzentrieren sich in der Nähe von Gyeongju, an der Kreuzung der Ulsan und Yangsan Störungen. Das Erdbeben von Gyeongju im September 2016 wird durch einen orangefarbenen Stern dargestellt. Die während des Erdbebens in Pohang am 15. November 2017 aktivierte Störung wird gestrichelt dargestellt und der Projektstandort ist durch ein gelbes Quadrat gekennzeichnet.

Einfluss tektonischer Ereignisse in Japan auf die koreanische Halbinsel

Im März 2011 ereignete sich vor der Küste Japans ein Megaerdbeben der Stärke 9, das einen massiven Tsunami und unter anderem die Nuklearkatastrophe von Fukushima verursachte. Mehrere wissenschaftliche Studien zeigen, dass dieses Erdbeben auch einen Einfluss auf das tektonische Regime Koreas hatte.

³ Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Partner im Pohang-Projekt

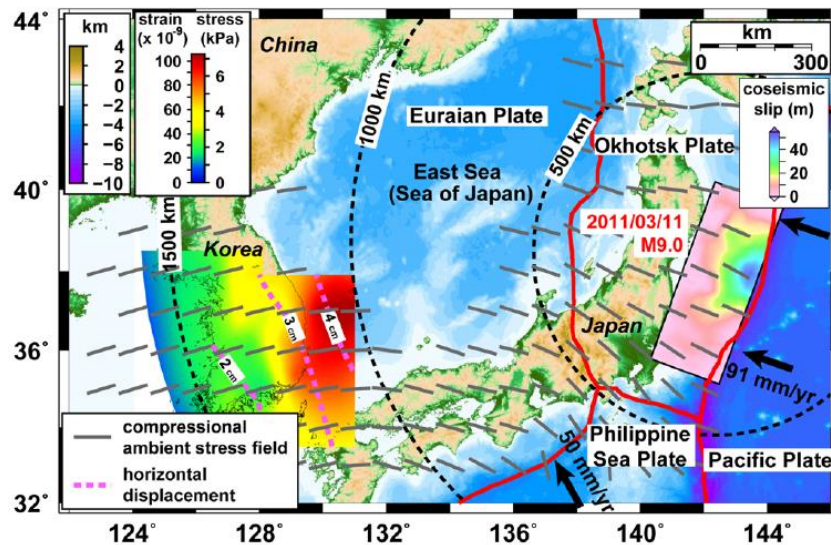


Abbildung 3: Horizontale Verschiebung der koreanischen Halbinsel in cm (rosa Linie) im Zusammenhang mit dem Erdbeben der Stärke 9 vom 11. März 2011 in Japan. Der Grad der Verformungen (Dehnung, $\times 10^{-9}$) und die damit verbundenen Spannungen (Spannung, kPa) sind für die koreanische Halbinsel farblich gekennzeichnet. Abbildung aus Hong et al, 2018, Nature.

Seitdem ist in Korea eine signifikante Zunahme der seismischen Aktivität zu verzeichnen. Einige Forscher sehen darin die Ursache für ein weiteres Erdbeben, das im September 2016 in der Nähe von Gyeongju, 40 km von Pohang entfernt, stattfand (Abbildung 2). Mit einer Magnitude von 5,8 war es das stärkste Erdbeben in Korea seit Beginn der instrumentellen Messungen im Jahr 1978. Nach Ansicht dieser Autoren könnte diese Situation auch beim Ausbruch des Erdbebens von Pohang im November 2017 eine Rolle spielen.

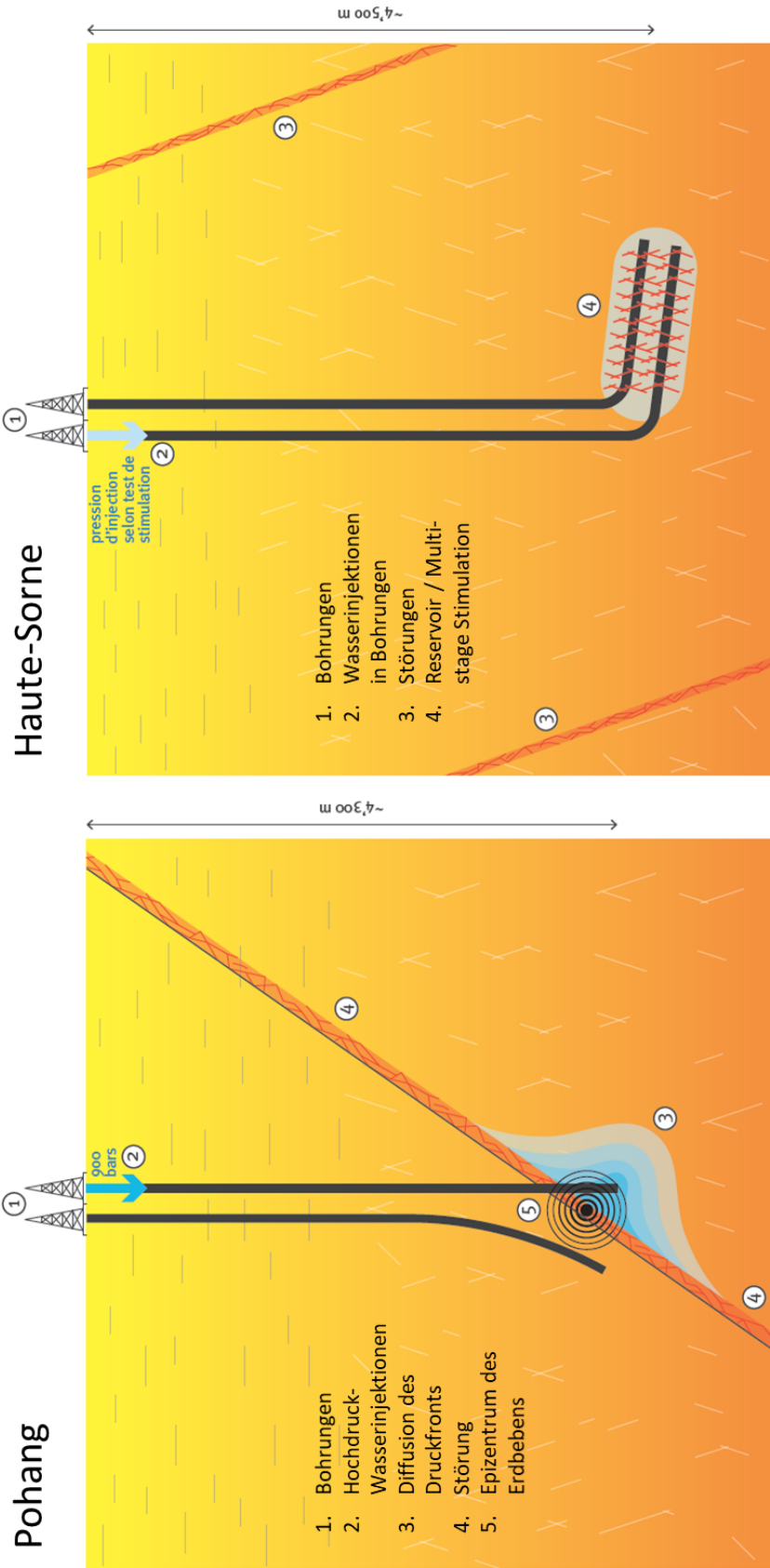
4 Auswirkungen der bisherigen Ergebnisse auf das Projekt Haute-Sorne

Die mehr als einjährige detaillierte Analyse durch mehrere Spezialisten ergab, dass zwischen den Projekten Pohang und Haute-Sorne grundlegende Unterschiede in Konzept und Umsetzung bestehen. Zudem unterscheidet sich der geologische Kontext Südkoreas stark von dem der Schweiz. Basierend auf diesen Analysen bleiben alle Sicherheitsmechanismen, die für das Haute-Sorne-Projekt vorgesehen sind, wirksam, um ein Szenario wie das in Pohang zu verhindern:

1. Erstens sind die geologischen Bedingungen des Juras, das sich inmitten einer stabilen Kontinentalplatte und mit mäßiger Seismizität befindet, nicht vergleichbar mit der Region Pohang, die dem Einfluss einer sehr aktiven Tektonik am Pazifikrand unterliegt.
2. Das Konzept des Pohang-Projekts bestand darin, geologische Störungszones zu erbohren und zu stimulieren, um eine Wasserzirkulation zwischen zwei Bohrlöchern mit sehr hohem Druck (bis zu 900 bar an der Oberfläche) herzustellen. Das Bohr- und Stimulationskonzept für das Haute-Sorne-Projekt unterscheidet sich diametral: geologische Störzonen, die eventuell ein erhöhtes seismisches Risiko darstellen könnten, sollten präventiv vermieden werden. Darüber hinaus wird im Falle von Haute-Sorne die für die Wasserkreislaufführung

erforderliche Durchlässigkeit erreicht, indem in aufeinanderfolgenden Schritten viele kleine Bereiche entlang horizontaler Bohrungen stimuliert werden. Dieses Konzept reduziert intrinsisch das seismische Risiko.

3. Für das Projekt Haute-Sorne wurde eine Risikostudie nach dem neuesten Stand der Technik durchgeführt. So war es möglich, einen geeigneten Standort auszuwählen, das Stimulationskonzept zu validieren und Vorsichtsmaßnahmen wie seismische Überwachungssysteme und Grenzwerte zu definieren. Eine vergleichbare Risikostudie für das Projekt Pohang ist uns nicht bekannt.
4. Das in Haute-Sorne einzurichtende seismische Überwachungssystem basiert auf den neuesten messtechnischen Entwicklungen, wie z.B. der Ausrüstung von Bohrungen mit Seismometerketten. Dieses System ermöglicht die genaue Messung und Lokalisierung seismischer Ereignisse in Echtzeit. Grosses Augenmerk wird auch auf das Auftreten und die Entwicklung der induzierten Seismizität auf einer benachbarten geologischen Störzone gerichtet, was zu einem sofortigen Stopp der Stimulationsarbeit führen würde. In Pohang hingegen war keine Echtzeit-Lokalisierung möglich. Nach dem Erdbeben brauchte ein Team von Spezialisten im Jahr 2018 fast 9 Monate, um die induzierte Seismizität zu lokalisieren, die bei den Arbeiten von 2016 bis 2017 aufgezeichnet wurde. Die Daten erwiesen sich aufgrund von Netzwerkkonfigurationen, die sich während des Projekts mehrfach änderten, als besonders komplex in der Verarbeitung. Andererseits zeigte die hydraulische Stimulation der Tiefengeothermiebohrung des ST1-Projekts in Espoo, nahe Helsinki, die im vergangenen Sommer mit einem stufenweisen Stimulationskonzept ähnlich dem von GES durchgeführt wurde, dass diese Ziele durch den Einsatz des besten Standes der Technik perfekt erreicht werden können.
5. Das Projekt Haute-Sorne wird phasenweise durchgeführt, und der Stimulation des Untergrundes geht eine Testphase voraus. Alle neuen Projektdaten (seismische Aufzeichnungen, Messungen in Bohrlöchern zur Bestimmung der Ausrichtung der Gebirgsspannungen usw.) werden systematisch aus der Sicht der Risikobewertung analysiert und können gegebenenfalls zu einer Aktualisierung der Risikostudie führen. Eine Gruppe unabhängiger Experten wird für die Beurteilung der Risikoberechnungen und die Weiterleitung der Empfehlungen an die Kantonsregierung zuständig sein. Uns ist kein solcher Mechanismus zur Risikobewertung für das Pohang-Projekt bekannt, der auf den Daten basiert, die während der Durchführung des Projekts in Pohang gewonnen wurden.



In Haute-Sorne sieht das Konzept der Reservoirentwicklung durch mehrstufige Stimulation ausdrücklich vor, dass ein Sicherheitsabstand zu Störungen, die ein potenzielles seismisches Risiko darstellen könnten, eingehalten werden soll. Umfangreiche Risikostudien haben es ermöglicht, einen geeigneten Standort auszuwählen, das Simulationskonzept zu validieren und Massnahmen zur Risikominderung zu definieren, wie z.B. die Dimension der stimulierten Flächen gering zu halten, die Echtzeitlokalisierung der Seismizität und die Schwellenwerte für das Ampelsystem.

In Pohang zielten die Bohrungen auf eine grosse Störungszone, die mit der vertikalen Bohrung durchstossen wurde und mit der abgelenkten Bohrung sandwichartig eingeklemmt wurde. Die Störungszone enthält eine undurchlässige Barriere, die die Zirkulation von Wasser zwischen den beiden Bohrlöchern verhinderte. Wiederholte Injektionen unter sehr hohem Druck, um die Durchlässigkeit zu erhöhen und um Wasser zwischen den Bohrungen zu zirkulieren, führten zu einem Druckaufbau und wahrscheinlich zur Destabilisierung einer ohnehin schon natürlich instabilen Störung und schliesslich zum Erdbeben vom 15. November 2017.

Abbildung 4: Vergleich der Konzepte der Projekte Pohang und Haute-Sorne.

5 Stopp-Kriterien für die Beendigung des Haute-Sorne-Projekts und Vergleich mit dem, was in Pohang getan wurde

Das Projekt Haute-Sorne ist an 136 Bedingungen gebunden, die vom Umweltamt des Kantons Jura festgelegt wurden. Von diesen sind 21 der induzierten Seismizität gewidmet. Diese Bedingungen sind besonders streng und anspruchsvoll. Insbesondere auf der Grundlage der Bedingung 57 hat der Kanton Jura GES aufgefordert, diesen Bericht vorzulegen und durch unabhängige Experten prüfen zu lassen:

«Die seismische Risikoanalyse muss aktualisiert werden, wenn neue Daten oder Erkenntnisse (technisch oder wissenschaftlich) existieren, die das Risikoniveau oder das Risikomanagement erheblich verändern können.»

Die Ergebnisse unserer im Jahr 2018 durchgeführten Untersuchungen zeigen auf, dass die strikten Baubewilligungsbedingungen für das Haute-Sorne Projekt angewendet auf das Projekt in Pohang bereits nach der ersten von fünf Stimulationen zur Aufgabe des Projektes geführt hätte.

1 Genehmigungsaufgabe 55 - Entwicklung der Seismizität außerhalb des Speichers

Die Entwicklung von Mikroseismizität auf einer Fläche in einem grösseren Abstand von der Wasserinjektionsstelle kann ein Hinweis darauf sein, dass eine instabile geologische Störzone durch die Stimulationsarbeiten aktiviert wird. Daher Bedingung 55:

«Die Entwicklung der Punktwolke, die induzierte Erdbeben darstellt, muss kontinuierlich überwacht werden. Bei besonderen Beobachtungen, wie z.B. der Entwicklung eines Lineaments oder der Beschleunigung der Wolkenentwicklung, muss das Stimulationsstoppprotokoll sofort angewendet und das seismische Risiko neu bewertet werden. Das Monitoring der Punktwolke und die Kriterien für das Stoppen der Stimulation werden mit der Expertengruppe im Detail festgelegt.»

Die Auswertung der seismischen Daten aus dem Pohang-Projekt, die von GES nach dem Erdbeben vom November 2017 durchgeführt wurde, zeigt deutlich, dass sich die induzierte Seismizität im Zusammenhang mit der allerersten Stimulation des Pohang-Untergrundes, die im Januar 2016 im vertikalen Bohrloch mit einem Druck von fast 900 bar an der Oberfläche durchgeführt wurde, nicht in der Nähe des Bohrlochs, sondern mehrere hundert Meter vom Injektionspunkt entfernt auf einer Fläche entwickelte.

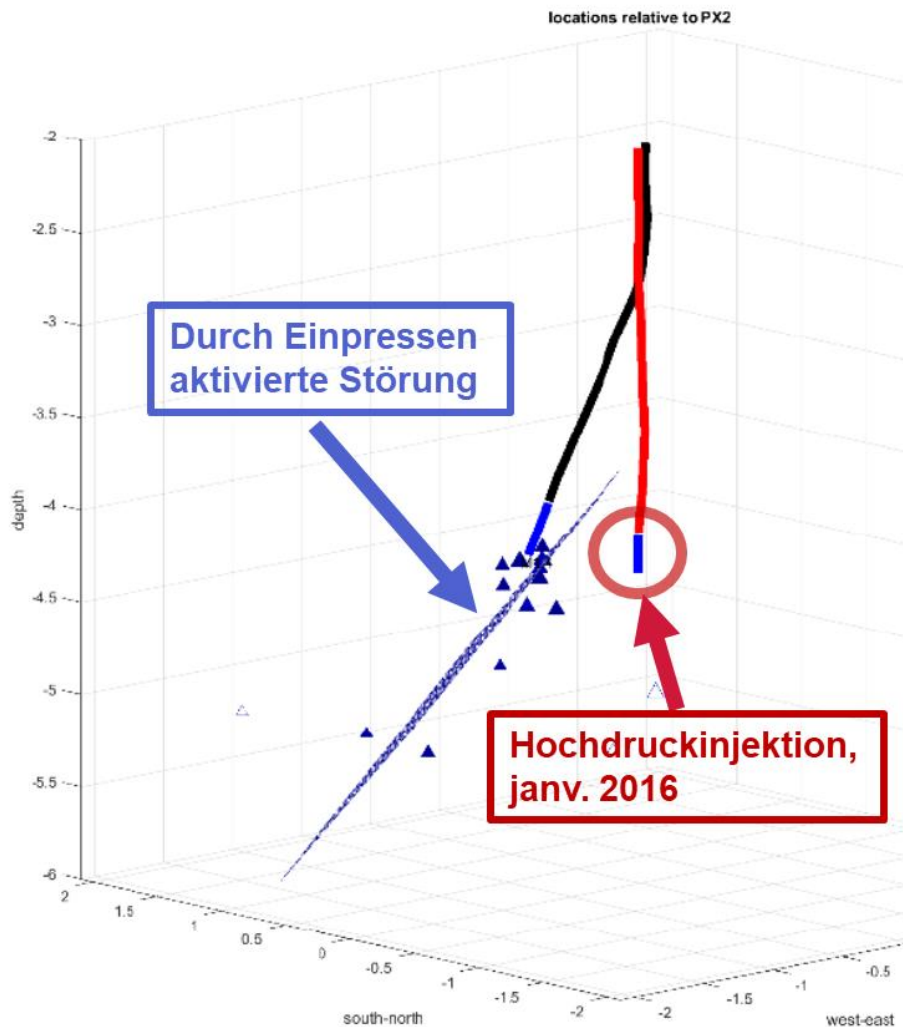


Abbildung 5: Darstellung der ersten Stimulation, die in Pohang im Januar 2016 im vertikalen Bohren durchgeführt wurde. Das Wasser wurde in das rote Bohrloch injiziert. Die Seismizität, dargestellt durch blaue Dreiecke, entwickelte sich mehrere hundert Meter von der Injektionsstelle entfernt. Die Seismizität definiert eine Ebene (in blau), die eine geologische Störung darstellt, die durch die Hochdruckinjektionen aktiviert wird. Dies ist wahrscheinlich die geologische Störung, deren Versagen das Erdbeben vom 15. November 2017 verursacht hat.

Wäre in Pohang eine Echtzeit-Lokalisierung der Seismizität, wie sie in Haute-Sorne geplant ist, durchgeführt worden, hätte man diese unerwartete Entwicklung der Seismizität frühzeitig feststellen können. Dadurch wäre es möglich gewesen, zu erkennen, dass die Stimulationsarbeiten eine instabile geologische Störungszone in der Nähe der Hochdruckinjektionen aktiviert hatten und die Arbeiten sofort zu stoppen. Die Fläche auf der die Mikroseismizität gemessen wurde, ist wahrscheinlich diejenige Störungszone, deren Versagen das Erdbeben vom 15. November 2017 verursacht hat.

Die Anwendung der Auflage 55 der Haute-Sorne-Genehmigung auf den Fall Pohang hätte zu einem sofortigen Abbruch der Arbeiten und wahrscheinlich zur Einstellung des Projekts bereits im Januar 2016 geführt, bevor weitere vier Stimulationskampagnen während je zwei Wochen Ende 2016 und während 2017 durchgeführt wurden.

2 Genehmigungsaufgabe 60 - Verfahren bei Überschreitung eines vorgegebenen Grenzwertes

Die Haute-Sorne-Risikostudie definierte eine Erdbebenmagnitude von $M_W=2,6$ als Grenzwert, bei dessen Überschreitung erste kleine Schäden an empfindlichen Gebäuden eintreten könnten. Um sicherzustellen, dass dieser Grenzwert nicht überschritten wird, wurde eine hohe Sicherheitsmarge berücksichtigt. Ein Stopp der Injektion ist bei einer Magnitude $M_W = 2,0$ («Ampel schaltet auf Rotlicht») vorgegeben. Sollte trotz dieser Vorkehrungen der Schwellenwert $M_W = 2,6$ überschritten werden, sieht die Bedingung 60 der Genehmigung vor:

«Im Falle eines Erdbebens, das größer als der erwartete Grenzwert für den ersten Schaden ist (derzeit $M_W=2,6$), wird das Stoppprotokoll der hydraulischen Stimulation sofort angewendet. Geo-Energie Suisse AG wird die seismische Risikoanalyse aktualisieren, insbesondere die Ursachen des Erdbebens erläutern und an die Expertengruppe weiterleiten. Diese wird ihre Empfehlungen an die Regierung weiterleiten, die darüber entscheidet, ob das Projekt fortgesetzt wird oder nicht.»

Das Pohang-Projekt verfügte über ein Ampelsystem mit einem Rotlicht bei einem Grenzwert von $M_L=2,0$. Uns ist jedoch nicht bekannt, welche Konsequenzen bzw. Massnahmen die Überschreitung dieses Grenzwertes nach sich zog, beziehungsweise basierend auf welchen Kriterien das Pohang Projekt fortgesetzt werden konnte.

Der Grenzwert von $M_L=2,0$ wurde in der zweiten Stimulation im abgelenkten Bohrloch im Dezember 2016 und im Januar 2017 zweimal leicht überschritten und das Projekt wurde fortgesetzt, was aufgrund der geringfügigen Überschreitung nachvollziehbar erscheint. Im April 2017 wurde in der dritten Phase der Stimulation im vertikalen Bohrloch ein Erdbeben der Größenordnung $M_L=3,1$ aufgezeichnet. Wir wissen nicht, aufgrund welcher Kriterien das Projekt nach der deutlichen Grenzwertüberschreitung im April 2017 fortgesetzt wurde. Tatsächlich wurden im August 2017 eine Stimulation im abgelenkten Bohrloch und im September 2017 eine weitere Stimulationsphasen mit sehr hohem Druck im vertikalen Bohrloch durchgeführt.

Die Anwendung der Bedingung 60 der Haute-Sorne-Genehmigung auf das Projekt Pohang hätte zu einem sofortigen Abbruch der Arbeiten und einer Aktualisierung der Risikoanalyse im Dezember 2016 / Januar 2017 und zweifellos zu einer endgültigen Einstellung des Projekts spätestens nach April 2017 geführt.

6 Schlussfolgerung

Fast ein Jahr lang analysierten und interpretierten mehrere Spezialisten der Geo-Energie Suisse AG die Daten aus dem Geothermieprojekt Pohang und dem Erdbeben vom November 2017. Diese Studien ergaben, dass die im vertikalen Bohrloch durchgeführten Wasserinjektionen mit sehr hohem Druck wahrscheinlich eine entscheidende Rolle bei der Auslösung des Erdbebens auf einer natürlicherweise instabilen geologischen Störung gespielt haben. Die relativen Beiträge von menschlichen und natürlichen Ursachen sind jedoch noch nicht endgültig feststellbar.

Die Untersuchungen zeigen auch wesentliche Unterschiede in der Projektkonzeption, der Umsetzung und der seismotektonischen Lage des Pohang-Projekts im Vergleich zum Haute-Sorne-Projekt auf. Angesichts dieser Ergebnisse kommt Geo-Energie Suisse zum Schluss, dass das Konzept des Haute-Sorne-Projekts und die damit verbundenen Sicherheitsmaßnahmen weiterhin gültig sind, um ein Szenario wie dasjenige in Pohang zu verhindern. Aus der Pohang-Analyse ist nicht ersichtlich, dass die in der Risikostudie 2014-2015 für Haute-Sorne berücksichtigten Annahmen und Parameter unzureichend oder unterschätzt sind. Die im Rahmen der Risikoanalyse durchgeführte Projektbewertung für Haute-Sorne bleibt somit unverändert.

Die Umsetzung des Projekts Haute-Sorne ist von den kantonalen Behörden an 136 Bedingungen geknüpft. Von diesen sind 21 der induzierten Seismizität gewidmet. Die Ergebnisse unserer Untersuchungen zum Projekt Pohang erlauben es uns zu zeigen, dass die Anwendung von Zulassungsbedingungen ähnlich denen von Haute-Sorne es ermöglicht hätte, das Projekt Pohang bereits in der ersten Stimulationsphase im Januar 2016 zu stoppen.

Im Rahmen des neuen Energiegesetzes, das am 1. Januar 2018 in Kraft getreten ist, und um die Erfolgsaussichten zu maximieren und die Risiken weiter zu reduzieren, hat Geo-Energie Suisse ihren operativen Ansatz überprüft und beschlossen, ihr Projekt in zwei Phasen durchzuführen. Die erste Phase wird der Erkundung gewidmet sein. Die erste Bohrung wird bis in die Tiefe des geothermischen Reservoirs durchgeführt. Alle Messungen zur Charakterisierung der Tiefengesteins wie Bruchzustand, Durchlässigkeit und Spannungsfeldorientierung werden sorgfältig durchgeführt. Um die Reaktion des Gesteins vorhersagen zu können wird ein Stimulationstest durchgeführt, nach einem vordefinierten Protokoll, besonders sorgfältig und überwacht, mit kleinen Injektionsmengen und niedrigen Drücken.

Basierend auf diesen Erkenntnissen und weiteren Erkenntnissen aus ähnlichen Projekten auf der ganzen Welt (2018-2021) wird das Projektkonzept hinterfragt, getestet und bei Bedarf angepasst. Zu diesem Zweck steht GES in engem Kontakt mit dem finnischen Unternehmen ST1, das gerade die Stimulation einer mehr als 6 km tiefen Bohrung unter Helsinki erfolgreich abgeschlossen hat, sowie mit dem Konsortium, das das Forschungsprojekt FORGE zu tiefen EGS-Systemen in den USA durchführen wird. Zusätzliche Möglichkeiten zur Validierung der für das Pilotprojekt erforderlichen Technologien bieten Forschungsarbeiten, die in mehreren untertägigen Gesteinslabors auf der ganzen Welt durchgeführt werden.

Schließlich wird die Risikostudie auf der Grundlage der tatsächlich im ersten Haute-Sorne-Bohrloch gemessenen Parameter und der Erfahrungen aus den oben genannten Projekten aktualisiert. Nur dann wird es möglich sein, zur zweiten Phase überzugehen, nämlich zur zweiten Bohrung und Stimulation des Reservoirs.

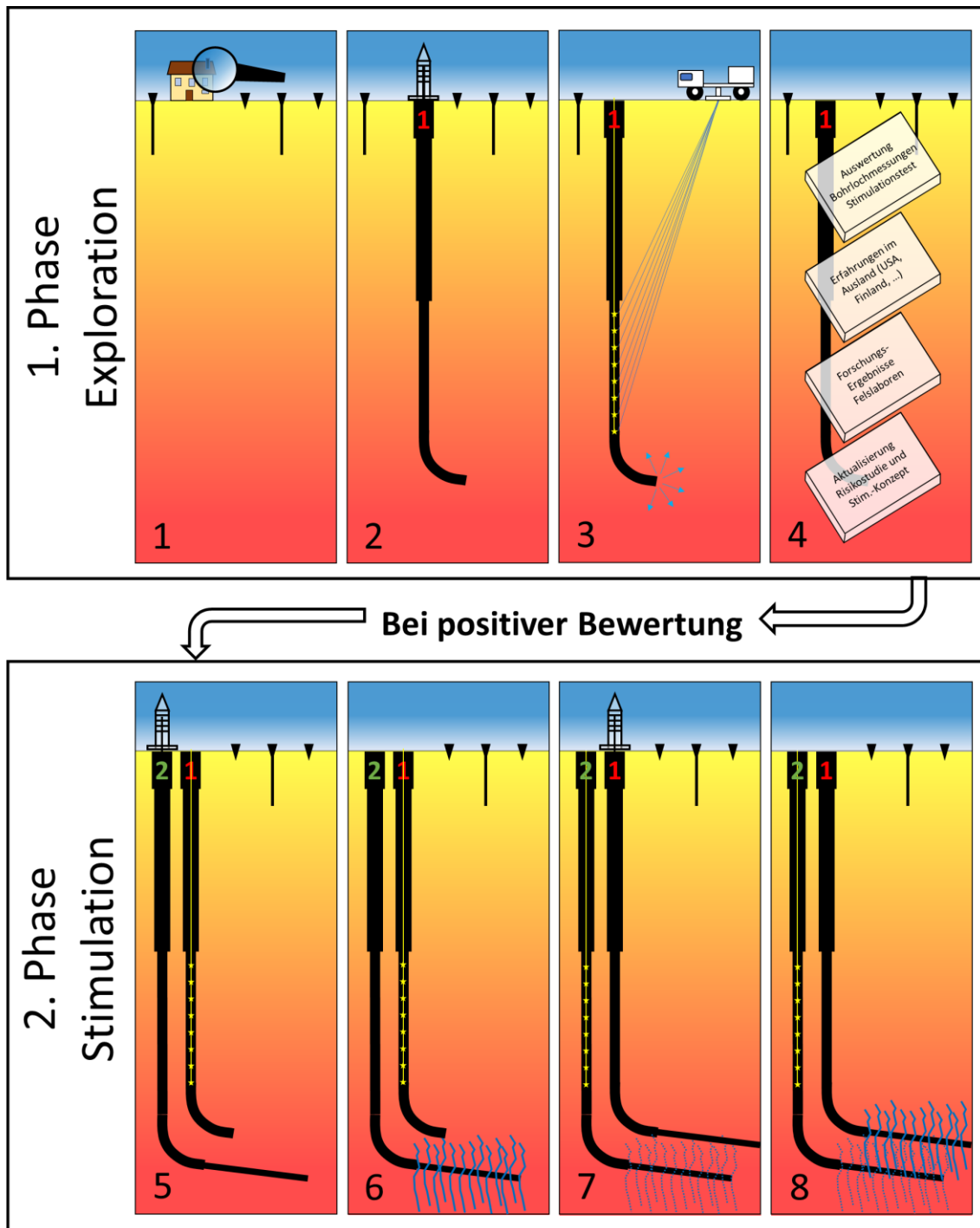


Abbildung 6: Schritte zur Umsetzung des Pilotprojekts Haute-Sorne. Erkundungsphase: 1) Beweissicherung und Aufbau des seismischen Überwachungsnetzes (Oberflächenstationen und Bohrungen) 2) Fertigstellung der ersten Erkundungsbohrung 3) Messungen im Speicher und Stimulationstest mit niedrigen Drücken und kleinen Volumina 4) Untersuchung der Ergebnisse der Messungen und Stimulationstests, Integration von im Ausland durchgeführten Experimenten und untertägiger Gesteinslaborforschung, Aktualisierung der Risikostudie und des Stimulationskonzepts. Nach aktuellem Planungsstand erfolgt diese Phase ohne Bohranlage. Bei positiven Ergebnissen Übergang zur Stimationsphase: 5) Fertigstellung des zweiten Bohrlochs; das erste ist mit einer Seismometerkette für sehr genaue Messungen ausgestattet 6) Stimulation des Speichers unter Kontrolle des seismischen Überwachungssystems 7) Fertigstellung des ersten Bohrlochs, das zweite ist nun mit der Seismometerkette ausgestattet und 8) ggf. zusätzliche Stimulation des ersten Bohrlochs unter Kontrolle des seismischen Überwachungssystems.

7 Nächste Schritte für das Haute-Sorne-Projekt

Dieser Bericht wurde der Regierung des Kantons Jura anfangs Januar 2019 vorgelegt. Wie in ihrer Pressemitteilung vom 28. November 2017 angekündigt, kann die Regierung den Bericht nun unabhängigen Experten zur Stellungnahme vorlegen. Auf der Grundlage der Empfehlungen der Experten werden die Behörden dann über die Folgemaßnahmen zum Projekt Haute-Sorne entscheiden. Falls die Regierung des Kantons Jura grünes Licht gibt, werden die nächsten Schritte wie folgt sein:

1. Die Überwachungs- und Informationskommission zum Projekt Haute-Sorne wird ihre Arbeit aufnehmen, gemäss der Vereinbarung aus dem Jahr 2015 zwischen der Gemeinde Haute-Sorne, dem Kanton Jura und der Geo-Energie Suisse AG bzw. Geo-Energie Jura AG.
2. Die folgenden Vorbereitungsarbeiten werden parallel durchgeführt:
 - a. Das Konzept der Beweisaufnahme wird umgesetzt. Zuerst werden die Hauseigentümer umfassend informiert, dann werden notarielle Rissprotokolle an einer repräsentativen Stichprobe von Gebäuden in der Gemeinde durchgeführt, bevor mit dem Bohren begonnen wird.
 - b. Das seismische Überwachungsnetz wird nach den strengen Kriterien der Bewilligung gebaut und in Betrieb genommen.
 - c. Die Grundwasserüberwachung wird gemäss den behördlichen Auflagen ebenfalls durchgeführt.
 - d. Der Bohrplatz wird gebaut.
3. Erste Tiefbohrung mit Messungen zur genauen Charakterisierung des Untergrundes sowie erster Stimulationstest mit niedrigen Drücken zur Evaluation des seismischen Risikos.
4. GES wird die erforderliche Zeit, mindestens ein Jahr, für die vollständige Auswertung der aufgezeichneten Daten, insbesondere im Hinblick auf das seismische Risiko, aufwenden. Die Risikoanalyse wird aktualisiert.
5. Bei positiver Bewertung geht GES dann in die zweite Phase über und führt die zweite Bohrung und Stimulation des geothermischen Reservoirs durch.

Im Rahmen des Überwachungs- und Informationskommission wird ein intensiver Austausch mit kritischen Bürgern stattfinden. Ihre Ängste nehmen wir sehr ernst. Da es sich um ein Vorzeigeprojekt handelt, das einen entscheidenden Einfluss auf die zukünftige Nutzung dieser erneuerbaren Energie in der Schweiz haben wird, wird dieses Projekt mit den strengsten Sicherheitsmassnahmen und mit grösstmöglicher Transparenz durchgeführt. Dies entspricht auch der Erwartung des Bundes, der dieses Projekt mit einem Anteil von 60% unterstützt, und der Aktionäre der Geo-Energie Suisse, die sich für den Durchbruch dieser zukunftssträchtigen Technologie eingesetzt haben. Unkontrollierte Seismizität und ein zu hohes Risiko würden dieses Ziel unerreichbar machen. Die zuständigen Behörden würden anordnen, das Projekt einzustellen. Dies würde es verunmöglichen, ein ähnliches Projekt auch an einem anderen Ort in der Schweiz durchzuführen.