

Umweltforschung in Baden-Württemberg

Zwischenbericht anlässlich des Statuskolloquiums
Umweltforschung Baden-Württemberg 2016

am 3. und 4. Februar 2016
im Haus der Wirtschaft Karlsruhe

**LFZG Verbundvorhaben:
Kombinierte Voruntersuchungen für
Tiefengeothermie-Labor**

von

B. Müller

Landesforschungszentrum Geothermie, Karlsruhe

F. Schilling, Ch. Scheffzük, T. Kohl, M. Grimm, E. Gaucher
Karlsruher Institut für Technologie

M. Joswig, G. Mokolke
Universität Stuttgart

K. Bucher
Universität Freiburg

D. Doherr
Hochschule Offenburg

Förderkennzeichen: L75 14001 - L75 14004

Die Arbeiten dieses Projekts werden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg durchgeführt

LFZG Verbundvorhaben

Kombinierte Voruntersuchungen für Tiefengeothermie-Labor

L75 14001-14004

Zwischenbericht Bearbeitungsjahr 2015

Antragsteller: Landesforschungszentrum Geothermie

Projektleiter: Prof. Dr. Thomas Kohl

Institut: KIT, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Abteilung Geothermie

Telefon: 0721 6084 5220

Telefax: 0721 6084 5228

E-Mail: thomas.kohl@kit.edu

Projektpartnerinstitute:

- Landesforschungszentrum Geothermie
- Universität Stuttgart, Institut für Geophysik
- Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Geothermie
- Universität Freiburg, Institut für Geowissenschaften, Mineralogie – Geochemie
- Hochschule Offenburg, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2014 – 31.12.2015

Berichtszeitraum: 01.01.2015 – 31.12.2015

Karlsruhe, Dezember 2015

Inhalt

I. KURZFASSUNG - SUMMARY	2
II. BEGLEITUNG DER ARBEITSPAKETE	3
AP1: MIKROZONIERUNG IM SCHWARZWALD.....	3
AP2 : CHEMISCHE EFFEKTE DER HYDRAULISCHEN STIMULATION, CHEMISCHE STIMULATION.....	5
AP3: IN SITU MESSUNG INDUZIERTER DEFORMATIONEN.....	7
AP4: STANDORTFAKTOREN GEOLAB MIT AUFBAU EINER GIS BASIERTEN DATENBANK.....	9
AP5: PASSIVES SEISMISCHES MONITORING ÜBER DIE POLARISATION DER SEISMISCHEN WELLEN	11
AP6: COMPUTERGESTÜTZTE KOOPERATIONS- UND PROJEKTBEGLEITUNG ZUR UNTERSTÜTZUNG DES FORSCHUNGS-MANAGEMENTS ZUR EFFIZIENZSTEIGERUNG UND KOMPETENZBÜNDELUNG IN DER GEOTHERMIE-FORSCHUNG.....	12

I. KURZFASSUNG - SUMMARY

Das Projekt beinhaltet verschiedene wissenschaftliche Voruntersuchungen für das im Schwarzwald geplante Untergrundlabor GeoLab. Von vier Universitäten / Forschungsinstitutionen wurden vorbereitende geophysikalische, geochemische, geomechanische und geologische Untersuchungen durchgeführt. Zudem wurde eine Projekt-Management Plattform eingerichtet.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes ist das Projekt erwartungsgemäß nahezu abgeschlossen (offizielles Ende: 31. Dezember 2015). Die Geländearbeiten (AP1, AP4) sowie die Laborversuche (AP2, AP3) wurden nahezu vollständig durchgeführt, wobei geringe Restarbeiten in den kommenden Tagen fertig gestellt werden. An den angefallenen Untersuchungsergebnissen erfolgten erste Vorauswertungen; die Interpretation steht jedoch bis auf ein paar wenige Details an der finalen Interpretation. Die reinen theoretischen Ausarbeitungen und Modellierarbeiten sind nahezu fertig gestellt (AP4, AP5). Die Projekt-Management Plattform ist erstellt und läuft (AP6) und wird die Beendigung des Projektes unterstützen.

Zu den Highlights der einzelnen Arbeitspakete von 2015 gehören:

- Das Monitoring der Mikroseismizität mit einem Klein-Array, installiert im „Schwarzwald-Observatorium Schiltach“, erbrachte für die Seismizität natürliche Hintergrundwerte aus der Region (mindestens ML = 0,5 in bis zu 100 km Entfernung), das sind höhere Empfindlichkeiten als diejenigen des LED Netzwerkes; die Referenzwerte für das seismische Geräusch wurden gemessen (AP1).
- Es wurden erfolgreich Autoklav-Versuche mit verschiedenen Festgesteinen unter Reservoirbedingungen (hochsalinaren Wässer, 200°C bzw. 260°C) durchgeführt, um Alterationsreaktionen und Mineralneubildungen zu untersuchen. Beispielsweise wurde als Mineralneubildung Analcim im Sandstein beobachtet, dessen Bildung zu einer Volumenvergrößerung und damit zu einer Permeabilitätsabnahme führt (AP2).
- Es wurden Laborversuche zur Messung der Spannung in der Gesteinsmatrix, hervorgerufen durch Stress, durchgeführt. Erste Ergebnisse liegen vor (AP3).
- Die GIS-Datenbank für mögliche GeoLab-Standorte in Bergwerken des Schwarzwaldes ist mit den wichtigsten grundlegenden Parametern fertig gestellt. Zudem wurde eine Modellierung des Untertage- Stresses infolge der Topographie durchgeführt (AP4).
- Die neue Bayesian Formulierung, zur Lokalisation von Erdbeben mittels P-Wellen Polarisation, wurde mathematisch gelöst und an einem synthetischen Beispiel getestet (AP5).
- Die Projekt-Management Plattform ist erstellt und sie läuft (AP6).

Alle Projektpartner werden ihre Arbeitspakete fristgerecht beenden, so dass der gemeinsame Abschlussbericht rechtzeitig vorliegt.

This project consists in a series of preparatory scientific studies for the planned GeoLaB underground laboratory in Black Forest. Investigations related to geophysics, geochemistry, geomechanics and geology, and the development of a project management platform have been performed by four institutes/universities in Baden-Württemberg.

At the time this report is written, the project is almost finished, as expected (official end: 31 Dec. 2015). The field works (AP1, AP4) and the laboratory experiments (AP2, AP3) have been conducted and may still go on. In all cases, analyses of the existing results have been carried out and are also continuing. More theoretical works or modelling

works are also in their termination phase (AP4, AP5). Finally, the project management platform is up and running (AP6) and will help finalizing the project.

Highlights of each work package results obtained in 2015 are the following:

- Microseismic monitoring using a small-array deployed in the “Black Forest Observatory” provided natural seismicity baseline in the region (down to at least $ML=0.5$ at 100 km), better sensitivities than the regional network and seismic background noise references (AP1).
- Autoclave experiments with several rock samples to analyse mineral deposits and dissolution in salted water at reservoir temperatures were conducted. In particular, the observation of analcime deposit on the sandstone surface suggests possible decrease of reservoir permeability with time (AP2).
- The laboratory experiments for measuring rock matrix strain induced by stress have been conducted and delivered their first results (AP3).
- The GIS database for possible Geolab sites in mines located in the Black Forest is completed with basics selection parameters. Modelling of the underground stresses generated by the topography has been done (AP4).
- The new Bayesian formulation to locate earthquakes by using P-wave polarization has been defined and tested on a synthetic example (AP5).
- Last but not least, the project management platform is up and running (AP6).

All partners will finish their parts in time and the final report will be delivered on time.

II. BEGLEITUNG DER ARBEITSPAKETE

AP1: Mikrozonierung im Schwarzwald

- Bearbeiter: Prof. M. Joswig, Dipl. Geol. G. Mokolke. Universität Stuttgart
- Forschungsvorhaben: L75 14002

Kurzbeschreibung dieses Teil-Projekts

Ziel dieses Teil-Projekts ist die Ermittlung der Ausrichtung und der seismischen Aktivität vorhandener Störungen mittels Klein-Arrays an einzelnen Bergwerken.

Projektstand

Am 3. April 2015 wurde von seiten des Instituts für Geophysik Stuttgart in dem alten Grubengebäude der „Grube Anton“ im Schwarzwald ein Klein-Array mit vier Seismometern installiert. Die „Grube Anton“ befindet sich im Heubachtal nördlich von Schiltach im Zentral-Schwarzwald. Seit etwa 1972 hat dort die Universität Karlsruhe gemeinsam mit der Universität Stuttgart das „Black Forest Observatory“ (BFO) eingerichtet. Kennzeichnend ist die geringe Beeinträchtigung durch anthropogene und natürliche seismische Bodenunruhe. Die Forschungsziele des BFO sind im Bereich der langperiodischen Bewegungen des Erdkörpers verankert, während im Rahmen dieses Projekts der kurzperiodische Frequenz- und räumliche Nahbereich des alten Grubengebäudes untersucht werden sollte.

Die Situation vor Ort (ehemaliges Grubengebäude in einem Schwarzwaldgranit – hier „Wittichener Granit“) entspricht den Erwartungen bzw. Vorgaben, unter denen das zukünftige GeoLaB errichtet werden sollte. Die Errichtung des Kleinarrays und die seismologische Auswertung ermöglicht einige für den geplanten Aufbau des GeoLaB bedeutenden Fragestellungen in grundsätzlicher Art zu klären:

- a. Die Bewertung der seismischen Bodenunruhe bei Unter-Tage-Messungen im Schwarzwaldgranit.
- b. Ermittlung des Ausmaßes der Mikroseismizität unterhalb der Vollständigkeitsmagnitude der regionalen Messnetzwerke im zentralen Bereich des Schwarzwalds.
- c. Können unbekannte, aktive Störungszonen, welche für den tektonischen Rahmen eines Felslabors von Bedeutung sind, auskartiert werden? Die Ermittlung aktiver Störungszonen im Nahbereich (< 20 km) des Grubengebäudes und der Abgleich mit auskartierten, bekannten Störungen wird durchgeführt.

Die bisher aufgezeichneten Daten wurden mit den Bulletin-Daten der umgebenden seismologischen Netzwerke des Erdbebendienst Südwest sowie des französischen und schweizerischen Erdbebendienstes abgeglichen. Die Begutachtung der Wellenformdaten geschieht anhand von Sonogrammen (noise-adaptierte Spektrogramme). Durch den Vergleich des Verhältnisses zwischen den von uns in den Wellformdaten gefundenen bzw. nicht-gefundenen Erdbeben und den Bulletindaten lässt sich eine distanzabhängige Empfindlichkeitsschwelle ableiten. Dies wurde bisher

für den Zeitraum 3. April – 10. November durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abb. 1 wiedergegeben. Der für den Betrieb eines UntertageLABs wichtige Nahbereich bis 3 km Hypozentral-Distanz wird mit einer Vollständigkeitsmagnitude von etwa -1,4 abgedeckt. Das weitere Umfeld bis 10 km in dem sich die lokale Tektonik wiederfindet, mit Vollständigkeitsmagnituden bis $ML = -0,9$.

Interessant ist ein Aspekt, der noch genauer untersucht bzw. dessen Potential geprüft wird: aufgrund der verhältnismäßig niedrigen Vollständigkeitsmagnitude von 0,5 im Bereich bis 100 km könnten für zukünftige Geothermieprojekte im mittleren Oberrheingraben Seismizitäts-untersuchungen durchgeführt werden.

Die (einer ersten Abschätzung zufolge) geringen Unterschiede der Empfindlichkeit bei Tag und Nacht bzw. Werk- und Feiertags werden noch eingehender untersucht. Ebenso die Frequenzabhängigkeit der seismischen Bodenunruhe.

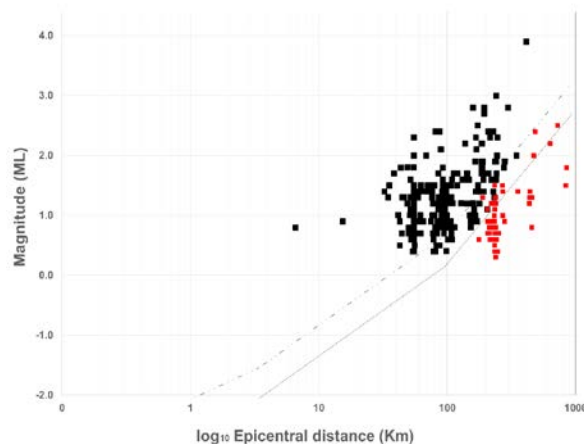


Abb. 1: Übersicht über die Magnituden-Distanz-Beziehung der detektierten Ereignisse im Vergleich zu Bulletin-Daten der verschiedenen Erdbebendienste. In schwarz: Ereignisse, die detektiert werden konnten. In rot: Ereignisse, die nicht mehr aufgelöst werden konnten. Die zwei Linienzüge zeigen eine obere und untere (bestmögliche) Detektionsgrenze an.

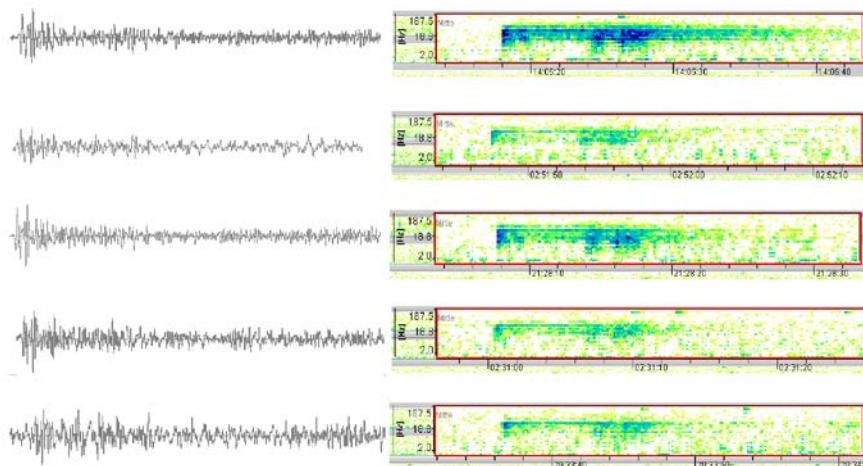


Abb. 2: Ergebnisse einer Korrelationsanalyse: Das ganz oben als Seismo- und Sonogramm dargestellte Erdbeben diente als Ausgangspunkt für die Korrelation und ist auch im LED-Bulletin zu finden ($ML=0,7$; bei Freiburg, Entfernung ca. 50 km; 17.8.2015, 14:05 UTC). Alle anderen Erdbeben sind nicht im Bulletin verzeichnet. Alle datieren von August 2015.

Um Aufschluss über die genauen Detektionseigenschaften zu erhalten, wurden in einem ersten Schritt von vier ausgewählten Erdbeben im Bereich des Schwarzwaldes „templates“ erstellt und mittels der institutseigenen Software Jsonodet auf den gesamten Datensatz in einer Korrelationsanalyse angewandt. Hierbei konnten anhand dieser vier Erdbeben (Epizentren bei Tübingen, Albstadt, Freiburg und Baden-Baden; jeweils mit Lokalmagnituden von 0,7 - 1,5) weitere 17 Kleinbeben in Clustern gefunden werden, die in ihrer Stärke (bis $ML = -0,2$) unterhalb der Detektionsgrenzen des regionalen Netzes liegen. Abb. 2 zeigt beispielhaft die Ergebnisse für ein Erdbeben bei Freiburg. Es ist geplant, dieses vielversprechende Vorgehen auch auf schwächere Ereignisse in anderen Bereichen des Schwarzwaldes anzuwenden. In einem weiteren Fall wurde ein Kleinbeben bei Alpirsbach vom 13. September ($ML =$

0,8) in einer Entfernung von nur 7 km vom BFO herangezogen. Es konnten bei den bisher aufgezeichneten Daten bislang jedoch keine zugehörigen Ereignisse korreliert werden. In dieser Entfernung wäre es prinzipiell möglich, kleinere Erdbeben bis hinab zu einer Lokalmagnitude von rund -1,5 zu detektieren.

Die weitere, tiefere Auswertung der Daten erfolgt derzeit in der Art, dass die Wellenformdaten manuell nach Mikrobenen durchsucht werden, die in einen Distanzbereich unter 20 km fallen. Dieses Verfahren ist zeitintensiv, hat sich jedoch in allen vorhergegangenen Messkampagnen des Instituts bewährt. Bislang konnten rund 4 Wochen an Daten begutachtet werden. Es zeichnet sich ab, dass die mikroseismische Aktivität im zentralen Schwarzwaldgebiet bei Schiltach als gering anzusehen ist. Diese Beobachtung für die Mikroseismizität (hier: $ML < 0,0$) deckt sich mit den langjährigen Aufzeichnungen des LED für Kleinbeben oberhalb $ML 0,5$.

AP2 : Chemische Effekte der hydraulischen Stimulation, chemische Stimulation

- Projektleiter: Prof. Dr. K. Bucher (Mineralogie, Petrologie, Geochemie Universität Freiburg), R. Schmidt und I. Stober (Institut für angewandte Geowissenschaften, KIT).
- Forschungsvorhaben: L75 14003

Kurzbeschreibung dieses Teil-Projekts

Bei der hydraulischen Stimulation von Wärmetauscher-Gesteinen werden die Aperturen der Klüfte zum Teil irreversibel erweitert und damit die hydraulische Leitfähigkeit (Permeabilität) verbessert. Chemisch wird die Erhöhung der Leitfähigkeit unterstützt durch die Lösung von instabilen Mineralen auf den Klüftflächen durch das heiße, reaktive, in der Regel hochsaline Fluid. Zusätzliche Permeabilitätsgewinne können durch chemische Stimulation erreicht werden.

Die Erhöhung der Permeabilität durch die Lösung von instabilen Mineralen auf den Klüftflächen kann jedoch ein vorübergehender Nutzen sein, welcher im weiteren Reaktionsverlauf durch die Ausfällung von Sekundärmineralen auf den Klüften vernichtet werden kann. Der zeitliche Verlauf der Permeabilitätsentwicklung einer einzelnen Kluft ist auf der Abb. 3 dargestellt (aus Stober und Bucher 2015). Im weiteren Verlauf der Reaktionen können die Klüfte vollständig verschließen und für Fluide undurchlässig werden. Beispiele solcher versiegelter Klüfte sind auf der Abb. 4 dargestellt. In Teilprojekt AP2 studieren wir die Effekte der chemischen Reaktion von 200 – 260°C heißen Tiefenfluiden mit den Mineralen von verschiedenen potentiellen Reservoir-Gesteinen mithilfe von Experimenten in Autoklaven. Dazu stehen in Freiburg (Mineralogie-Petrologie-Geochemie) zwei großvolumige Autoklaven (Büchi Limbo) zur Verfügung. Diese Geräte wurden mit Fördermitteln dieses Verbundvorhabens beschafft. Die Experimente helfen, die chemischen Prozesse an den Klüftflächen besser zu verstehen und diese gegebenenfalls zu steuern, um Permeabilitätsverluste zu vermeiden. Die experimentellen Arbeiten an der Universität Freiburg werden gemeinsam mit Roman Schmidt und Prof. Dr. Ingrid Stober (beide KIT) durchgeführt.

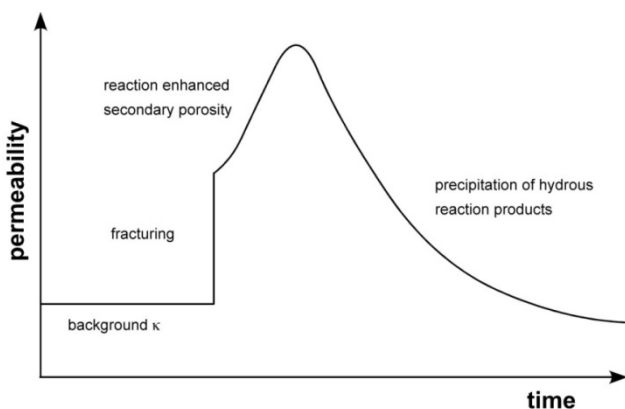


Abb. 3: Permeabilitätsentwicklung einer Kluft in einem chemisch reaktiven Umfeld.



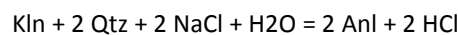
Abb. 4: Umwandlung von Primärgestein (grün) in hydrothermal alteriertes Gestein (braun) durch Reaktion mit heißem Wasser entlang von natürlichen Klüften. Die Klüfte wurden später durch ausgefällte Sekundärminerale verschlossen.

(hier Karbonat) versiegelt. Vannøya, Nord-Norwegen.

Projektstand

Es wurden 12 Experimente von insgesamt 450 Tagen Dauer durchgeführt. Jedes der Experimente dauerte 14 bis 55 Tage, im Mittel waren es 41 Tage. Die Experimente der Fluid-Gestein Reaktion liefen bei 200 und bei 260°C mit NaCl Lösungen (etwa 100 g/l). Die untersuchten Gesteine umfassten Granit (5 Experimente), zwei verschiedene Sandsteine mit unterschiedlichem Zementationsmaterial (4 Exp.) und Kalksteine (2 Exp.). Von allen diesen Experimenten liegen die chemischen Analysen der Fluide nach der Reaktionszeit von durchschnittlich 41 Tagen vor. Umfangreiche Arbeiten am REM in Karlsruhe dokumentieren die Effekte der Reaktionen an den Klüftflächen. Besonders interessant ist die Neubildung von Albit und Analcim. Ein Beispiel von neu gewachsenem Analcim zeigt Abb. 5.

Die Daten und Beobachtungen müssen nun zusammengefasst, modelliert und interpretiert werden. Die Analcim-Bildung, beispielsweise, ist im experimentellen Temperaturbereich nur in Quarz-untersättigten Fluiden möglich (Abb. 6). Die Sättigungszustände der Reaktionsfluide sind noch nicht modelliert. Die Modellreaktion für die Analcim-Bildung auf Sandstein Klüften mit Kaolin-Zement kann wie folgt geschrieben werden:



Die Reaktion ist mit einer Volumenzunahme der Feststoffe um 34% und einer Abnahme des pH verbunden. Je nach Geschwindigkeit, mit der die Reaktion abläuft, kann die Analcim-Bildung zu einer erheblichen Permeabilitätsminderung im Reservoir innerhalb des Betriebszeitraums eines Geothermiekraftwerks führen. In Graniten ist vor allem die Umwandlung der primären Glimmer wichtig.

Ein Experiment ist derzeit noch am Laufen. Ergänzende Experimente von kürzerer Laufzeit können für eine schlüssige Modellierung noch notwendig werden.

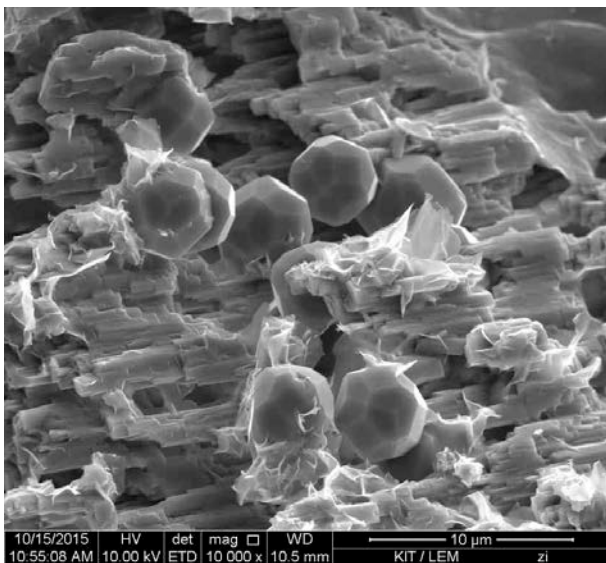


Abb. 5: Neu gebildeter Analcim auf Sandsteinkluft.

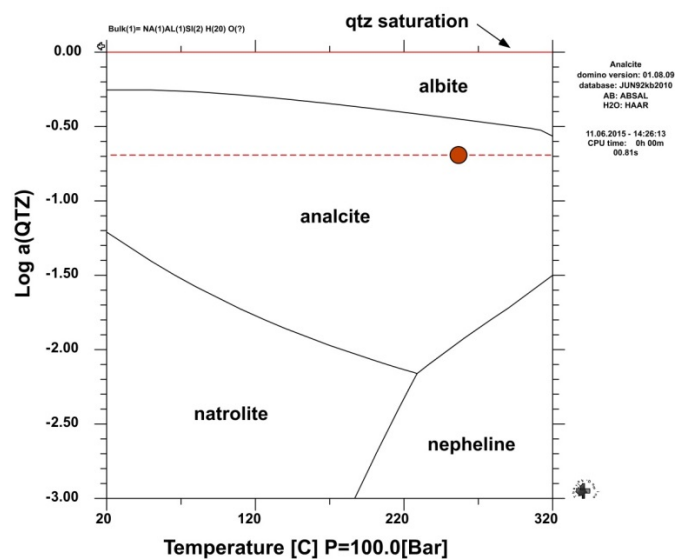


Abb. 6: Geochemisches Modell für die Gleichgewichtsbedingungen der Na-Mineralen als Funktion der Temperatur und des SiO₂ im hydrothermalen Fluids.

Publikationen

- Stober, Ingrid and Bucher, Kurt 2015. Hydraulic conductivity of fractured upper crust: insights from hydraulic tests in boreholes and fluid-rock interaction in crystalline basement rocks. *Geofluids*, 15, 161-178 (doi: 10.1111/gfl.12104).

AP3: In situ Messung induzierter Deformationen

- Bearbeiter: Prof. F. Schilling, Dr. B. Müller, Dr. Ch. Scheffzük, Landesforschungszentrum Geothermie, Karlsruher Institut für Technologie
- Forschungsvorhaben: L75 14001

Kurzbeschreibung dieses Teil-Projekts

Die Erfassung des Spannungs- und Deformationsfelds während induzierter Bruchvorgänge ist das Ziel dieses Teilvorhabens. Damit sollen die Prozesse der Spannungsumlagerung während der Bruchvorgänge und insbesondere deren Skalenabhängigkeit untersucht werden. Die innerhalb des Vorhabens durchgeführten Messungen sollen als Basis für nachfolgende *in situ* Labor-Untersuchungen von Fracturing-Operationen z.B. in Äspoe (Schweden) oder GeoLaB dienen.

Methodik

Mittels Neutronenbeugung soll unter Nutzung des Bragg'schen Gesetzes die intrakristalline Deformation von Gesteinen untersucht werden. Aufgrund der geringen Absorption von Neutronen in polykristallinen Gesteinen kann intrakristalliner Strain über die Bestimmung der Bragg-Peak-Lagen und der Peak-Halbwertsbreite (FWHM) am Strain-Diffraktometer EPSILON erfasst werden.

Das Strain-Diffraktometer EPSILON nutzt die gepulste Neutronenquelle des Forschungsreaktores IBR-2M am JINR Dubna (Russland) mit der Neutronen-Flugzeit-Methode. Mit diesem Gerät können unter definierten Lastzuständen sowohl Residualspannungen als auch das *in situ*-Gesamtspannungsfeld sowie die durch Mikrobrüche induzierten akustischen Emissionen orts- und zeitaufgelöst erfasst werden.

Das Instrumentarium in Dubna ist unter „EPSILON“ auf der group-ware Seite des LFZG beschrieben.

Arbeitsprogramm

Das Messkonzept zur Quantifizierung des Spannungs- und Deformationsfelds unmittelbar vor Bruchvorgängen und der Prozesse der Spannungsumlagerung während der Bruchvorgänge erfordert eine spezielle Messgeometrie, bei der unterschiedliche Positionen in der Probe mit unterschiedlichen Abständen zur späteren Bruchfläche während des Bruchvorgangs beprobt werden (Abb. 7).

Gewählt wurde ein Sandstein aus Lahr, der typisch für viele Reservoirsandsteine ist. Seine Eigenschaften, die die Auswahl begründen, können in Kürze wie folgt beschrieben werden. Es handelt sich um eine Probe eines triassischen Bausandstein aus homogenen, gut sortierten und gerundeten mittel- bis grobkörnigem Quarz-Sandkörnern. Er ist rötlich gefärbt aufgrund seiner eisenhaltigen Zementation. Er weist eine schwache Schichtung auf. Nach Hirsch (2008) besteht er zu ca. 90% aus mono- und polykristallinen Quarzkörnern und sollte sich daher gut für die Messungen am Diffraktometer EPSILON eignen.

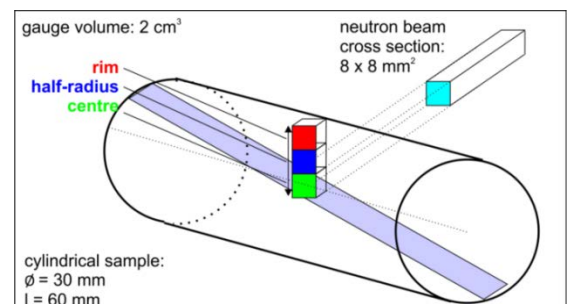


Abb. 7: In unterschiedlichen Abständen zur späteren Bruchfläche (hellblau) werden die Deformationen in würfelförmigen Volumina (hellgrün, gelb, rot) gemessen.

Ergebnisse

Die Untersuchungen benötigten mehrere Messzyklen. Das Arbeitsprogramm umfasste damit folgende Schritte:

1. Bestimmung des Bruchwinkels an der Probe SK1 bei uniaxialer Belastung. Diese Untersuchung wurde im Frühjahr 2015 durchgeführt. Der Bruchwinkel lag bei 18.7-24.8° bezogen auf die Lastrichtung. Der Bruch erfolgte bei einer einaxialen Last von 37.43 kN, was einer Spannung von 67 MPa entspricht (Abb. 8)
2. *In situ*-Bestimmung der intrakristallinen Deformationen einer monomineralischen Gesteinsprobe (SKL-6) bei verschiedenen definierten Laststufen: $p = 16.6$ MPa, 33.2 MPa, and 50 MPa, also noch deutlich unter der Last, die zum Bruch führt. Die Messungen wurden jeweils an 3 Positionen im Bohrkern durchgeführt. Dies erforderte insgesamt eine Messzeit von 6 Tagen am EPSILON Diffraktometer (Abb. 9).
3. Auswertung des Diffraktionspatterns mit der Bragg peak strain Analyse.

Die Messungen wurden mit der Bragg Peak Strain-Analyse analog zu (Scheffzük *et al.* 2007) ausgewertet. Abb. 10 zeigt das Time-of-Flight (TOF) Diffraktogramm der Messung an der Probe SKL 6 für die innerste Position (CENTRE) im

lastfreien Zustand für 2 senkrecht aufeinander stehende Richtungen: die Zylinderachse [z] und Richtung [x]. Die Veränderung der Peak-Positionen bei Laständerung ist ein Maß für die Deformation des Probenvolumens.

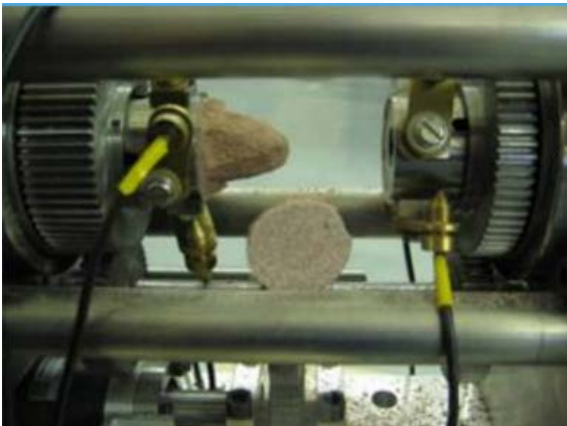


Abb. 8: Vorexperiment zur Bestimmung der Bruchfläche des Sandsteins aus Lahr (Proble SK-1).

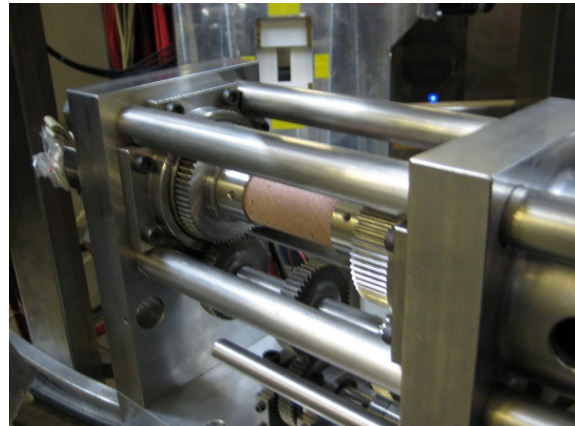


Abb. 9: Sandsteinprobe SKL-6. Messung des Strains parallel und senkrecht zur Belastungsrichtung an 3 unterschiedlichen Probenloktionen (Oktober 2015).

Die intrakristallinen Strains werden für verschiedene Diffraktionspeaks bestimmt, deren hkl Flächen senkrecht bzw. parallel zur Belastung ausgerichtet sind. Das erste Zwischenergebnis liegt für den Bragg-Peak $(10-11)/(01-11)$ (channel index ca 3990) vor. Abb. 11 (links) zeigt die Deformation parallel zur Lastrichtung, wohingegen Abb. 11 (rechts) die Deformation senkrecht dazu zeigt.

Für eine einheitlich belastete homogene zylindrische Probe wird eine homogene Spannung in axialer Richtung von $\varepsilon_{zz} = \sigma_{zz}/E$ erwartet. Senkrecht dazu sollte die Deformation $\varepsilon_{xx} = -\nu\varepsilon_{zz}$ betragen. Dieser Zusammenhang wird zumindest für die geringen Spannungszustände, bei denen noch keine Bruchbildung stattfinden sollte, erwartet. Bei einer homogenen Probe (wie sie für geringe Belastungszustände erwartet wird) sollte darüber hinaus die axiale Deformation über den Querschnitt gleich groß sein.

Tatsächlich zeigt diese erste Auswertung eines einzelnen Peaks ein paar Besonderheiten. Für die drei Positionen (rim, half-radius, centre) wurden jeweils die Deformationen in unterschiedliche Richtungen gemessen. In Lastrichtung (axiale Belastung) ergibt sich die erwartete Verkürzung der Probe. Allerdings schon bei den geringen Belastungen (<10 MPa) zeigen sich schon deutliche Unterschiede an den drei Positionen (rim, half-radius, centre) für die Deformation parallel zur Lastrichtung: während die Deformation am Rand und in der Mitte sehr ähnlich sind, fällt auf, dass die Deformation auf der Probenhälfte fast vernachlässigbar ist. Bei der Querdehnung sollten sich für eine homogene Probe (bei kleiner Last) positive Werte ergeben, die eine Dehnung der Probe senkrecht zur Lastrichtung anzeigen. Diese positiven Werte werden aber nur bei dem Volumen auf der *half-radius*-Position erreicht, die Querdehnung am Rand und in der Mitte deutet eine Verkürzung an (Abb. 11 rechts) und dies bereits bei sehr geringen Lastwerten.

Dieses sind Ergebnisse der ersten Auswertephase für einen Teil der Daten. Im Weiteren wird geprüft werden, welchen Einfluss die gravitative Durchbiegung der Probe haben könnte und geprüft, ob sich dieses Verhalten an allen Bragg-Peaks ergibt oder ob es sich beim gewählten Peak um eine Ausnahme handelt.

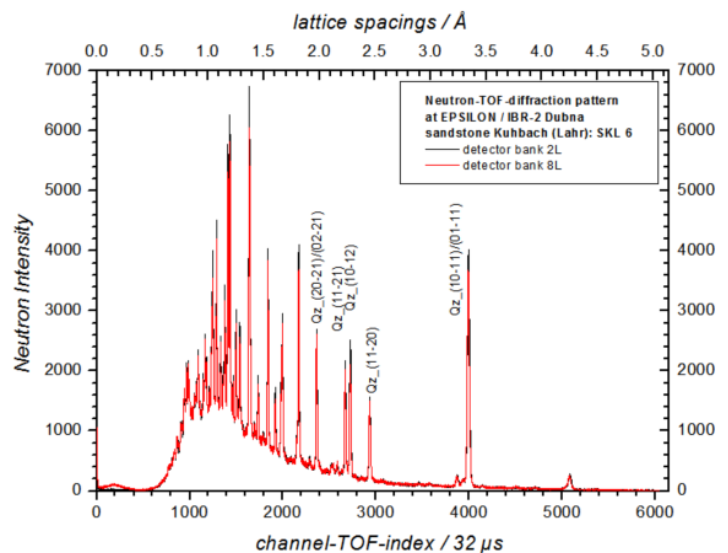


Abb. 10: Neutronen-Flugzeit-Diffraktogramme der Sandstein-Probe Kuhbach/Lahr: SKL_6, aufgezeichnet am Strain-Diffraktometer EPSILON bis $d = 5.1 \text{ \AA}$.

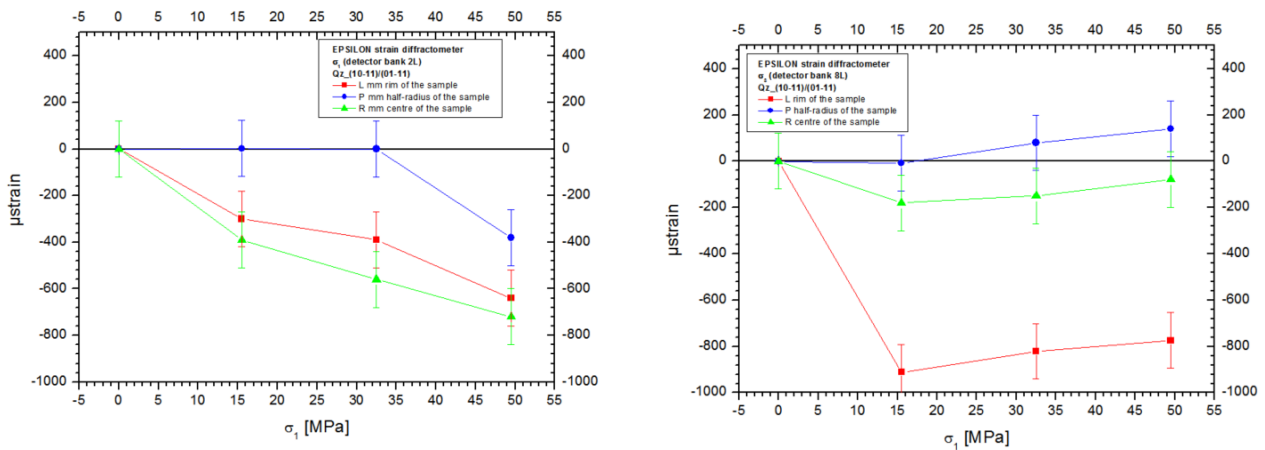


Abb. 11: Bestimmung des intrakristallinen Strains mittels eines Strain-scans an 3 Positionen (Rand, Mitte, Zentrum) bei uniaxialer Last ($\sigma_1 = 15.5 \text{ MPa}$, 32.5 MPa , 49.5 MPa), bestimmt am Bragg-Beugungs-Peak (01-11)/(10-11); links: σ_1 – Richtung, rechts: Querrichtung σ_3 .

AP4: Standortfaktoren GeoLaB mit Aufbau einer GIS basierten Datenbank

- Bearbeiter: Prof. T. Kohl, M. Grimm, Karlsruher Institut für Technologie
- Forschungsvorhaben: L75 14001

Grundlagen dieses Teil-Projekts

Das Arbeitspaket 4 soll zur Vorerkundung eines möglichen Standortes für das GeoLaB dienen. Wobei es zu Anfang zwei unterschiedliche Ansätze für den Bau eines solchen Untertagelabors zu betrachten gilt. Auf der einen Seite kann ein bereits existierender Hohlraum, mit eventuell bestehender Infrastruktur weiter ausgebaut werden oder auf der anderen Seite ein kompletter Neubau erfolgen.

Projektstand

Im letzten Zwischenbericht konnten wir eine grobe Zusammenfassung mit mehreren hundert Altbergbaustandorten im Schwarzwald zeigen. Anhand von Kriterien wie, Zugänglichkeit, Größe, maximale Überdeckung und vorhandenem Gestein konnte die Liste potenzieller Altbergbaustandorte auf 14 Einträge reduziert werden (Abb. 12). Hinzu kommen noch weitere Auswahlkriterien, für die nur teilweise Informationen zur Verfügung stehen (Tab. 1). Das regionale Spannungsfeld im Schwarzwald, speziell im Südschwarzwald ist generell passend für die geplanten Versuche im Untertagelabor. Kontrollierbare hydraulische Randbedingungen ist eines der Schlüsselkriterien. Existierenden Stollensystemen, nahe gelegenen Stollen oder unbekannte Altbergbaustandorte können das hydraulische Umfeld während der Versuche stark stören.

Um dies zu verhindern, wurde der Fokus auf gut dokumentierte Explorationsstollen, die vorzugsweise keinen weiteren Bergbau nach sich zogen, gelegt. Der Wilhelminenstollen bei Badenweiler ist einer dieser Explorationsstollen, der außerdem noch einige weitere Auswahlkriterien erfüllt. Gestützt auf dem Gedanken, das GeoLaB aus einem bereits

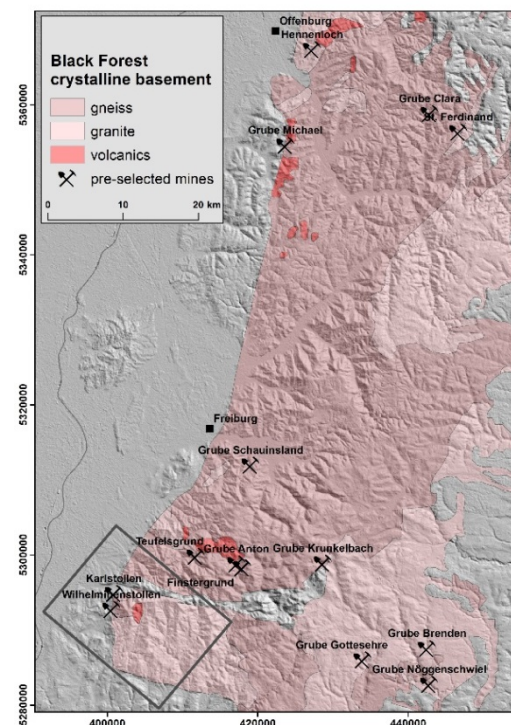


Abb. 12: Lithologische und geologische Einheiten des Mittl- und Südschwarzwalds mit ausgewählten Altbergbaustandorten. Das graue Rechteck zeigt das Modellgebiet für die Abb. 13. (Schill et al. In prep.)

existierenden Tunnel heraus zu erstellen haben wir den Wilhelminenstollen als generischen Standort ausgewählt, um die benötigten Vorerkundungen für ein Untertagelabor im kristallinen Grundgestein zu testen.

Tab. 1: Auszug aus der Kriterientabelle für Altbergbaustandorte im kristallinen Grundgebirge. (nach Schill et al. In prep.)

			fractured and rather homogenous crystalline matrix	sufficient fracture transmissivity (estimated from fracture condition)	controllable hydraulic boundary condition	comparable alteration (clay minerals)	suitable stress condition	sufficient overburden >300 m
Hennenloch	Ohlsbach	n/a	granite	n/a	n/a		YES	NO
Grube Clara	Oberwolfach	YES (active mine)	gneiss	YES	NO			YES
St. Ferdinand	Tiefenbach	n/a	granite	possible	YES			n/a
Grube Michael	Lahr	NO	gneiss	YES	n/a			NO
Grube Schauinsland	Hofgrund	YES	gneiss	NO	NO			YES
Teufelsgrund	Untermünstertal	YES	gneiss	n/a	NO			NO
Finstergrund	Wieden	YES	gneiss	n/a	NO			NO
Wilhelminenstollen	Sehringen	YES	granite	YES	YES			NO
Grube Anton	Wieden	NO	gneiss	n/a	n/a			NO
Grube Gottesehre	Urberg	NO	granite	n/a	n/a			NO
Karlstollen	Badenweiler	YES (partly unstable)	granite	YES	n/a			n/a
Grube Krunkelbach	Menzenschwand	NO	granite	n/a	NO			YES
Grube Nöggenschwiel	Witznau	n/a	granite	n/a	YES			NO
Grube Brenden	Mettmatal	YES	granite	n/a	n/a			NO

Um einen Überblick des Einflusses der Topografie auf das Spannungsfeld im Wilhelminenstollen zu bekommen, wurde ein einfaches dreidimensionales Spannungsmodell im Bereich des Blauen erstellt. Die Spannungen im Modell werden durch die Gravitation und das Einspannen der Seiten und des Bodens hervorgerufen. Es wurden noch keine Störungen oder tektonischen Spannungen berücksichtigt. Die für die Simulation verwendeten Gesteinsparameter sind: E-modul=2e7 Pa, Poisson-Zahl=0.25 und Dichte=2700 kg/m³. Das Modellgebiet ist in Abb. 12 als graues Rechteck dargestellt.

Abb. 13 und Abb. 14 zeigen die Orientierung und die Magnitude der maximalen Hauptspannung. Nahe der Oberfläche werden die Orientierung und auch die Magnitude sehr stark von der vorherrschenden Topografie beeinflusst. An steilen Hängen ist die maximale Hauptspannung nahezu horizontal in den ersten 100 – 200 m Tiefe. Eine horizontale Orientierung ist schon in geringen Tiefen unter Gipfeln oder Plateaus und in größeren Tiefen unter größeren Topografiegradienten zu sehen. Der Eingang des Wilhelminenstollens liegt am Fuße des Blauen. Mit einer Länge von ca. 500 m liegt der Stollen komplett in der untiefen Zone mit großen Orientierungs- und Magnitudenschwankungen. Wenn für den Spannungsgradienten ein Kriterium < 1 MPa über die Tunnellänge gelten und die Orientierung der maximalen Hauptspannung vertikal sein soll, müsste für den Standort des Wilhelminenstollens eine Stollenlänge > 1,5 km eingeplant werden. Dies resultiert dann in einer Überdeckung von mindestens 500 m.

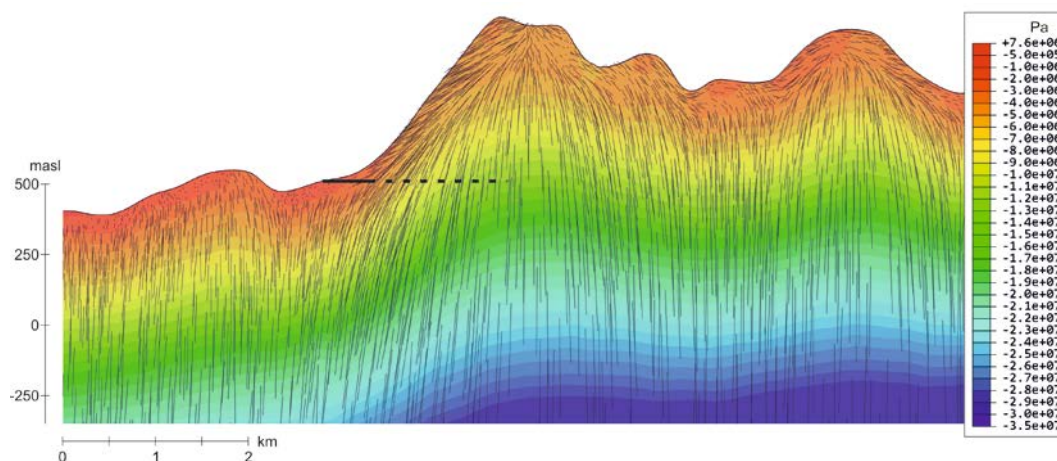


Abb. 13: Orientierung und Magnitude der maximalen Hauptspannung. Positive/negative Magnituden: Zug-/Druckspannung. Schwarze Linie: heutiger Wilhelminenstollen, gestrichelte Linie: Mögliche Erweiterung des Stollens auf 2 km Länge. (Schill et al. In prep.)

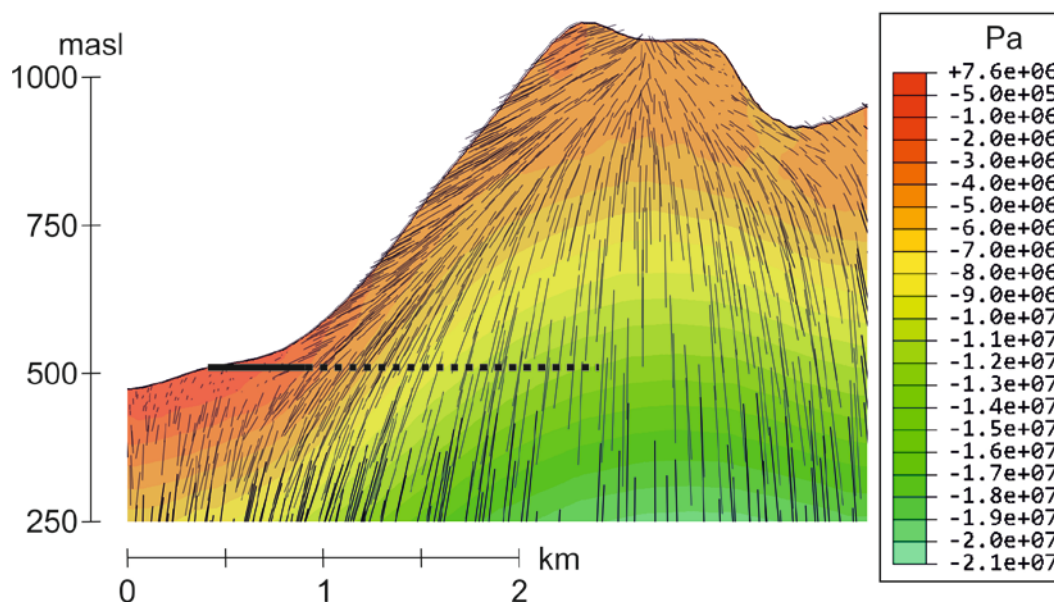


Abb. 14: Vergrößerter Ausschnitt aus Abb. 13. Orientierung und Magnitude der maximalen Hauptspannung. Positive/negative Magnituden: Zug-/Druckspannung. Schwarze Linie: heutiger Wilhelmstollen, gestrichelte Linie: Mögliche Erweiterung des Stollens auf 2 km Länge.

AP5: Passives Seismisches Monitoring über die Polarisation der seismischen Wellen

- Bearbeiter: Dr. E. Gaucher, Prof. T. Kohl, Karlsruher Institut für Technologie
- Forschungsvorhaben: L75 14001

Grundlagen dieses Teil-Projekts

Ziel dieses Teil-Projekts ist es, neue Lokalisierungsmethoden für Erdbeben zu entwickeln. Neben der üblicherweise verwendeten Information der Einsätze der Erdbebenwellen soll in der neuen Methode auch die Polarisationsinformation verwendet werden, um das inverse Problem zu lösen. Dadurch wird es möglich, die Lokalisierung des Erdbebens auch bei einer geringen Zahl von Registrierungen zu verbessern.

Projektstand

Das Modul 1 „Aufsetzung eines Bayesschen Formalismus zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsdichte für die Lokalisierung von Erdbeben aus der Nutzung von Polarisationsbeobachtungen“ und das Modul 2 „Synthetischer Test um der in Modul 1 erarbeiteten Prozedur anzuwenden“ wurden abgeschlossen. Das Modul 3 „Anwendung des neuen Verfahrens auf einige Erdbeben die während der ersten Stimulation des Rittershoffen Geothermiefelds (Elsass) induziert wurden“ ist nahe zu abgeschlossen.

Theoretische Untersuchungen und synthetische Tests

Um das inverse Problem der Lokalisierung von Erdbebenherden zu lösen wird ein grid-search Ansatz verwendet. Damit und unter Nutzung eines Bayesian Formalismus, werden die Funktionen zum Vergleich der beobachteten P-Polarisationen mit ihren modellierten Werten definiert. Die Abweichung der modellierten von den beobachteten Daten mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate erfasst. Daraus ergeben sich die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für die Erdbebenherde in der Region, wobei das Maximum bei der Lokation mit der geringsten Abweichung von modellierten und beobachteten Daten liegt.

Mit diesem Bayesian Formalismus wurde eine Wahrscheinlichkeitsdichte (PDF) der Polarisation der P-Wellen entwickelt. Bei Nutzung der Richtungs Statistik konnten wir die folgende Gleichung entdecken :

$$PDF_{C_{\text{obs}}} = \frac{\Gamma\left(\frac{3}{2}\right)}{\sqrt{(2\pi)^3 |C_{\text{obs}}|}} (\mathbf{P}_{\text{cal}}^t C_{\text{obs}}^{-1} \mathbf{P}_{\text{cal}})^{-\frac{3}{2}}$$

mit C_{obs} die Kovarianz-Matrix der P-Welle, Γ die Gamma Funktion und \mathbf{P}_{cal} der theoretische Vektor der im prinzip parallel zu dem seismischen Strahl der P-Welle verläuft.

Diese einfache Formel betont, dass für die Berechnung der Wahrscheinlichkeitsdichte nur die beobachtet Kovarianz-Matrix der P-Welle benötigt wird. Ein Vorteil der Formel ist, dass sie die 3D Messung und 3D Unsicherheiten aus der Kovarianz-Matrix korrekt nutzt, im Gegensatz zu bestehenden Methoden die nur Azimut und Neigung der ankommende Hauptrichtung berücksichtigen. Zum Beispiel, zeigt Abb. 15 die Unterschiede zwischen der neu-entwickelten Berechnungsmethode und der bestehende Methode von der Wahrscheinlichkeit der Lokalisierung nur mittels P-Polarisation von einer seismischen Station, wobei $\pm 10^\circ$ Azimut und $\pm 90^\circ$ Neigung Unsicherheiten zu P-Polarisation gehören. Bei diesem Beispiel wurden P- und S-Geschwindigkeitsmodelle mit drei Schichten genutzt. Dabei decken die 2- und 3- σ Isoflächen den 3D-Raum wie erwartet vollständig ab. Jedoch mit dem bestehenden Verfahren wurden falsche bzw. zu optimistische Lokations-Unsicherheiten erhalten. Mit dem neuen Verfahren und mittels P-Polarisationen von 5 Bohrloch-Stationen, wobei $\pm 10^\circ$ Azimut und $\pm 10^\circ$ Neigung Unsicherheiten zu P-Polarisation gehören, umfasst die 1- σ Isofläche einen kleineren 3D-Raum als das bestehende Verfahren und erhöht somit die Genauigkeit der Lokalisierung.

Die neue Wahrscheinlichkeitsdichte ist richtig gewichtet daher ist eine direkte Verbindung mit der der Laufzeit möglich. Beide Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen können multipliziert werden, um die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und eine bessere Lokalisierung zu erhalten. Die Anwendung dieses neue Verfahren wird derzeit auf ein paar induzierte Erdbeben im Rahmen der ersten Stimulation des Rittershoffen Geothermiefelds (Elsass) fertiggestellt. Darüber hinaus ist eine Veröffentlichung in Arbeit, der in einem wissenschaftlichen Peer-Reviewed Zeitschrift eingereicht wird.

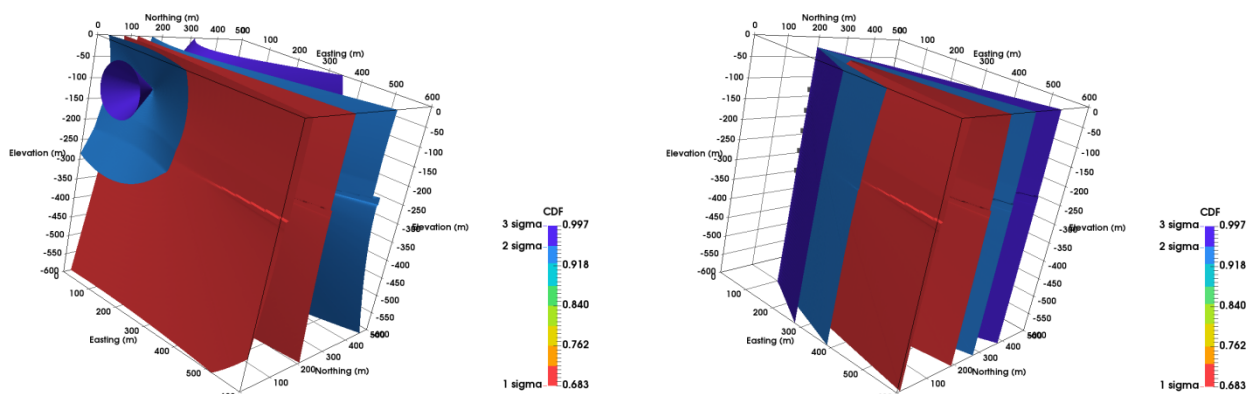


Abb. 15: Isoflächen der 68.3% (rot), 95.5% (blau) und 99.7% (violett) Wahrscheinlichkeit der Lokalisierung mittels P-Polarisation unter Verwendung einer einzelnen seismische Station, wobei $\pm 10^\circ$ Azimut und $\pm 90^\circ$ Neigung Unsicherheiten zu P-Polarisation gehören. Links: unter Verwendung des im Rahmen des Projekts entwickelten Formalismus, rechts: bestehender Formalismus.

Veröffentlichungen

Poster: E. Gaucher, A. Gesret, M. Noble, T. Kohl (2015). A new Bayesian formulation to locate earthquakes from P-wave polarization, in *FKPE – AG Induzierte Seismizität Workshop*, 25-26 Nov., Hannover.

AP6: Computergestützte Kooperations- und Projektbegleitung zur Unterstützung des Forschungs-Managements zur Effizienzsteigerung und Kompetenzbündelung in der Geothermie-Forschung

- Bearbeiter: Prof. D. Doherr, Hochschule Offenburg
- Forschungsvorhaben: L75 14004

Projektbearbeitung

Die Hochschule Offenburg bearbeitet im Gesamtprojekt „Kombinierte Voruntersuchungen für Tiefengeothermie-Labor“ das Arbeitspaket „Computergestützte Kooperations- und Projektbegleitung“, um das digitale Projektmanagement mit einem professionellen Softwareprodukt auf Serverbasis zu unterstützen. Dazu wurde das Gesamtprojekt inklusive der verschiedenen Arbeitspakete implementiert und in untereinander abhängige Aufgabenbereiche strukturiert. Dabei wurden alle projektbezogenen Daten und Aufgaben der einzelnen Arbeitspakete aus dem Projektantrag im System hinterlegt. Jeder Benutzer verfügt nun über projektspezifische Zugriffsrechte und trifft nach der Anmeldung auf eine individuell angepasste Benutzeroberfläche. Ergänzend wurde vor der Inbetriebnahme und Freigabe an die Benutzer eine auf das Projekt bezogene Bedienungsanleitung erstellt und die Benutzer in der Anwendung unterstützt.

Die ausgewählte Groupware-Lösung – eGroupware der Firma Stylite AG – ist eine Client-Server-Anwendung und auf einer eigens dafür eingerichteten Web-Plattform auf einem LINUX-Server der Hochschule Offenburg implementiert. Der Webzugriff erfolgt über eine verschlüsselte Datenverbindung und ist über die Internet-Adresse: <https://bwplus.hs-offenburg.de> erreichbar.

Ergebnisse

Das Projektmanagement wird durch die Plattform unterstützt und die Benutzer setzen den Server u.a. für die Projektdokumentation ein.

Die Applikation InfoLog illustriert alle projektbezogenen Aufgaben und kann auf verschiedene Weisen genutzt werden:

- für Projektpartner als Task-Liste,
- für Koordinatoren zur Verfolgung oder Übersicht termingerechter Einhaltung der Arbeitsaufgaben,
- für alle Projektpartner zur gegenseitigen Information und Darstellung des Projektfortschritts.

Aufgrund der implementierten Projektstrukturen im System sind diese Teilaufgaben und der Projektfortschritt in einem automatisch generierten Gant Chart dargestellt (Abb. 16).

Durch die intern zur Verfügung gestellte Bedienungsanleitung und die projektbegleitenden Schulungen der einzelnen Projektpartner wurde die Nutzung der Groupware für die einzelnen Projektpartner ermöglicht und mittels eines Supports durch die Hochschule Offenburg unterstützt. Im Hinblick auf Daten und Kooperationen zu wissenschaftlicher Forschung konnte eine qualitative Verbesserung erzielt werden. Dies bezieht sich in der Endphase des Gesamtprojektes vorzugsweise auf die Erstellung der Berichte und Abschluss-Dokumentationen.

The screenshot shows the 'InfoLog - verantwortlich' window. It displays a list of tasks with columns for Typ, Status, Erledigt, Titel, Beschreibung, Priorität, Erstellungsdatum, Startdatum, Fällig am, Erledigt am, Besitzer, verantwortlich, and letzte Änderung. The tasks listed are:

Typ	Status	Erledigt	Titel	Beschreibung	Priorität	Erstellungsdatum	Startdatum	Fällig am	Erledigt am	Besitzer	verantwortlich	letzte Änderung
Info	Open	Open	Doherr, Detlev Projektbegleitung	P-2014-1-6: Computergestützte Kooperations- und Projektbegleitung (HS Offenburg)	#	01.08.2014	01.08.2014	31.12.2014		Benutzer, admin	Benutzer, admin	10.10.2014 16:09
Info	Open	Open	Doherr, Detlev Partner-Schulungen	Einführung in die Nutzung von Groupware anhand von Projekt szenarien P-2014-1-6: Computergestützte Kooperations- und Projektbegleitung (HS Offenburg)	#	01.07.2014	01.07.2014	31.10.2014		Benutzer, admin	Benutzer, admin	10.10.2014 16:09
Info	Open	Open	Doherr, Detlev Inbetriebnahme, Projektdatenerfassung	P-2014-1-6: Computergestützte Kooperations- und Projektbegleitung (HS Offenburg), Projektdaten.pdf	#	01.06.2014	01.06.2014	30.06.2014	14.08.2014 09:56	Benutzer, admin	Benutzer, admin	10.10.2014 16:08
Info	Open	Open	Doherr, Detlev Serverinstallation	https://bwplus.hs-offenburg.de P-2014-1-6: Computergestützte Kooperations- und Projektbegleitung (HS Offenburg)	#	01.06.2014	01.06.2014	31.08.2014	12.08.2014 09:23	Benutzer, admin	Benutzer, admin	10.10.2014 16:08

Abb. 16: InfoLog aus dem eGroupware (hier Teilprojekt AP6: „Computergestützte ... Projektbegleitung“) mit benutzerspezifischer Bedienungs- und Informationsoberfläche, die entsprechend der Aufgaben- definitionen für alle Kooperationspartner unterschiedlich gestaltet ist.

Perspektive

Aufgrund des minimalen Aufwands der Projektpartner zur Nutzung von Groupware fand die Software Akzeptanz in diesem Verbundprojekt. Durch die große Auswahl an Applikationen kann eine weitere Projektunterstützung bei verfügbaren Installationen mit geringem Aufwand erreicht werden und ist daher auch auf eine Vielzahl anderer Projekte anwendbar. Voraussetzung und Grundlage dafür ist ein erfolgreiches Projektmanagement.