

**Karlsruhe Institut für Technologie (KIT)
Institut für Angewandte Geowissenschaften
Abteilung Geothermie**

Verbundvorhaben „StörTief“

**Die Rolle von tiefreichenden Störungszonen
bei der geothermischen Energienutzung
Teilprojekt C Südwestdeutschland**

– Endbericht –

Projektleitung:	Prof. Dr. Ingrid Stober
Zuwendungsgeber:	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) Projektträger Jülich (PtJ-EEN)
Förderkennzeichen:	0325623C
Laufzeit des Vorhabens:	01.06. 2013 – 31.10. 2016
Berichtsdatum:	19.12. 2016
Archivnummer:	

Autoren

Roman Schmidt, Robin Seithel, Ingrid Stober

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)

Abteilung Geothermie

Abschnitt 6.1.1 wurde in Zusammenarbeit mit Agemar, T. (LIAG), Hese, F. (LLUR) und Moeck, I. (LIAG) erstellt.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0325623C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1 Aufgabenstellung	7
2 Voraussetzungen	9
3 Planung und Ablauf	10
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand am Projektbeginn, Datenbestand am Projektende	13
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	15
6 Ergebnis	16
6.1 Charakterisierung von Störungssystemen	16
6.1.1 Kriterienkatalog für die Erfassung tiefreichender Störungen bezüglich ihrer geothermischen Nutzbarkeit in Deutschland	16
6.2 Systematische Erfassung und Erkundung von tiefreichenden Störungen für die geothermische Energienutzung in SW-Deutschland	32
6.2.1 Geologische Untersuchungen, Untersuchungen an Störzonen	32
6.2.2 Geologie/Mineralogie, Laborexperimente Geochemie	44
6.2.3 Geomechanik/Felsmechanik, Versuche an der Triax-Pressen	51
6.2.4 Geomechanische numerische Modellierungen	53
7 Verwertbarkeit	64
8 Fortschritt Anderer	65
9 Publikationen und Vorträge	65
10 Im Endbericht zitierte Literatur	68
Dank	74
Anlagen	74

Zusammenfassung

Bruchhafte Verformungen erzeugen Störungen im tiefen Untergrund, die Fließwege für hydrothermale Fluide schaffen können. Tiefreichende Störungen stellen daher erfolgsversprechende Explorationsziele für die geothermische Energienutzung dar. In Deutschland sind jedoch in den meisten Fällen die hydraulischen Eigenschaften von Störungen gerade aufgrund ihrer Tiefenlage im Vorfeld einer Geothermiebohrung unbekannt. Dennoch besteht die Möglichkeit, anhand der im Projekt *StörTief* erstellten Kriterien das geothermische Potential von Störungen plausibel zu beurteilen. Bisherige Erfahrungen aus geologischen Erkundungsmaßnahmen an Störungen liefern statistisch belegte Zusammenhänge zwischen Störungsgeometrie und Thermalwasservorkommen und deuten darauf hin, dass insbesondere die Zerrüttungszonen an Störungsenden und interferierenden Störungen (z. B. Relais-Rampen, kreuzende Störungen etc.) in Abhängigkeit vom Spannungsfeld untersuchungswürdig sind. Neben Störungsgeometrie und Spannungsfeld wurden weitere Indikatoren für die Abschätzung des geothermischen Potenzials von Störungen betrachtet.

Um deutschlandweit eine Klassifizierung der tiefreichenden Störungen vorzunehmen, wurde im Projekt *StörTief* als Bewertungssystem ein erster Indikatorenkatalog entwickelt. Aussagen über die Reservoirqualität einer Störungszone sind generell nur nach intensiver Exploration möglich. Um das Fündigkeitsrisiko bei Störungszonen als Explorationsziel zu senken, sollten Störungen nach den acht im Indikatorenkatalog angegebenen Kriterien (I) Ausrichtung zum Spannungsfeld, (II) Geometrie, (III) Diagenese, (IV) Thermische Anomalie, (V) Gesteinstyp, (VI) Deformationsverhalten des ungestörten Gesteins, (VII) Alter sowie (VIII) Geochemie klassifiziert werden. Diese Kriterien helfen bei der Einschätzung, ob eine Störungszone eher höffig und daher untersuchungswürdig ist oder ob eine zukünftige geothermische Nutzung eher unwahrscheinlich ist.

Im Rahmen des Projektes erfolgte eine Zusammenstellung, Neuerhebung und Auswertung geologischer, hydraulischer, hydrochemischer, geochemischer und geomechanischer Daten aus der regionalen und überregionalen Literatur zu Beschreibungen von Störungen. Daneben wurden Störungen, die in Schichtenverzeichnissen von Tiefbohrungen beschrieben sind, im Detail analysiert. Entsprechend wurden Tunnel oder Bergbaumaßnahmen und Stollen in Südwestdeutschland, die Gebirgsabschnitte mit intensiver Klüftung bzw. Störungszonen durchfahren haben, untersucht. Besonderes Augenmerk wurde hierbei auf die Kernzone und den sogenannten Damage-Bereich von Störungen gelegt. Im Detail wurde auch untersucht, wo Wasserzutritte im Umfeld von Störungen beobachtet wurden. Es erfolgte zudem eine Identifikation von relevanten Hauptstörungen

im Oberrheingraben in den im Rahmen der Projekte *GeotIS* und *GeoTool* interpretierten seismischen Sektionen. Anhand dieser Sektionen wurden Strukturen mit Hinweisen auf Extensions- bzw. Transtensionsstrukturen identifiziert bzw. überarbeitet.

Diese Arbeiten wurden ergänzt durch Untersuchungen an Störungszonen im Gelände, insbesondere in Bergwerken, und an Bohrkernen. Hierbei wurden zum einen geomechanische sowie geochemisch-mineralogische Eigenschaften entlang von Störungen bestimmt und analysiert. Auch wurden die hydrogeologischen Eigenschaften von ungestörten und gestörten Reservoirgesteinen untersucht.

Mit Hilfe von Laborversuchen in Autoklaven konnte die Entwicklung frischer Bruchflächen hin zu Störungszonen simuliert werden. Dafür wurden Versuche an vier verschiedenen typischen Reservoirgesteinen SW-Deutschlands (Kalkstein, 2 unterschiedliche Sandsteine, Granit) unter Reservoirbedingungen (hohe Temperatur und Salinität) durchgeführt. Als Versuchslösung wurde eine künstliche Lösung verwendet, die der im ORG natürlich vorkommenden Reservoirfluide ähnelt. Es konnten die entscheidenden Mineralreaktionen identifiziert werden, die einen hohen Einfluss auf die Permeabilität frischer Bruchflächen bzw. Störungen haben. Vergleiche mit natürlichen Störungszonen in einem Bergwerk im Schwarzwald wurden den Experiment-Ergebnissen gegenüber gestellt.

Anhand der o. g. Reservoirgesteine wurden geomechanische Versuche mit Triaxpressen durchgeführt, um die Bruchbildung und um die resultierenden geomechanischen Parameter unter verschiedenen Druck- und Temperaturbedingungen, somit in Abhängigkeit von der Tiefenlage des Reservoirgesteins, zu untersuchen. Es zeigte sich, dass die geomechanischen Parameter einer „Tiefenabhängigkeit“ unterworfen sind und von Gestein zu Gestein ein sehr unterschiedliches Verhalten aufweisen. Diese Ergebnisse sind grundsätzlich für geomechanische Modellierungen von großer Bedeutung.

An zwei unterschiedlichen Standorten, im zentralen Bereich des Oberrheingrabens und des Molassebeckens, wurden geomechanische Modellierungen durchgeführt. Am Standort in Neuried (Oberrheingraben) wurde eine Slip- & Dilation Tendency Analyse mit dem Programm 3D-Stress der interpretierten Störungen durchgeführt. Als Vorbereitung wurde das regionale Spannungsfeld in einer Literaturrecherche genauer betrachtet, um hier Geltungsbereiche sowie Spannungsmagnituden für das Untersuchungsgebiet abzuschätzen. Daraus resultierten potentielle Spannungstensoren von einem Strike-Slip über ein Abschiebungsregime. In der 3D-Modellierung konnten schließlich Bereiche identifiziert werden, die unter Berücksichtigung des Spannungsfeldes auf eine erhöhte Durchlässigkeit hindeuten. An dem Standort Sauerlach (Molassebecken) wurden im

ersten Schritt die Spannungsindikatoren genauer untersucht, um das lokale Spannungsfeld im Detail beschreiben zu können. Die Untersuchung deutete auf eine lokale Spannungsrotation in einer der drei Tiefbohrungen. In einem zweiten Schritt wurden die Kluftdatensätze genauer analysiert, um Aussagen über das Kluft gesteuerte Fließregime in den Bohrungen zu machen. Die Ergebnisse zeigten, dass Kluftorientierung, Spannungsregime sowie der Slip & Dilation Tendency Werte einer Korrelation unterliegen.

1 Aufgabenstellung

Die Gesteine des tieferen Untergrundes werden durch tektonische Kräfte deformiert. In der unteren Erdkruste erfolgt diese Deformation zunehmend bruchlos etwa in Form einer Faltung. In der oberen Erdkruste reagieren Gesteine auf die einwirkenden Kräfte jedoch meist bruchhaft. Es entstehen Störungen, entlang derer es zu Verschiebungen bei gleichzeitiger Spannungsentlastung kommt. Diese Störungen können deutlich größere Durchlässigkeiten als das benachbarte Gestein aufweisen. Folglich werden Fluidbewegungen auf diese Störungsbahnen fokussiert. Entlang von Störungsbahnen aufsteigende Fluide sind heißer als das Nebengestein und transportieren Wärme aus größeren Tiefen in höher gelegene Bereiche. Diese Umstände machen Störungen für eine geothermische Nutzung interessant; hierbei sind vor allem die größeren, mindestens 7 km tief reichenden Tiefenstörungen bedeutsam (Jung u. a., 2002; Paschen u. a., 2003).

Störungszonen werden bisher in Deutschland nicht direkt für die Erdwärmegewinnung genutzt. Allerdings wird bei der Erschließung von Heißwasseraquifere, z. B. im Oberrheingraben und im Malm des Süddeutschen Molassebeckens, darauf geachtet, Störungszonen zu durchhörtern, um höhere Fließraten zu erzielen. Als typisches Beispiel sei die Bohrung Unterhaching Gt 2 genannt. Das Strompotenzial der Störungen beträgt nach Jung u. a. (2002) ca. $4,5 \cdot 10^{19}$ J (entspricht 1400 GW a) und ist damit um ein Vielfaches höher als das Strompotenzial der Heißwasser-Aquifere.

Gesamtziel des Verbundvorhabens war es, die tiefreichenden Störungszonen genauer in ihrer Geometrie zu erfassen, ihre thermisch-hydraulischen Eigenschaften zu charakterisieren sowie ihr geothermisches Potenzial neu zu berechnen und zu bewerten. Die Ergebnisse sollten über das Geothermische Informationssystem (*GeotIS*) allgemein zugänglich gemacht werden.

Im Forschungsprojekt des KIT sollten die allgemeinen Annahmen über Störungszonen zunächst näher untersucht werden. Daher war zu Beginn eine umfangreiche zweigleisige Konzeptstudie vorgesehen. Der eine Bereich sollte sich mit grundsätzlichen modellbasierten Ansätzen zur Bildung und Entwicklung von Störungen für unterschiedliche Gesteinstypen und dem Einfluss auf die jeweilige hydraulische Leitfähigkeit befassen. Die Ergebnisse flossen in die Ausarbeitungen des Abschnittes 6.2.1 ein. Mit Hilfe von Laborversuchen in Autoklaven konnte die Entwicklung von Störungszonen in verschiedenen Reservoirgesteinen unter Reservoirbedingungen nachgestellt werden (vgl. hierzu die Ergebnisse von Abschnitt 6.2.2). Der zweite Bereich befasste sich mit den lokalen Verhältnissen in SW-Deutschland mit den dort bekannten tektonischen und hydrogeologischen Bedingungen für Störungszonen, u.a. aus Literaturuntersuchungen (z. B. Thermalwasserquellen, Tunnelvortriebe, Spannungsdaten usw.). Insbesondere sollte hier der Einfluss von

Verwitterungsprozessen und tonhaltigen Kluftfüllungen im Detail aufbereitet und untersucht werden. Die Ergebnisse dieser Auswertungen sind in den Abschnitte 6.1.1 und 6.2.1 enthalten. Zudem wurde eine geologische Untersuchung und Auswertung von in Schichtenverzeichnissen beschriebenen Störungszonen und ihrem Einfluss auf die Durchlässigkeit vorgenommen. Außerdem wurden die in derartigen Bohrungen ermittelten hydrogeologischen Bedingungen mit denjenigen in ungestörten Schichten verglichen. Es wurde eine systematische Erkundung von Sandsteinen (2 unterschiedliche Sandsteine), Karbonatgestein und kristallinem Gestein (Granite) vorgenommen. Die Ergebnisse sind den Abschnitten 6.2.1 und 6.2.2 beschrieben, flossen aber auch in den zusammen mit den Verbundpartnern erstellten Abschnitt 6.1.1 ein. Die Kartierung von Störungen anhand seismischer Sektionen für verschiedene Untersuchungsgebiete erbrachte unterschiedliche Alter von Störungszonen sowie Kompressions- und Dekompressionsstrukturen (vgl. hierzu die Ergebnisse der Abschnitte 2, 6.1.1 und 6.2.1).

In Zusammenarbeit von KIT, TU Darmstadt und Universität Freiburg sollten geomechanische Laborversuche durchgeführt werden, bei denen die Bruchbildung im Detail, sowie die Änderungen des Spannungsfeldes und Auswirkungen auf die Slip- und Abschertendenz, auf die Kohäsion und auf diagenetische Veränderungen für die oben genannten verschiedenen Gesteinstypen untersucht und modelltechnisch umgesetzt werden. Diese Arbeiten wurden dabei um die Bewertungen des aktuellen Spannungsfeldes ergänzt. Die Untersuchungsergebnisse sind in den Abschnitten 6.2.3 und 6.2.4 beschrieben.

Die aus den einzelnen Untersuchungsbereichen gewonnenen Ergebnisse wurden einander gegenübergestellt und an exemplarischen Gebieten im Oberrheingraben und im Molassebecken eine geomechanische Modellierung durchgeführt. Dabei konnten Rückschlüsse auf die jeweiligen hydrogeologischen Bedingungen für Störungen gezogen werden. Dadurch war es möglich, hydrogeothermisch interessante von uninteressanten Störungen zu unterscheiden. Die Auswertergebnisse sind in Abschnitt 6.2.4 dargestellt.

Sämtliche Untersuchungen sind im Detail im Anhang zu diesem Bericht in einzelnen ausführlichen Forschungsberichten dargelegt (vgl. Anlagen 1–11 auf der beiliegenden CD). In den Abschnitten 6 des Forschungsberichtes sind die Ergebnisse des Forschungsprojektes in kompilierter Form wiedergegeben.

2 Voraussetzungen

Störungszonen können auch Aquifere in unterschiedlichen Tiefenlagen miteinander verbinden. Abhängig vom Störungstyp, d. h. der Entstehung der Störung, den rezenten Spannungsverhältnissen, aber auch den geochemischen Prozessen, können diese Strukturen sehr gut bis nicht durchlässig sein. Unsicherheiten bezüglich ihrer hydraulischen Eigenschaften einzugrenzen, eröffnet einen Forschungsbereich, der erst die Voraussetzung dafür schaffen muss, diesen Reservoirtyp planbar zu machen.

Bei den natürlichen Thermalwasseraustritten, die über Bohrungen bzw. Brunnen gefasst sind und zu balneologischen Zwecken genutzt werden, handelt es sich in Deutschland zum überwiegenden Teil um Tiefenwässer, die auf Störungszonen bis oder nahe zur Erdoberfläche aufsteigen und dort genutzt werden. Baden-Württemberg verfügt über zahlreiche derartige natürliche Systeme.

Die Wahrscheinlichkeit, dass Kluftsysteme Fluide führen und damit erhöhte Durchlässigkeiten aufweisen, wird derzeit bei geologisch jungen Strukturen höher eingestuft als bei älteren Strukturen, welche häufiger durch Ausfällungen wieder verheilt sind. Derzeit können jedoch noch keine speziellen Parameter definiert werden.

In Baden Württemberg (und benachbarten Gebieten) stehen die mit Störungszonen verbundenen geothermischen Reservoirs im Vordergrund der Nutzung, jedoch besteht aufgrund der geringen Anzahl dieser Systeme noch wenig Erfahrung. Die technische Realisierung für eine energetische Nutzung ist stark von den geologischen Verhältnissen abhängig. Eine systematische Kartierung für ihre energetische Nutzungen ist bisher noch nicht erfolgt.

Im Rahmen der vom BMU und BMWi geförderten Projekte *GeotIS* und *GeoTool* (Fördernr.: 0327542, 0325136) wurden u. a. Alt-Seismiksektionen im Oberrheingraben und Molassebecken geologisch interpretiert und geologische Schnitte bis ins Kristalline Grundgebirge hinein entwickelt. Dabei konnten Störungen mit Versatzbeträgen ab mehreren 10er Metern bis zu einigen 1000 m identifiziert werden. Abbildung 1 zeigt die Karte der Hauptstörungen im Baden-Württembergischen Teil des Oberrheingrabens.

Die seismischen Sektionen wurden im Hinblick auf Kompression (bzw. Transpression) und Extension (bzw. Transtension) gesichtet. Hinweise auf Kompression waren beispielsweise: Überschiebung, Hebung/Faltung in der geologischen Abfolge u. ä., Hinweise auf Extension beispielsweise: Flowerstructures u. ä.. Darauf aufbauend ergeben sich Regionen mit rezent überwiegend extensiver und eher kompressiver Charakteristik (Abb. 1). Allerdings zeigt die Abbildung auch, dass

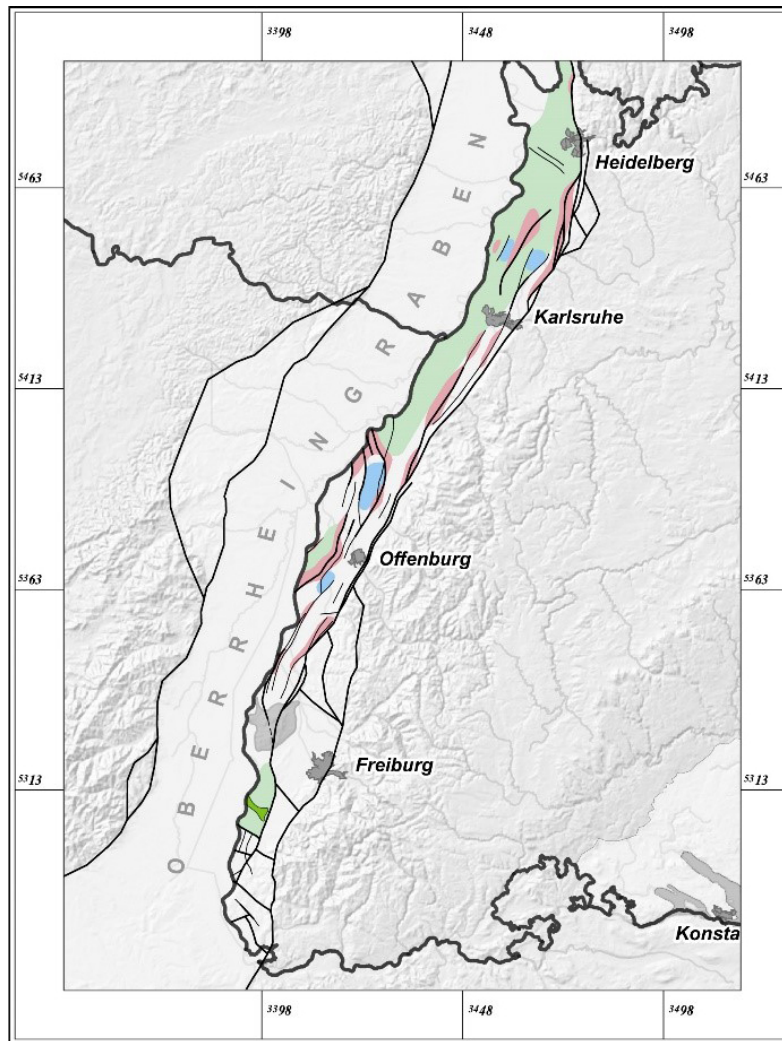


Abb. 1 – Hauptstörungen im Oberrheingraben Baden-Württembergs, eingetragen sind Bereiche mit Hinweisen auf Kompression (rot) und Extension (blau).

eine derartige Kartierung für praktische Fragestellungen zu wenig detailliert ist. Daher wurde im Projekt *StörTief* zusammen mit den Verbundpartnern ein darauf aufbauender, jedoch wesentlich erweiterter Ansatz gewählt.

3 Planung und Ablauf

Über den Projektablauf wurde in engem Kontakt zum Zuwendungsgeber und Projektträger (BMW, PtJ) im Rahmen von halbjährigen Projektreffen mit den Kooperationspartnern Bericht erstattet. Für die Jahre 2013, 2014, 2015 und 2016 wurden für den jeweiligen Berichtszeitraum Zwischenberichte mit Darlegung des Arbeits- und Zeitplans sowie der Darlegung der erbrachten Leistungen erstellt. Von Beginn an wurden die einzelnen Arbeitsschritte, wie im Projektantrag ausführlich dargestellt, festgelegt und gemäß dem nachstehenden Balkenplan (Abb. 2)

abgearbeitet. Das Vorgehen gliedert sich in fünf Hauptabschnitte: Erhebung von Grundlagendaten, geologische Untersuchungen, geologische Geländeaufnahme und Geochemie, geomechanische Versuche (Triaxpresse), und geomechanisch-numerische Modellierungen.

AP	Titel/Kurzform Arbeitspaket:	Bearbeiter	Projektlaufzeit											
			1. Jahr				2. Jahr				3. Jahr			
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	Erhebung von Grundlagendaten													
	1.1 Allgemeines Literaturstudium	1+2												
	1.2 Auswertung von regionalen Archivdaten	1+2												
2	Geologische Untersuchungen	1												
3	Geomechanische Versuche, Triaxialpresse	2												
	3.1 Makroskopische geologische Aufnahme	1+2												
	3.2 Beprobungskampagne	1+2												
	3.3 Mechan., hydraul. Voruntersuchungen	2												
	3.4 Durchlässigkeitsuntersuchungen im Labor	1												
4	Geologische Geländeaufnahme, Geochemie	1												
	4.1 Geochem.-mineral. Voruntersuchungen	1												
	4.2 Makroskopische Untersuchungen	1												
	4.3 Geochem.-mineral. Unters. an alter. Proben	1												
	4.4 Batch- und Autoklavversuche	1												
5	Geomechan.-numerische Modellierungen	2												
6	Zusammenführung der Ergebnisse	1+2												

Abb. 2 – Balkenplan für den Projektablauf.

Der Projektstart des Teilprojektes 0325623C des Verbundvorhabens hat sich aus verwaltungstechnischen Gründen (Eingang Bewilligungsbescheid am 18.07.13, Stellenausschreibungsfristen, Anstellungsverträge) auf den 15.10.2013 verschoben. Vom BMWi wurde die daher erforderliche kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit bis zum 30.10.2016 bewilligt. Zur Projektbearbeitung wurden zum 15.10.2013 zwei Geowissenschaftler (Roman Schmidt und Robin Seitel) über den Projektzeitraum eingestellt. Es wurden zudem geeignete studentische Hilfskräfte eingestellt, die das Projekt mit Tätigkeiten u. a. in der Gesteinsaufbereitung, Probenahme, Literaturrecherche und Abfrage von Datenbanken unterstützten.

Da die Triaxpresse an der Universität in Freiburg, mit der die vorgesehenen geomechanischen Versuche durchgeführt werden sollten, zu Projektbeginn defekt war, wurden die ersten Versuche zur mechanischen Charakterisierung der Reservoir-Gesteinsproben an der TU Darmstadt durchgeführt (vgl. Zwischenberichte 2–6). Nach Reparatur der Triaxialpresse in Freiburg konnten dort, wie im Forschungsvorhaben geplant, die Gesteinstypen bei deutlich höherem Druck sowie unter erhöhten Temperaturen untersucht werden. Allerdings mussten die Versuche ohne die vorgesehene Unterstützung durch Herrn Dr. Trullenque, dem Experten für die Triaxpresse, als Kooperationspartner durchgeführt werden, da er eine neue Stelle an einer anderen Universität antrat. Durch die freundliche Unterstützung von Seiten der Geologie an der Universität

Freiburg konnten die geplanten Versuche dann letztlich doch vollständig durchgeführt werden (Abs. 6.2.3).

Der im Projektantrag vorgesehene Autoklav (ICARE) im Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW) stand im Projektzeitraum unerwarteter Weise wegen eines Defektes nicht für Versuche zur Verfügung. Um das Projektziel zu erreichen, wurden alternative Möglichkeiten (Batchzellen- und Autoklavversuche) eingesetzt (vgl. Zwischenberichte 2–6). Insbesondere durch die geochemisch-mineralogischen Experimente im Autoklaven am Institut für Geo- und Umweltwissenschaften – Mineralogie-Petrologie an der Universität Freiburg konnten die Versuche letztlich so durchgeführt werden, dass die im Projektantrag beschriebenen Fragestellungen beantwortet werden konnten (Abs. 6.2.2).

Durch die nicht selbst verschuldeten Defekte der Untersuchungsapparaturen (Triax-Zelle Freiburg, ICARE-Autoklav Karlsruhe) kam es zu unfreiwilligen Umplanungen und geringen Verzögerungen im Projektablauf; sie führten jedoch trotz der geschilderten Schwierigkeiten durch das große Engagement aller Beteiligten zum Ziel und Erfolg, sodass die Aufgabenstellungen im Projektantrag bearbeitet werden konnten. Unser Dank gilt daher den beiden Institutionen TU Darmstadt (Prof. Dr. A. Henk) und der Universität Freiburg (Prof. Dr. K. Bucher, Prof. Dr. T. Kenkmann) für das große Entgegenkommen.

Im Zuge des Projektes wurden verschiedene Bergwerke/Steinbrüche/Tiefbohrungen in Bezug auf geologische Untersuchungen an Störzonen ausgewertet (Abs. 6.2.1). Für großzügige Unterstützungen und die zahlreichen Untersuchungsmöglichkeiten im Bergwerk Teufelsgrund des S-Schwarzwaldes danken wir dem ehrenamtlichen Team des Besucherbergwerkes. Für die Unterstützung und Bereitstellung von Bohrkernen aus der Tiefbohrung GPS1 Soultz danken wir insbesondere Herrn Dr. A. Genter von GEIE Exploitation Minière de la Chaleur und für Einsichtnahme in das Kernarchiv von Baden-Württemberg dem LGRB.

Die geplanten geomechanischen Modellierungen konnten wie im Antrag genannt entsprechend dem Zeitplan durchgeführt werden (Abs. 6.2.4). Als Standorte wurde im Oberrheingraben das Projektgebiet Neuried gewählt, für das als Grundlage eine interpretierte 3D-Seismik sowie die Rohdaten vorlagen. Besonderen Dank gilt dem Konsortium Hybridkraftwerk Neuried GmbH & Co.KG für die Erteilung der Erlaubnis und Herrn Dr. Bunes (LIAG) für die Übermittlung von Daten. Der im Antrag genannte zweite Standort liegt im süddeutschen Molassebecken im Projektgebiet Sauerlach. Hier gilt unser Dank der Firma Erdwerk GmbH sowie den Stadtwerken München für die Bereitstellung von Untergrunddaten.

Dem LIAG liegen sämtliche Auswertungsergebnisse zur Einpflege in *GeotIS* vor. Darüber hinaus

stehen wir dem LIAG natürlich jederzeit für Hilfestellungen bei der Integration in *GeotIS* zur Verfügung.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand am Projektbeginn, Datenbestand am Projektende

Für die Region des Oberrheingrabens liegen die Geothermischen Synthesen (CEC) für den nördlichen und südlichen Grabenabschnitt aus den Jahren 1979 und 1981 vor. Im INTERREG IV-Projekt „Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben“ (*GeORG*) wurde ein 3D-Modell der Untergrundstruktur erstellt (www.geopotenziale.eu). Grundlegende Arbeiten zur Modellierung der Entwicklung und Struktur des Oberrheingrabens wurden bspw. von Schwarz & Henk (2005) durchgeführt.

Im Molassebecken wurden grundlegende Arbeiten seit den 80er Jahren erstellt. Zu diesen Arbeiten gehören zum Beispiel Bertleff (1986), Bertleff u. a. (1988, 2005), Brockert u. a. (2007), Europäische Gemeinschaft & Schweizerische Eidgenossenschaft (2007), Geologisches Landesamt Baden-Württemberg & Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (1989), Prestel (1990), Stober & Villinger (1997) und Villinger (1988). Für das Molassebecken wurde damals ein grenzüberschreitendes hydraulisches Modell zusammen mit Kollegen aus Bayern und der Schweiz entwickelt. In der angrenzenden Nordschweiz wurde in Signorelli u. a. (2004) eine Übersicht der entsprechenden Kennwerte des Untergrunds gegeben. Im Projekt *GeoMol* wurden die Geopotenziale in den alpinen Vorlandbecken für die nachhaltige Planung und Bewirtschaftung der natürlichen Ressourcen bewertet (www.geomol.eu).

Im Projekt „Speicher-Kataster Deutschland“ (Durchführung: Staatliche Geologische Dienste des Bundes und der Länder) erfolgte eine systematische Zusammenstellung von Informationen über unterirdische Speicherregionen u. a. auch im deutschen Teil des Oberrheingrabens sowie im Molassebecken (Müller & Reinhold, 2011). In den Projekten *GeotIS* (Geothermisches Informationssystem für Deutschland, Jodocy & Stober (2008), Schulz (2009) und Schulz u. a. (2007) und *GeoTool* (Entwicklung eines Prognosetools zur Unterstützung standortbezogener Aussagen zur Fündigkeit hydrogeothermischer Projekte) in Baden-Württemberg erfolgte eine systematische Aufnahme von geothermisch relevanten Informationen über die tief liegenden, potentiell hydrogeothermisch nutzbaren Aquifere (BMU-Fördernummern: 0327542, 0325136). Die Bearbeitungen des RPF der baden-württembergischen Teile des Oberrheingrabens und Süddeutschen Molassebeckens im Rahmen der Projekte *GeotIS* und *GeoTool* (Birner u. a., 2012; Jodocy & Stober, 2011; Stober & Jodocy, 2011a,b; Stober u. a., 2012) bildeten somit eine Datengrundlage für das

Projekt *StörTief*.

Für Deutschland liegt eine Reihe von Kartenwerken vor, die in die Gesamt-Karte der Tiefenstörungen von Jung u. a. (2002) eingeflossen sind. Dabei handelt es sich um den Atlas geothermischer Ressourcen (Haenel & Staroste, 1988), aus dem Informationen für den Oberrheingraben und das süddeutsche Molassebecken entnommen werden können. Großflächige Informationen zur Tektonik sind für Westdeutschland bei Zitzmann A. (1981) zu entnehmen.

Diese vorstehend erwähnten Arbeiten lieferten erste Erkenntnisse über den komplexen geologischen Bau des Oberrheingrabens und des Molassebeckens. In allen Projektergebnissen sind zwar Störungszonen eingearbeitet, jedoch ist ihr Verlauf z. T. nur grob wiedergegeben; insbesondere jedoch fehlten Angaben zu ihrer geomechanischen, geochemischen und damit hydraulischen Wirksamkeit. So ist bekannt, dass Störungen bzw. Störungszonen eine sehr unterschiedliche Durchlässigkeit aufweisen können.

Durch die Kooperation mit den Geowissenschaften der Universität Freiburg aber auch mit anderen Institutionen wurde auf das Fachwissen, insbesondere auch das regionale, gebündelt und optimal für das Projekt genutzt. Die Antragstellerin konnte ihre langjährigen Erfahrungen im Geologischen Dienst von Baden-Württemberg und damit die erworbenen regional-geologischen Kenntnisse über Thermalwasserquellen, erbohrte Störungszonen (Bohrungen, Tunnel, ...) in das Projekt *StörTief* einbringen. Die im Projekt *StörTief* durchgeführten Literaturrecherchen sowie Geländeuntersuchungen (überwiegend in Bergwerken) (Abs. 6.2.2, 6.2.3) und Untersuchungen an Bohrkernen von Tiefbohrungen (Abs. 6.2.1) führten zu einem starken Wissenszugewinn in Bezug auf Aufbau, Geometrie und hydraulische Eigenschaften von Störungszonen. Die gesammelten Erkenntnisse zusammen mit den neuen Untersuchungen belegen den komplexen Aufbau und das damit komplexe mechanische aber auch hydraulische Verhalten von Störungszonen. Diese speziellen Erkenntnisse flossen insbesondere in die zusammen mit den Verbundpartnern (LIAG, LLUR, KIT) durchgeführte Entwicklung und Aufstellung eines Kriterienkatalogs für die Erfassung und Beurteilung tiefreichender Störungszonen in Bezug auf ihre hydraulische Wirksamkeit ein (Abs. 6.1.1).

Permeabilitätsmessungen an ungestörten Proben der ausgewählten Lithologien wurden im Labor an Bohrkernen der vier wichtigsten Reservoirgesteine durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen Durchlässigkeitswerte, wie sie in natürlichen Reservoirgesteinen im ORG vorkommen. Außerdem wurde versucht, Permeabilitätsmessungen an Störungszonen im Bergwerk durchzuführen und diese mit den Ergebnissen der ungestörten Proben aus den Laborversuchen zu vergleichen (Abs. 6.2.1).

Mit Hilfe von Autoklav-Experimenten an vier verschiedenen im ORG vorkommenden Reservoirgesteinen konnte jeweils die Entwicklung frischer Bruchflächen hin zu Störungszonen unter Reservoirbedingungen, d. h. bei hohen Temperaturen und hoch salinaren Fluiden, simuliert werden. Es konnten die entscheidenden Mineralreaktionen identifiziert werden, die einen hohen Einfluss auf die Permeabilität frischer Bruchflächen bzw. Störungen haben (Abs. 6.2.2). Vergleiche mit natürlichen Störungszonen in einem Bergwerk im Schwarzwald wurden den Experiment-Ergebnissen gegenüber gestellt (Abs. 6.2.1).

Die Ergebnisse der geomechanischen Versuche mit dem Schmidhammer im Bergwerk über eine Störungszone hinweg zeigten eine Abhängigkeit der Gesteinsfestigkeit und des E-Moduls von der Distanz zur Störungszone (Abs. 6.2.1). Da mit dem Schmidhammer eher qualitative Werte ermittelt werden, wurden an Bohrkernen, die den vier wichtigsten Reservoirtypen entsprechen, Versuche mit den Triaxialzellen an der TU Darmstadt sowie an der Universität Freiburg durchgeführt. An der Triaxzelle der Universität Freiburg wurden zudem an den vier Reservoirgesteinen die geomechanischen Eigenschaften sowie das Bruchverhalten, also die Entwicklung von Störungszonen, bei steigendem Ringdruck sowie Temperatur, d. h. in Abhängigkeit von der Tiefenlage, ermittelt. Die Versuche zeigten, dass die häufig verwendeten linear elastischen Modellieransätze mit zunehmender Tiefe nicht gültig sind (Abs. 6.2.3).

Im Projekt konnte auf die großen Erfahrungen des AGW (Institut für Angewandte Geowissenschaften) im KIT bei der im Projekt *StörTief* durchgeführten geomechanischen-numerischen Modellierung (Abs. 6.2.4) zurückgegriffen werden. Mit Hilfe der geomechanischen Modellierungen an ausgewählten Standorten im Oberrheingraben und Molassebecken konnte gezeigt werden, welche Störungen in Abhängigkeit vom regionalen Stressfeld, der Orientierung der Störzonen und von den geomechanischen Eigenschaften eher dazu neigen, eine erhöhte Durchlässigkeit aufzuweisen, und bei welchen Störungszonen eher geringe Durchlässigkeiten zu erwarten sind. Die Ergebnisse lassen sich auf andere Standorte übertragen.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Kooperationspartner Für die Umsetzung des Verbundprojektes *StörTief* waren das Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik in Hannover (LIAG) sowie das Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig Holstein (LLUR).

Weitere Partner unmittelbar am vom KIT direkt beantragten Projekt waren die Universität Freiburg (Institut für Geo- und Umweltwissenschaften: Abteilung Geologie, Abteilung Mineralogie-Petrologie).

Mit den Kooperationspartnern erfolgte unter Einhaltung von erforderlichen Geheimhaltungsverpflichtungen ein intensiver gegenseitiger Informations- und Datenaustausch. Es wurden sieben Projekttreffen mit allen Projektbeteiligten durchgeführt. Das Treffen am 22.06.2016 erfolgte im kleinen Rahmen. Thema war die Erstellung eines „Kriterienkatalogs für die Erfassung tiefreichender Störungen bezüglich ihrer geothermischen Nutzbarkeit in Deutschland“, ein Thema, mit dem sich alle drei Verbundpartner gemeinsam befassten (Abs. 6.1.1).

Die Projekttreffen der Kooperationspartner wurden wechselseitig vom LIAG, LLUR und KIT organisiert:

Nr.	Datum	Ort	Teilnehmende Organisationen
1	19.–20.11.2013	Hannover	LIAG, LLUR, KIT, LfU, LUNG, LBEG, PTJ
2	22.05.2014	Flintbek/Kiel	LIAG, LLUR, KIT, LUNG, LBEG
3	27.11.2015	Karlsruhe	LIAG, LLUR, KIT, LBEG, PTJ
4	16.–17.06.2015	Hannover	LIAG, LLUR, KIT, LBEG
5	25.–26.12.2015	Flintbek/Kiel	LIAG, LLUR, KIT, LBEG
6	15.–16.03.2016	Karlsruhe	LIAG, LLUR, KIT, LBEG
7	22.06.2016	Hannover	LIAG, LLUR, KIT (enger Kreis)
8	27.–28.09.2016	Hannover	LIAG, LLUR, KIT, LBEG, LUNG, G.E.O.S., PTJ

6 Ergebnis

6.1 Charakterisierung von Störungssystemen

6.1.1 Kriterienkatalog für die Erfassung tiefreichender Störungen bezüglich ihrer geothermischen Nutzbarkeit in Deutschland

Einleitung Störungen sind Bruchzonen oder Bruchflächen, die in Sediment- als auch in kristallinem Gestein auftreten können. Für die geothermische Nutzung sind die spröde (d. h. bruchhaft) deformierten Störungen von besonderer Bedeutung. In und um diese Bruchzonen kann das hydraulische und thermische Leitvermögen der Gesteinsschichten beträchtlich verändert sein. Bruchhafte Störungen können bis in eine Tiefe von 12 km reichen. In einer Tiefe von 12 bis 17 km werden Störungen spröde-duktil deformiert, ab 17 km Tiefe nur noch duktil und weisen keine hydraulische Wirksamkeit mehr auf.

Tiefreichende spröde Störungszonen durchziehen das gesamte Gebiet Deutschlands. Störungen sind derzeit in Tiefen bis 5 bis 7 km wirtschaftlich nutzbar. Im Rahmen des Projekts werden

daher Störungen bis ca. 5 km Tiefe betrachtet. Die meisten tiefreichenden Störungen sind an geologische Großstrukturen gebunden, wie z. B. das Norddeutsche Becken, das Thüringer Becken, der Oberrheingraben oder das Süddeutsche Molassebecken.

Definition und Klassifikation von Störungen Als Störung oder Verwerfung bezeichnet man einen Randbereich im geologischen Untergrund, an dem vormals zusammenhängende Gesteinskörper durchtrennt und gegeneinander versetzt wurden. Die Verschiebung findet dabei parallel zur Bruchebene, auch Störungsfläche genannt, statt. Die räumliche Lage der Störungsfläche wird durch ihr Streichen und Fallen definiert. Unter Streichen versteht man die Orientierung der Schnittlinie einer Verwerfungsfläche mit einer gedachten horizontalen Ebene. Als Streichwert bezeichnet man den Winkel zwischen dieser Schnittlinie und der Nordrichtung. Mit dem Begriff Fallen (oder auch Einfallen) beschreibt man den Winkel zwischen einer geologischen Fläche und einer horizontalen Ebene orthogonal zum Streichen.

Der vertikale Versatz wird dabei als Sprunghöhe bezeichnet. Für den horizontalen Versatz verwendet man den Begriff Schublänge. Je nach Versatzrichtung spricht man von einer Abschiebung (normal fault), Aufschiebung (reverse fault), Überschiebung oder Blattverschiebung, auch Horizontalverschiebung genannt (strike-slip fault). Bei letztere wird noch zwischen einer sinistralen (linksseitigen) oder einer dextralen (rechtsseitigen) Blattverschiebung unterschieden. Bei einer Kombination verschiedener Bewegungsrichtungen wird häufig der Begriff Diagonalverschiebung verwendet, aber auch Begriffe wie schiefe Horizontalverschiebung, sinistrale Abschiebung oder dextrale Aufschiebung sind gebräuchlich. Die Versatzrichtung ist nicht immer einfach zu erkennen. Im Gelände können Gleitstriemen (parallele Riefen) und Harnische Hinweise auf die Versatzrichtung geben.

Bei einer Abschiebung oder Aufschiebung wird der Gesteinsverband über der Verwerfungsfläche Hangendblock und der darunter Liegendblock genannt.

Aufbau von Störungen Bruchhafte Störungen entstehen durch Gesteinsversagen aufgrund tektonischer Spannungen in der Erdkruste. Die Deformation kann je nach Temperatur- und Tiefenlage spröd, spröd-duktil oder duktil sein, wobei spröde Deformation zu eng begrenzten Störungsflächen führt, die durch Scherung entstehen. Die Intensität der Deformation hängt neben den geologischen Verhältnissen auch von der Größe der einwirkenden tektonischen Spannung ab. Je nach Versatzbetrag können Störungen entweder nur wenige Zentimeter breit und lang sein und als singuläre Trennfläche definiert werden, oder sie sind Meter bis Kilometer breit und bilden damit Störungszonen. Störungen treten in allen Skalenbereichen von der Mikroebene zwischen

zwei Kristallkörnern bis zur Megaskala als Grenzen kontinentaler Platten auf. Eine Störung wird untergliedert in den Kernbereich der Scherfläche und zwei äußeren Zerrüttungszonen, in denen die Zerklüftung durch den Schervorgang erhöht ist (Caine u. a., 1996). Daher ist in der Regel die Durchlässigkeit beidseits des Störungskerns erhöht und nimmt nach den Seiten ab bis auf die Durchlässigkeit des ungestörten Gesteins. Entsprechendes gilt auch für das Elastizitätsmodul (vgl. Anl. 4).

Abbildung 3 zeigt schematisch den Aufbau einer Störung am Beispiel einer Blattverschiebung. Vielfach wird auch beobachtet, dass eine Störung aus mehreren kleineren Einzel-Störungen aufgebaut ist, d. h. aus mehreren Kernbereichen und mehreren Auflockerungszonen, wie z. B. in der Tiefbohrung Soultz-sous-Forêts (vgl. Anl. 3) aber auch in Bergwerken im Schwarzwald (vgl. Anl. 1). Allgemein gilt, dass die Breite einer Zerrüttungszone sich proportional zur Größe des Versatzbetrages verhält (z. B. Choi u. a., 2016) und auch Attribute wie Länge und Versatz miteinander korrelieren können (z. B. Kolyukhin & Torabi, 2012; Torabi & Berg, 2011). Diese Korrelationen wurden in verschiedenen Skalenbereichen und unterschiedlichen Lithologien gefunden.

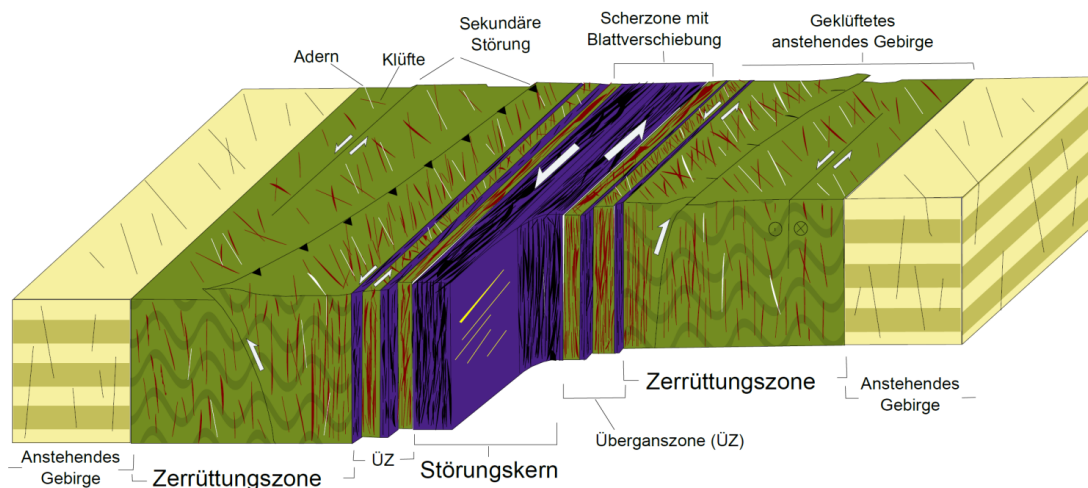


Abb. 3 – Blockbild einer Störung bestehend aus zwei Zerrüttungszonen und einer Scherzone im Kernbereich (verändert nach Choi u. a. (2016)).

Hydraulische Eigenschaften von Störungen Je nach Deformationsart bzw. -intensität und Gesteinstyp sowie begleitenden hydrothermalen Phasen können Störungen deutlich größere oder wesentlich kleinere Durchlässigkeiten als das intakte Gestein haben. Fluidbewegungen finden daher bevorzugt an Störungen statt (hydraulische Leitzone) oder werden durch diese begrenzt (hydraulisch dichter Rand). Dabei kann es vorkommen, dass die Kernzone durch Porositätsabnahme eine hydraulische Barriere darstellt und damit querende Fluidströme unterbindet, während die äußeren Zerrüttungszonen (oder Auflockerungszonen) mit größerer Kluftnetzichte eine erhöhte Durchlässigkeit entlang der Störung aufweisen.

Fluide können durch die hydraulische Begrenzung im Störungskern und die erhöhte Durchlässigkeit in der Zerrüttungszone von einer eher horizontalen Fließrichtung in eine eher vertikale umgelenkt werden (Abb. 4). Daher können Störungszonen gleichzeitig beides sein: hydraulisch dicht sowie hydraulisch erhöht leitfähig.

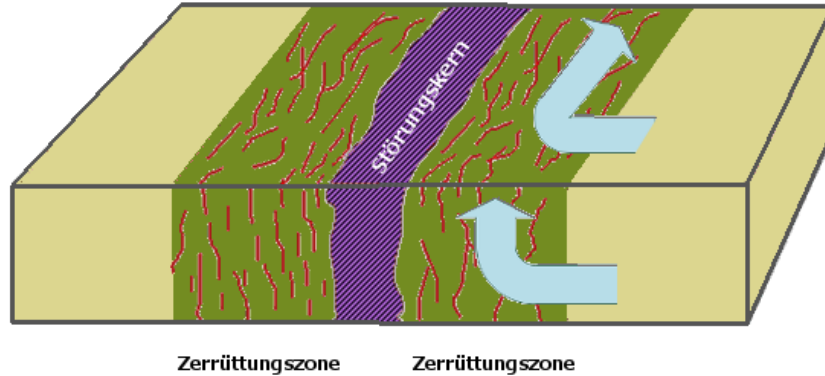


Abb. 4 – Beispiel für eine mögliche hydraulische Wirkung von Störungszonen. Ein undurchlässiger Störungskern stellt eine hydraulische Barriere dar und kann die Fließrichtung in verschiedene Richtungen umlenken.

Derartige Systeme treten verstärkt in tektonisch noch aktiven Gebieten mit erhöhter Reliefenergie auf, wie z.B. am Fuße des Schwarzwaldes (oder der Vogesen) in SW-Deutschland und sind die Ursache der meisten Thermalwasserquellen (z. B. Baden-Baden, Aachen, Wiesbaden, Ohlsbach etc.). Die großen Höhenunterschiede von z. T. 1000 m initiieren diese Tiefenwasserzirkulation, die bis in einige 1000 m unter Gelände reichen (Abb. 5). Die Verweilzeiten der in den Untergrund einsickernden meteorischen Wässer liegen bei einigen 1000 bis 10 000 Jahren.

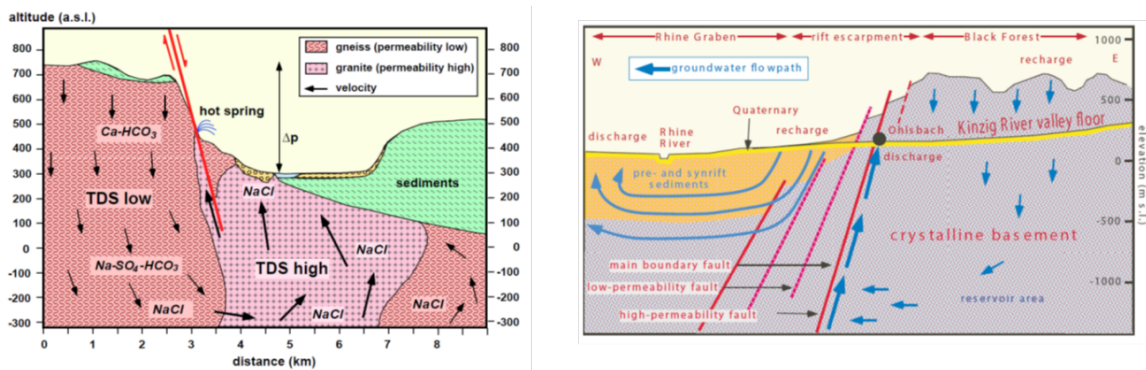


Abb. 5 – Beispiel für Tiefenwasserzirkulationen, initiiert durch die hohen Topographieunterschiede und die hydraulische Wirkung von Störungszonen (Quelle: Stober & Bucher (2014) und Stober u. a. (1999)).

Durch aufsteigende Fluide kann dabei zum einen Wärme in geringere Tiefen transportiert werden, was Störungen für eine geothermische Nutzung interessant macht. Zum anderen werden Wässer mit höherem Lösungsinhalt in flachere Bereiche transportiert. Durch den Aufstieg der

Thermalwässer in andere Druck- und Temperaturbereiche kann es zu Übersättigung, unter gewissen Umständen auch zu Untersättigung der Wässer bezüglich verschiedener Mineralphasen und damit zu Ausfällungen bzw. Lösungserscheinungen kommen, d. h. zu einer Änderung der Permeabilität (Stober & Bucher, 2014). Dabei stellen Anhydrit, Calcit, Dolomit, Tonminerale, Baryt und Quarz die häufigsten Mineralphasen bei Ausfällungen dar.

In günstigen Fällen können einzelne Störungen oberflächennah besonders gut charakterisiert werden. Dazu gehören zweifellos Tunnelarbeiten (Fasching & Vanek, 2011), Steinbrüche und andere Aufschlüsse im Gelände (Philipp u. a., 2008; Reyer u. a., 2012). Dabei ist zu beachten, dass nach Lee & Farmer (1993) die Öffnungsweite in Bruchsystemen in der Regel mit der Tiefe abnimmt, der Zerklüftungsgrad jedoch zunehmen kann. In 2000 bis 3000 m Tiefe kann sich die Kluftöffnungsweite auf 1/10 bis 1/100 der Öffnungsweite an der Oberfläche verringern. Obwohl es für manche Störungen Hinweise auf starken Wassertransport gibt (z. B. Thermalquellen auf der Aachener Überschiebung, Fliericher Sprung bei Hamm/NRW), ist insgesamt das Wissen über tiefreichende Störungen in der Reservoirskala noch gering.

Dass große Störungszonen auch nahezu dicht sein können, hat beispielsweise das Durchhörtern der 63,5° nach WNW einfallenden östlichen Rheingraben-Hauptverwerfungszone bei Bühl auf der Suche nach Thermalwasser gezeigt. Der Sprungbetrag der Hauptverwerfung beläuft sich hier auf ca. 4700 m. Obwohl zahlreiche kleinere Störungen und teilweise offene Klüfte im Bereich der Hauptverwerfungszone durchfahren wurden, konnten nur 0,17 l s⁻¹ gefördert werden (Bertleff u. a., 1988). Auch beim Bau des Lorettobergtunnels bei Freiburg, der die mit 55° nach WNW einfallende Rheingrabenrandverwerfung mit einer Sprunghöhe von 2000 m durchörtert, wurde keine Wasserführung beobachtet. Die Grabenrandverwerfung stellt hier eine 20 m breite Ruschelzone dar, bestehend aus grauweißem, tonigem, intensiv zerschertem Gneis mit dunklen plastischen Lagen und Linsen. Beiderseits dieser Zone sind die Gesteine intensiv zertrüftet (Brill, 1933). Die tektonisch bedingten Bewegungsraten liegen heute bei 0,1 bis 0,6 mm pro Jahr. Ebenso wurde beim Wattkopftunnel bei Ettlingen im Oberrheingraben die östliche Hauptgrabenrandverwerfung ohne nennenswerte Wasserzutritte durchörtert. Die Störungszone hat hier eine Breite von 130 m bei einem Gesamtversatz von über 2000 m, wobei sich die Absenkung an einer Vielzahl gestaffelter Abschiebungen vollzog (Neßler u. a., 1993). Diese Erfahrungen zeigen, dass Störungszonen mit Versatzbeträgen von mehreren tausend Metern auch zu keiner bis sehr geringer Wasserführung neigen können.

Mit Hilfe von Geothermometern kann aus der hydrochemischen Analyse einer Thermalwasserquelle auf die Reservoirtemperatur und daraus mittels geothermischen Gradienten auf die Zirkulationstiefe geschlossen werden. Beispielsweise ergeben sich somit für die Thermalquellen

Baden-Baden Zirkulationstiefen von ca. 3500 m (Stober, 1995).

Weitergehende Informationen über die Geometrie und Eigenschaften von Störungen in größeren Tiefen können nur durch Bohrungen (wenn sie die Störung komplett durchörterten) und Seismik gewonnen werden. Der Erkenntniszuwachs durch Seismik wird dabei wesentlich von der Datenqualität bestimmt. Eine Unterscheidung zwischen Haupt- und Nebenstörung, eine Bestimmung der Zerrüttungszonenbreite oder eine Beurteilung der Klüftigkeit sind dabei sehr schwierig (z. B. Schuck u. a., 2012). Tiefere Störungszonen des Norddeutschen Beckens wurden im Rahmen des *StörTief*-Projekts am Beispiel des Glückstadt Grabens untersucht. Geometrische Attribute wurden hierbei durch die geologische 3D-Modellierung gewonnen und zusammen mit Informationen aus Bohrdaten zur Einschätzung der Untersuchungswürdigkeit verwendet.

Die für eine geothermische Nutzung wichtigen hydraulischen Eigenschaften von Störungen können nur durch Pumpversuche in einzelnen Bohrlochabschnitten ermittelt werden. Häufig existieren aber von Altbohrungen keine ausreichenden Daten.

Breitere Zerrüttungszonen können zumindest theoretisch die hydraulische Durchlässigkeit erhöhen, jedoch ist die Struktur der Fluidwegsamkeiten in Störungszonen in der Regel sehr komplex und kann sich mit der Zeit durch sekundäre Mineralisation oder auch durch fortschreitende Störungsausbreitung verändern (z. B. Curewitz & Karson, 1997). Daher ist das Alter der Entstehung oder der letzten Reaktivierung einer Störung ebenfalls ein wichtiges Kriterium bei der Beurteilung von Störungszonen. Ob eine Störungszone jung oder alt ist, lässt sich häufig anhand eines seismischen Profilschnittes abschätzen.

Bekannt ist auch, dass die Transmissibilität von Störungen innerhalb einer Region, teilweise aber auch innerhalb der gleichen Störungszone an verschiedenen Abschnitten, sehr unterschiedlich sein kann (Moeck u. a., 2015). Ursache können Unterschiede im Schichtaufbau, in der Klüftigkeit oder im Ausmaß der Zementation sein. Manche Störungssegmente wirken als Wasserstauer (Abb. 4), an denen sich die Grundwassergleichen um mehrere Dutzende Meter unterscheiden können (z. B. Ruhr-Sprung bei Niederzier am Niederrhein). Andererseits wurden bei einigen Geothermieprojekten Störungen gezielt durchörtert, um damit die Produktivität oder Injektivität einer Bohrung zu erhöhen, so z. B. für die Reinjektion des abgekühlten Thermalwassers aus dem Geothermieheizkraftwerk Unterhaching. Ebenso injiziert und fördert die Anlage in Landau in und aus Störungszonen.

Grundlage für die Erschließung steilstehender Störungszonen ist die Richtbohrtechnik. Sie ermöglicht es, den Bohrfad soweit abzulenken, dass Störungen sogar horizontal durchörtert werden können.

Nutzungspotential und Kriterien Ob eine tiefreichende Störung von geothermischem Nutzen ist, hängt von vielen Faktoren ab und sollte bereits im Vorfeld einer Bohrung im Rahmen einer Machbarkeitsstudie betrachtet werden, um abzuwägen, ob eine Störungszone für ein Geothermieprojekt ein erfolgversprechendes Bohrziel sein könnte. Ziel ist es dabei, abzuschätzen, ob ein geothermisches Potential innerhalb eines Störungsabschnitts auf Basis der vorhandenen oder noch einzuholenden Daten (bzw. Modelle) eher wahrscheinlich oder unwahrscheinlich ist. Auf regionaler Basis eignet sich für dieses Vorgehen ein einfaches Klassifikationsschema mit fünf Kategorien, wie es in Abbildung 6 dargestellt ist.



Abb. 6 – Fünf-Klasseneinteilung von tiefreichenden Störungen hinsichtlich ihrer hydraulischen Leitfähigkeit.

Im günstigsten Fall (Abb. 6 links außen) ist die hydraulische Wegsamkeit einer Störung bereits nachgewiesen. Ein hinreichender Nachweis kann eine heiße Quelle, ein starker Zulauf oder Spülungsverlust in einer Bohrung in entsprechender Tiefe oder (im Idealfall) ein hydraulischer Test sein. Seltener werden Tracer-Experimente oder die Fluidzusammensetzung den Nachweis erbringen. Bei der Bewertung hydraulischer Testdaten ist zu prüfen, in wieweit die ermittelte Gebirgsdurchlässigkeit tatsächlich der Störung zugeordnet werden kann. Zudem muss eine Störungsmusteranalyse und Spannungsfeldanalyse durchgeführt werden, um das Bezugssystem Störung–Permeabilitätsstruktur–heiße Quelle korrekt zu qualifizieren. Dabei ist zu beachten, dass sich mit der Tiefe in der Regel das Spannungsregime ändert, was sich insbesondere auf die Kluftpermeabilität auswirkt.

Im ungünstigsten Fall (Abb. 6 rechts außen) ist eine geothermische Nutzung ausgeschlossen, beispielsweise, weil das Bruchsystem unterhalb einer Salzstruktur in unerreichbarer Tiefe liegt oder

die geringe Permeabilität bereits nachgewiesen wurde. Häufig wird eine Zuordnung zu einem dieser beiden Fälle nicht möglich sein. Dann stützt sich eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit eines geothermischen Potentials auf verschiedene Anhaltspunkte, die zu einem eher positiven oder eher negativen Resultat führen. In vielen Fällen kann aufgrund unzureichender oder gegensätzlicher Anhaltspunkte überhaupt keine Aussage getroffen werden. Hier ist die Situation ungeklärt bis weitere Anhaltspunkte vorliegen.

Um eine Einschätzung bezüglich des geothermischen Potentials einer Störung vorzunehmen, wenn noch keine gesicherten Erkenntnisse über die Transmissibilität vorliegen, empfiehlt sich ein Indikatorenkatalog (Tab. 1) auf der Grundlage strukturgeologischer und lithologischer Merkmale.

Ausrichtung der Störung zum Spannungsfeld Je nach Region und aktuellem Spannungsfeld können bestimmte Streichrichtungen die Wahrscheinlichkeit für vorhandene Fließwege parallel zum Störungsverlauf erhöhen. Von großer Bedeutung ist dabei die Gebirgsfestigkeit, die unter anderem vom Trennflächengefüge und Wasserdruck abhängt. Ein kritischer Spannungszustand nah am Versagenskriterium von Mohr-Coulomb (hohes Reaktivierungspotential) ist für die hydraulische Leitfähigkeit besonders günstig. Aus Studien ist belegt, dass gerade die kritisch gespannten Trennflächen besonders gut Zuflusswege für Thermalwasser ausmachen (Barton u. a., 1995). Dies sind vor allem Klüfte, die in einem Winkel von 30 bis 45° zur größten Hauptspannung orientiert sind und im Bereich aktiver Störungen nicht verheilen, da sie bei jeder Scherbewegung wieder aufreißen können. So werden in der Kohlenwasserstoff-Exploration kritisch gespannte Trennflächen als günstige Erschließungsziele genannt. In der Geothermie kann eine kritisch gespannte Trennfläche auch ein Ausschlusskriterium sein, sofern die Injektionsbohrung in solch eine Fläche geplant wird. Hier kann aber die seismische Gefährdung für die obertägige Infrastruktur möglicherweise zu hoch sein. Daher ist bereits im Vorfeld seismisches Monitoring und eine geomechanische Untersuchung zur Gefahrenabschätzung ratsam. Im Rahmen des Projektes *StörTief* wurden an ausgewählten Standorten im Oberrheingraben und Molassebecken derartige Untersuchungen durchgeführt (vgl. Anl. 8 und 9).

Allgemein werden bei dehnenden Störungen, die in Richtung der größten horizontalen Hauptspannung orientiert sind, sehr große Kluftöffnungsweiten und damit hohe Transmissibilitäten erwartet (siehe Abb. 7). Mit der Tiefe nehmen jedoch die Öffnungsweite ab und ab einer Tiefe von 2 km bieten sich keine dilativen Strukturen aufgrund zu hoher Normalspannungen, so dass eine erhöhte hydraulische Leitfähigkeit entlang der größten Hauptspannung nicht mehr zu erwarten ist (Ferrill & Morris, 2003a,b, 2007).

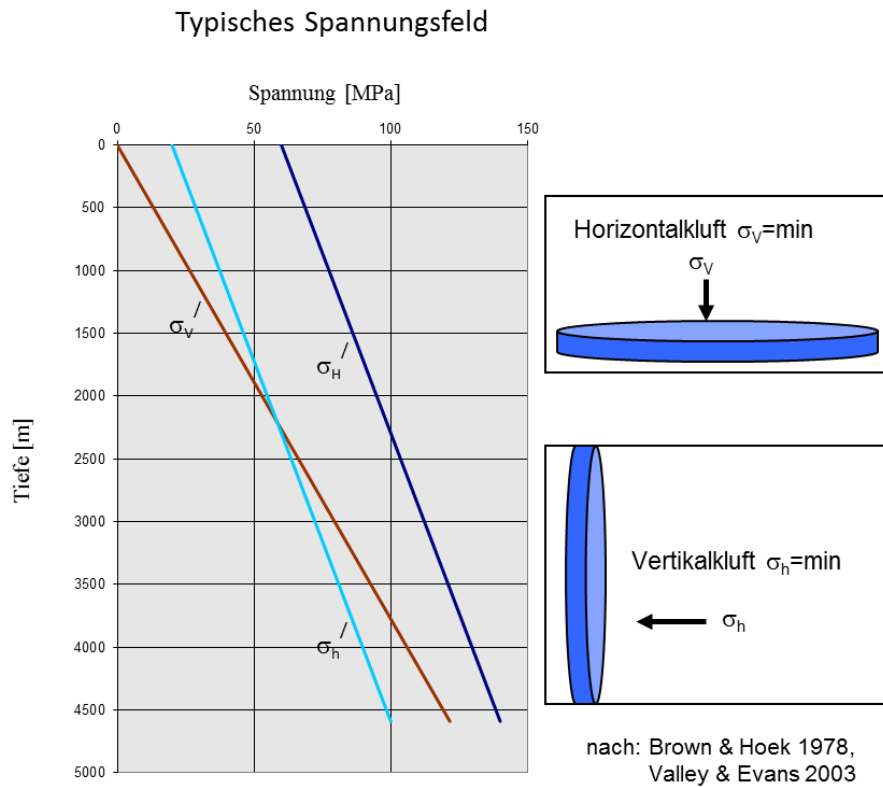


Abb. 7 – Änderung der Klüftorientierung als Folge des Spannungsfeldes (Stober & Bucher, 2014).

Ab etwa 2 km Tiefe sind die Blattverschiebungen wegen ihrer erhöhten Scherspannung für die hydraulische Leitfähigkeit wichtig. Eine Blattverschiebung mit einer Bruchebene, die in einem charakteristischen Winkel von 30 bis 45° zur Hauptspannungsrichtung verläuft, lässt bei einem hohen Verhältnis von Scherspannung zu Normalspannung erhöhte hydraulische Durchlässigkeiten vermuten (Barton u. a., 1995).

In Deutschland wurde im Auftrag des Deutschen Bundestages vor etwa 15 Jahren eine erste Studie zur Abschätzung des geothermischen Potentials von Störungen erstellt (Jung u. a., 2002). Diese Studie unterteilt tiefreichende Störungszonen nach ihren Streichrichtungen in drei Kategorien: NNE–SSW, NW–SE und W–E. Unterschiede im geothermischen Potential dieser drei Störungskategorien wurden aufgrund ihrer Orientierung zum N–S-gerichteten Hauptspannungsfeld von Jung u. a. (2002) vermutet, aber aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt. Angesichts der regional sehr unterschiedlichen geologischen Entwicklung und der lokalen Einflüsse auf das Spannungsfeld wäre eine derart pauschale Herangehensweise auch nicht zielführend. So können zum Beispiel im Bereich des Oberrheingrabens und des süddeutschen Molassebeckens auch W–E gerichtete Störungen Erschließungsziele darstellen.

Die regionale Ausrichtung der heutigen größten horizontalen Hauptspannung kann der World-Stress-Map (Heidbach u. a., 2008) entnommen werden. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen,

dass die lokale Hauptspannung von der Darstellung in der World-Stress-Map abweichen kann (z. B. im Umfeld von Salzstrukturen und Störungen) und darüber hinaus auch tiefenabhängigen Veränderungen unterliegt, wie sie beispielsweise auch in den Tiefbohrungen von Soultz-sous-Forêts beobachtet wurden (Valley & Evans, 2003). In größeren Tiefen verschlechtert sich die oft ohnehin unzureichende Datenlage zunehmend (z. B. Norddeutsches Becken). Genauere Informationen über die Richtungen der lokalen Hauptspannungen liefern auch die Auswertung von Bohrlochrandausbrüchen in Tiefbohrungen und die Kartierung vertikaler Zugrisse in Bohrungen.

Seismische Aktivität Tiefenstörungen, die seismisch aktiv und nicht durch sekundäre Mineralausfällungen verheilt sind, können durchlässig für Fluide sein. Allerdings könnte die Injektion von Wasser in die Störung und damit die Erhöhung des Porendrucks das Verhältnis von Scher- zu Normalspannung so erhöhen, dass die Festigkeit des Gebirges überschritten wird und Scherung erfolgt. Bei einer Scherung und damit verbundenen Störungsreaktivierung wird Scherungsenergie frei, die sich in seismischen Ereignissen entlädt und bei genügender Intensität als Erdbeben an der Oberfläche verspürt werden kann. An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass nicht nur bei Injektion von Fluiden sondern auch bei deren Förderung seismische Ereignisse auftreten können. Die allgemeine Erdbebenwahrscheinlichkeit für einen Ort kann nach der probabilistischen Methode von Sägger & Mayer-Rosa (1978) auf der Grundlage historischer Erdbebendaten berechnet werden. Generell erfolgen Spannungsumlagerungen durch Injektion in gering permeables Gestein nahezu ausschließlich an Trennflächen, während in durchlässigem Gebirge mit hoher Porosität die Spannungsumlagerung in der weitverzweigten Matrix stattfindet. Das Störungsreaktivierungspotential gerade durch Injektion ist in gering permeablen Gesteinen höher als in hochpermeablen Gesteinen.

Störungsgeometrie Neben dem Azimut, der Versatzlänge und -richtung können auch die Anordnung und Vernetzung von benachbarten Störungen sowie untergeordnete Strukturen wichtige Anhaltspunkte zur hydrogeologischen Einordnung von Störungen liefern. Beispielsweise lassen gestaffelte Bruchsysteme (in engem Abstand parallel verlaufende Störungsflächen mit geringen Versatzbeträgen) in klastischen Sedimenten eine eher geringe Durchlässigkeit vermuten. Erhöhte hydraulische Leitfähigkeiten von Störungen finden sich dagegen eher in Verschnittzonen zwischen mehreren Störungen oder bei einer hohen Kluftnetzdicke, die sich an Übersprüngen von Störungen ergibt. So weisen sogenannte Relay-Rampen in Gräben und Halbgräben häufig erhöhte Durchlässigkeiten auf (Rotevatn u. a., 2009).

In einer Studie von Faults & Hinz (2015) wurden im Gebiet des Großen Beckens im Westen

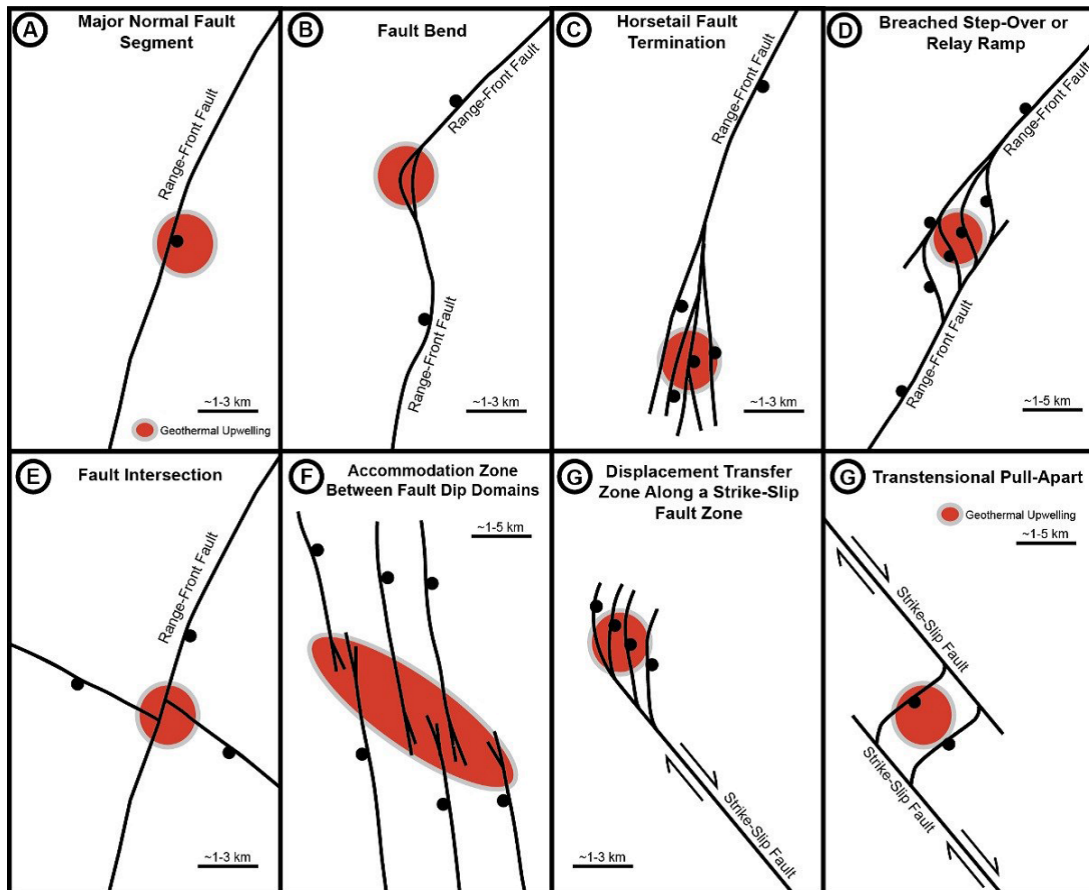


Abb. 8 – Typische Störungsmuster bekannter hydrothermaler Systeme im Gebiet des Großen Beckens im Westen der USA (Faulds & Hinz, 2015). Ähnliche Muster können regional auch in Deutschland erwartet werden.

der USA typische Störungsmuster bekannter hydrothermaler System untersucht und in acht Kategorien unterteilt (Abb. 8). Unter den knapp 250 untersuchten Systemen zeigte sich, dass Relay-Rampen am häufigsten eine höhere Bruchdichte und damit eine erhöhte Permeabilität aufweisen (Abb. 9). Ein erhöhtes geothermisches Potential wurde darüber hinaus auch häufig am Ende von Abschiebungen (insbesondere Horse-Tail-Strukturen) festgestellt. Bei beiden Störungsmustern verursacht die konzentrierte Spannung an den Störungsenden eine Rissausbreitung in das ungestörte Gestein. Gleiches wurde beobachtet, wenn sich zwei Abschiebungen oder eine Abschiebung und eine Diagonalverwerfung kreuzen.

Zu bemerken ist, dass die Studie von Faulds & Hinz (2015) sich ausschließlich auf das Basin-and-Range-Gebiet bezieht, in dem die höchsten Dehnungsraten der Erdkruste weltweit auftreten. Eine Studie über den Zusammenhang zwischen Störungsgeometrien und hydrothermalen Quellen von Curewitz & Karson (1997) kommt nach der Untersuchung geotektonisch sehr unterschiedlicher Regionen zu ähnlichen Ergebnissen: Von 822 untersuchten hydrothermalen Quellen sind 78 % an Störungen gebunden. Dabei sind Störungsenden, Relay-Rampen, Pull-Aparts und Step-Over-Strukturen am häufigsten hydrothermal aktiv. Ähnliche Strukturen sind auch in

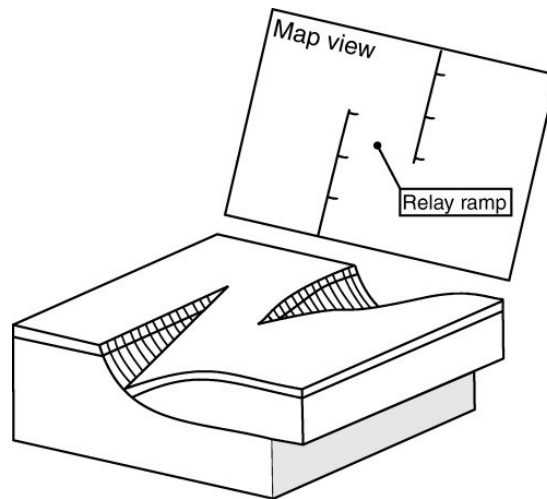


Abb. 9 – Darstellung einer Relay Rampe am Beispiel einer listrischen Abschiebung als Blockbild (nach Larsen, 1988).

Deutschland vorzufinden und eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse sollte untersucht werden. Die Relation zum rezenten Spannungsfeld und die kinematische Entwicklung der Störung sind weitere Faktoren, die die Kluftnetzdicke erhöhen können.

So kann die Störungsgeometrie auch darüber Aufschluss geben, ob sich im Laufe der Entwicklung das Spannungsfeld gedreht hat, was unter Umständen auch zu einer Verbesserung der hydraulischen Leitfähigkeit der betroffenen Störungen geführt haben könnte. Im Oberrheingraben ist z. B. die miozäne Rotation des Spannungsfeldes durch Plattenrandkräfte gegen den Uhrzeigersinn von NNE-Richtung auf die bis heute wirkende NW-Richtung belegt. Sie ist anhand des Übergangs von einem Extensionsregime zu einem sinistralen transtensiven Blattverschiebungsregime durch sich überlagernde Grabenrandstörungen nachvollziehbar. Mit der Dehnung verbunden trat Vulkanismus auf, der sich in den einzelnen Gräben häufte, wie beispielsweise der Kaiserstuhl, der genau an einer Kreuzung zweier Störungssysteme auftrat, der Hauptgrabenrandverwerfung des Oberrheingrabens und dem aus ESE kommenden Bonndorfer Graben.

Im Norddeutschen Becken ist zu beachten, dass das suprasalinare Deckgebirge vom Subsalinar weitgehend mechanisch entkoppelt ist, was zu unterschiedlichen Spannungszuständen führt.

Einfluss von Fluid- und Gesteinseigenschaften auf die Durchlässigkeit von Störungen Der Mineralbestand und die Korngrößenverteilung sowie Verfestigungsgrad haben einen großen Einfluss auf das Bruchverhalten im Bereich von Störungen. In klastischen Sedimenten kann ein hoher Anteil von feinkörnigen und insbesondere tonigen Lagen die Durchlässigkeit von Störungen reduzieren. Bei der Erkundung von Öl- und Gas-Reservoirs wird häufig das sogenannte *Shale Gouge Ratio (SGR)* verwendet, um einzuschätzen, ob ein Fluid eine Störungsfläche quer

zur Streichrichtung passieren kann (Yielding u. a., 1997). Der *SGR* stellt das Verhältnis aus Tonsteinanteil zu Versatzlänge entlang einer Störungsfläche dar und kann damit als ein weiterer Indikator für die hydraulischen Eigenschaften von Störungen verwendet werden:

$$SGR = \frac{\sum xH}{\Delta S}$$

Dabei ist x der Tonanteil in einer Schicht, H die Schichtmächtigkeit und ΔS die Versatzlänge. Yielding u. a. (1997) geben an, dass ab einem Schwellenwert von 0,15 bis 0,20 von einer dichten Störung auszugehen ist. Eine weitere Ursache von reduzierter Permeabilität insbesondere in Sandsteinen mit geringem Tonanteil sind sogenannte Deformationsbänder, die laut Fossen u. a. (2007) vor allem vor der eigentlichen Scherung auftreten, wobei auch das Spannungsfeld, die Versenkungstiefe, der Mineralbestand und die Korngrößenverteilung eine Rolle spielen. Die Durchlässigkeit entlang einer Störung bei hohem Anteil an Tonmineralen im Gestein tendiert auch eher zu geringen Werten, da feinkörnige Tonminerale häufig in die neu entstandenen Porenräume eindringen und diese füllen (Fossen u. a., 2007).

Auch bei Karbonaten gibt es je nach Zusammensetzung und Korngefüge Unterschiede im Bruchverhalten. In der Regel ist Dolomit spröder als Kalkstein, aber auch der Zeitpunkt der Dolomitisierung ist wichtig. Da Dolomit ein geringeres Volumen als Kalziumkarbonat besitzt, können bei der Dolomitisierung Klufträume entstehen, welche sich günstig auf das hydraulische Verhalten der Zerrüttungszone auswirken. Voraussetzung für eine Dolomitisierung ist die Anwesenheit von Magnesium, das mit dem Fluid in eine Gesteinsformation eingetragen wird. Diese Fluidwegsamkeiten entstehen häufig entlang von Störungen und Kluftzonen, so dass sich eine erhöhte Dolomitisierung besonders entlang einer Störung bemerkbar macht. Bei Karbonaten kann außerdem der Fossilienanteil auf die Fazies hinweisen: Riffstrukturen und Riffschutt besteht aus Korallen- und Schwammresten, die bereits eine initial hohe Porosität verursachen und daher beste Speichergesteine darstellen. Zudem kann durch Verkarstung die Durchlässigkeit von Karbonaten in bestimmten Faziesräumen oder entlang von Störungszonen und darin von Kern- und Zerrüttungszonen stark erhöht sein. Einen Überblick über die Rolle der Lithologie auf die Durchlässigkeit von Störungen gibt Abbildung 10.

Fluidzirkulation kann ebenfalls dazu führen, dass Klufthohlräume durch Mineralausfällungen verfüllt und damit abgedichtet werden. Sie kann aber auch bewirken, dass Fluidwegsamkeiten durch Mineralauflösung geweitet werden. Die Richtung der Wasser-Gesteinswechselwirkungen hängt sehr von der Gesteins- und Fluidzusammensetzung und den Druck- und Temperaturbedingungen ab. Entlang aktiver Störungen können Gesteinskörper mit verheilten Brüchen jedoch

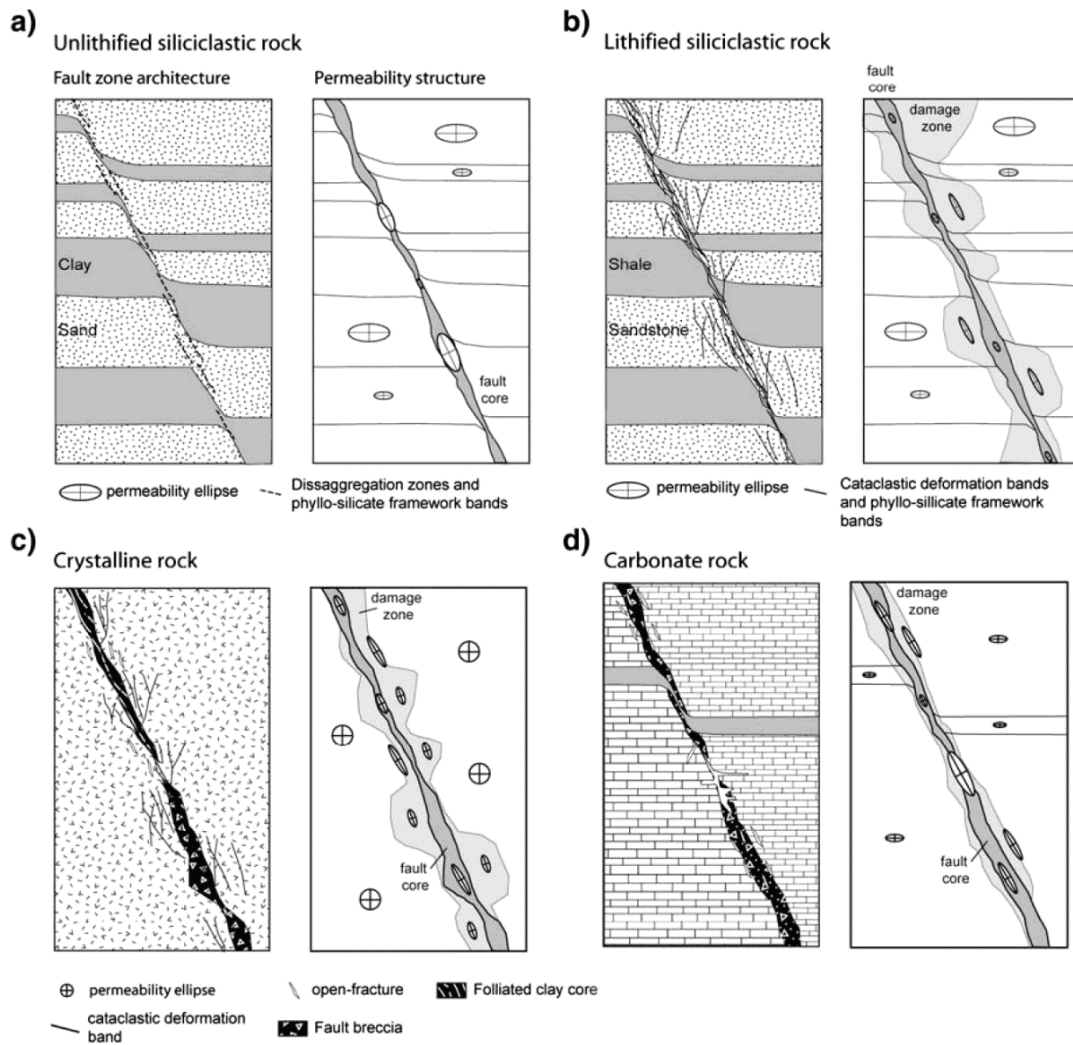


Abb. 10 – Einfluss der Lithologie auf die hydraulische Durchlässigkeit von Störungen: (a) unverfestigte Siliziklastika. (b) verfestigte Siliziklastika. (c) Kristallin. (d) Karbonatgestein (Bense u. a., 2013).

erneut brechen, wodurch wieder neue Fluidwegsamkeiten entstehen, bzw. es nie zu einer vollständigen Verheilung von offenen Kluftzonen kommt, weil diese ständig in Bewegung gehalten werden. Dieser Prozess kann sich zyklisch wiederholen (crack-seal cycle), wodurch sogenannte Riss-Brekzien entstehen können (Ramsay, 1980).

Thermische Anomalien Aufsteigende Tiefenwässer sind in der Regel heißer als das umgebende Gestein und transportieren daher auch Wärme in höher gelegene Untergrundbereiche. Auf diese Weise entstehen positive Temperaturanomalien. Negative Temperaturanomalien können entstehen, wenn bei der Grundwasserneubildung große Mengen meteorischer Wässer lokal in tiefe Untergrundbereiche eindringen. Treibende Kraft ist in der Regel ein hydraulischer Gradient. Freie Konvektion von Tiefenwässern ist in Deutschland vernachlässigbar.

Für den baden-württembergischen Teil des süddeutschen Molassebeckens wurde in einer Studie

von Rühaak u. a. (2010) ein rein konduktives, numerisches Temperaturmodell mit gemessenen Temperaturen verglichen. Dabei zeigte sich, dass Gebiete mit Temperaturen deutlich oberhalb der berechneten Werte häufig räumlich mit Störungszonen korrelieren. Dieses Phänomen kann durch gekoppelten Fluid- und Wärmetransport entlang von Störungszonen erklärt werden. Eine ähnliche Studie von Cherubini u. a. (2014) über Temperaturanomalien in Brandenburg (Norddeutsches Becken) ist zu ähnlichen Ergebnissen gekommen. Allerdings ist der Nachweis, dass eine Temperaturanomalie durch eine permeable Störung in Sedimentgestein verursacht wird, immer schwierig, da auch eine heterogene Verteilung der Wärmeleitfähigkeit im Untergrund die Ursache sein kann. Erst bei sehr hohen Temperaturgradienten von $\geq 60 \text{ K km}^{-1}$ ist davon auszugehen, dass Tiefenwässer entsprechend ihrem hydraulischen Potential an steilstehenden, gut durchlässigen Schichten oder Störungen aufsteigen. Dieser Wert basiert auf der durchschnittlichen Wärmestromdichte von 60 bis 70 mW m^{-2} in Deutschland und der Annahme, dass die Wärmeleitfähigkeit nur selten Werte $< 1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ erreicht.

Weitere Beispiele sind aus der Erschließungsgeschichte von Thermalwässern durch Bohrungen bekannt, wobei zunächst die Untergrundtemperatur großräumig kartiert wurde und darauf aufbauend der Bohransatzpunkt gewählt wurde. Ein Beispiel hierfür sind die beiden Tiefbohrungen auf Thermalwasser in Baden-Baden.

Chemische Anomalien Natürliche Gasaustritte an der Erdoberfläche (z. B. das im Laacher See aufsteigende Kohlenstoffdioxid) oder gemessene Gasanomalien im Untergrund (z. B. Helium, Kohlendioxid oder Radon), können auf Störungszonen hinweisen und ein Indiz für hydraulisch leitfähige Strukturen sein, die von der Oberfläche bis in mehrere Kilometer Tiefe hinab reichen können. Mit neuen Messmethoden, wie sie von Jolie u. a. (2016) vorgestellt und in Nevada (USA) getestet wurden, könnten vermutlich auch in Deutschland neue Erkenntnisse über Störungen gewonnen werden. Allerdings gilt es zu beachten, dass der Aufstieg von Spurengasen wie Kohlenstoffdioxid auch unabhängig von Störungen stattfinden kann. Eine Aufzeichnung des Gasflusses und eine Gegenüberstellung dieses Gasflusses mit dem Störungsmuster würde aber möglicher Weise Strukturen wiedergeben, an denen in der Tiefe Thermalwässer zirkulieren und dabei entgasen. Hydraulisch leitfähige Strukturen wären damit möglicher Weise diagnostizierbar. Aus dem Oberrheingraben sind mehrere Bereiche bekannt, an denen Gase wie Helium oder CO_2 austreten. Ein Teil dieser Gase ist sehr wahrscheinlich über tiefreichende Störungszonen aufgestiegen, da Griesshaber u. a. (1992) anhand der Isotopenzusammensetzung eine Mantelkomponente in diesen Gasen nachweisen konnte. Eine erhöhte elektrische Leitfähigkeit, die sich durch einen höheren Salzgehalt ergibt, kann sowohl ursächlich mit dem Aufstieg von Tiefenwässern an

Störungszonen (z. B. in Ohlsbach, Stober u. a., 1999), als auch z. B. mit Ablaugungsvorgängen an Salzstrukturen verknüpft sein.

Vorgehen Um deutschlandweit eine Klassifizierung der tieferreichenden Störungen vorzunehmen, sollte ein Bewertungssystem entwickelt werden. In Tabelle 1 ist ein Indikatorenkatalog aufgeführt, den es zu erproben und weiter zu entwickeln gilt.

Für diesen Indikatorenkatalog können unterschiedliche Merkmale mit einer Bewertungszahl versehen werden. Je höher die Bewertungszahl, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Störung oder das Störungssegment durchlässig ist. Für die abschließende Beurteilung werden die einzelnen Bewertungszahlen gewichtet und addiert. Dabei sind Indikatoren, denen eine große Aussagekraft zugesprochen wird, gelb unterlegt. Diese sollten daher auch stärker gewichtet werden. Wie die Wichtung der Indikatoren im Einzelnen vorzunehmen ist, kann regional unterschiedlich sein. Es ist davon auszugehen, dass die Wahrscheinlichkeit für eine durchlässige Störung mit der Zahl positiver Indikatoren zunimmt. Umgekehrt bedeutet dies aber auch, dass eine Aussage über das geothermische Potential einer Störung aufgrund nur eines positiven Kriteriums mit sehr großer Unsicherheit behaftet ist.

Tabelle 1 – Indikatorenkatalog für die Durchlässigkeit von Störungen. Bedeutende Indikatoren sind gelb unterlegt.

Indikatoren	untersuchungswürdig	neutral	eher ungeeignet
Ausrichtung zur heutigen max. Hauptspannung (σ_1)	± 20 bis 40° (konjugiert), Parallel zu σ_1 und senkrecht zu σ_3	$< 20^\circ$ oder $> 40^\circ$ (konjugiert)	$\geq 70^\circ$ (konjugiert)
Störungsgeometrie	vernetzte Störungen: Relay-Rampe, Horse-Tail / Störungsende, Transstensionszone, kreuzende Abschiebungen	singuläre Abschiebung, Aufschiebung, Überschiebung	Staffelbruch
Diagenese	Verkarstung, Lösung	tiefenabhängige Kompaktion	Zementation d. Mineralausfällung, Salzintrusion
Thermische Anomalien	$\delta T / \delta z \geq 60 \text{ K km}^{-1}$ entlang tieferreichender Störungen	$\delta T / \delta z$ 25 bis 60 K km^{-1} entlang tieferreichender Störungen	$\leq 25 \text{ K km}^{-1}$ entlang tieferreichender Störungen
Gestein primär	Trümmergestein (Brekzie), sprödt, fest, Klüfte (Zerrüttungszone)	Feinkörnige Brekzie, Klüfte und Haarrisse	Kataklastit, (Kernzone), Haarrisse, SGR $> 0,15$ f. klast. Sed.
Deformationsverhalten des Ausgangsgesteins	kompetent	inkompetent/kompetent	inkompetent
Alter	jung, rezente (Re-)Aktivierung		alt
Geochemie	He und CO_2 magmatischen Ursprungs, Radongehalte, hohe Salzkonzentration in Grundwasser		

Die Unterteilung eines Störungssystems in unterschiedlich zu bewertende Segmente sollte sich an der Störungsgeometrie und an der Ausrichtung zur maximalen Hauptspannung orientieren. Eine Bewertung der Lithologie einschließlich möglicher Karsteigenschaften oder Zementierungen sollte sich auf die für die Tiefengeothermie relevanten Tiefenbereiche beschränken. Für die Beurteilung der Störungsausrichtung zum Spannungsfeld sollte die regional ideale Streichrichtung für Deutschland kartiert werden (Polygonarstellung). Störungsgeometrien können aus guten

strukturgeologischen Karten (nicht generalisiert) abgelesen werden. Relevante Parameter der Lithologie können anhand von Aufschlüssen und Kernproben bestimmt werden. Thermische Anomalien können mit dem 3D-Temperaturmodell in *GeotIS* bestimmt werden. Welche chemischen Anomalien genügend Aussagekraft besitzen, um von einer wahrscheinlich durchlässigen Störung auszugehen, ist Gegenstand der Forschung.

Eine Klassifikation von Störungen ist auf dieser Grundlage möglich. Sie könnte vermutlich noch weitere Abstufungen im Sinne von *sehr untersuchungswürdig* und *mäßig untersuchungswürdig* ermöglichen. Für die Erprobung dieses Schemas sollten fünf Kategorien zunächst ausreichen.

6.2 Systematische Erfassung und Erkundung von tiefreichenden Störungen für die geothermische Energienutzung in SW-Deutschland

6.2.1 Geologische Untersuchungen, Untersuchungen an Störzonen

Im Rahmen des Projektes erfolgte zunächst eine Zusammenstellung und Auswertung geologischer, hydraulischer, hydrochemischer, geochemischer und geomechanischer Daten aus der regionalen und überregionalen Literatur zu Beschreibungen von Störungen. Daneben wurden Störungen, die in Schichtenverzeichnissen von Tiefbohrungen im Oberrheingraben und Südwestdeutschen Molassebecken beschrieben sind, im Detail analysiert. Entsprechend wurden Tunnel- oder Bergbaumaßnahmen und Stollen in Südwestdeutschland, die Gebirgsabschnitte mit intensiver Klüftung bzw. Störungszonen durchfahren haben, untersucht. Besonderes Augenmerk wurde hierbei auf die Kernzone und den sog. Damage-Bereich von Störungen gelegt. Im Detail wurde auch untersucht, wo Wasserzutritte im Umfeld von Störungen beobachtet wurden. Es erfolgte zudem eine Identifikation von relevanten Hauptstörungen im Oberrheingraben mit Versatzbeträgen ab mehreren Zehnermetern in den im Rahmen der Projekte *GeotIS* und *GeoTool* interpretierten seismischen Sektionen. Anhand dieser Sektionen wurden Strukturen mit Hinweisen auf Extensions- bzw. Transtensionsstrukturen identifiziert bzw. überarbeitet. Viele dieser Ergebnisse sind in den gemeinsam mit den Verbundpartnern erstellten Abschnitt 6.1 eingeflossen.

Im Projekt wurden tiefreichende Störungszonen im Oberrheingraben vor dem Hintergrund einer potentiellen geothermischen Nutzung untersucht und charakterisiert. Als geothermische Nutzhorizonte kommen in erster Linie die Reservoirgesteine des kristallinen Grundgebirges, Einheiten des Buntsandsteins und des Muschelkalks in Frage.

Um Informationen über Störungszonen in größerer Tiefe im ORG zu erhalten, bieten sich ehemalige **Bergwerksstollen** des Schwarzwaldes an, da hier das Gebirge besser vor Alteration ge-

schützt ist als Aufschlüsse in Steinbrüchen. In Bergwerken treten die gleichen Reservoirgesteine in erreichbaren Teufen auf wie in wesentlich größeren und damit nicht ohne weiteres erreichbaren Tiefen im Oberrheingraben. Auch ist eine großräumigere Betrachtung von Störungszonen als an Bohrkernen möglich, die eher nur Punktinformationen liefern.

Auswahlkriterien für ein Bergwerk waren wegen der geothermischen Reservoirs in SW-Deutschland zuerst dessen Rahmengestein. In Frage kommen Granite, Gneise, Sandsteine des Buntsandsteins und Kalksteine des Muschelkalks. Im Schwarzwald gibt es zahlreiche Bergwerke im Gneis des kristallinen Grundgebirges. Wegen der mineralogischen Ähnlichkeiten von Granit und Gneis wurde daher ein Bergwerk im Gneis ausgewählt. Im Buntsandstein gibt es im Nord-schwarzwald einige Bergwerke, ebenso eines im Muschelkalk. Essentiell ist selbstverständlich das Auftreten von Störungszonen in den Bergwerken. Abbildung 11 zeigt eine Auswahl an Bergwerken, die für eine genauere Betrachtung innerhalb des Projekts *StörTief* in Frage kamen. Die detaillierten Erhebungen und Ergebnisse sind in Anlage 1 beschrieben.

Erz- und Mineralgänge im Schwarzwald kommen im kristallinen Grundgebirge als auch in den hauptsächlich aus Sandstein bestehenden Gesteinen des Perm und der Trias vor. Die Gesamtzahl der Gänge mit, aber auch ohne, Erzführung wird auf mehrere Tausend angenommen. Wirtschaftliche Bedeutung erlangten ca. 400 bis 500 Erzgänge (Werner & Dennert, 2004). Nahezu alle Erzführenden Gänge sind hydrothermal entstanden. Magmatisch oder metamorph entstandene Gänge sind sehr selten (Markl, 2004). Zu den magmatisch entstandenen Mineralisationen gehören Vorkommen von Nickel-Eisensulfid, pegmatische und pneumatolytische Zinn- und Wolfram Anreicherungen innerhalb von Graniten und Quarz-Turmalingängen. Der Bergbau im Schwarzwald konzentrierte sich auf die Gewinnung von Silber, Blei, Eisen, Baryt und Fluorit, aber teilweise auch Kupfer, Kobalt und Antimon (Werner & Dennert, 2004).

Die dominierenden Gangarten im Schwarzwald sind Quarz, Baryt und Fluorit sowie zu Beginn und Ende der Mineralisationsphasen karbonatische Ablagerungen aus Calcit, Dolomit und Siderit (Bliedtner & Martin, 1986; Markl, 2004; Werner & Dennert, 2004). Fluorit- und Karbonatmineralisationen sind im weiteren Verlauf der hydrothermalen Aktivität wieder gelöst worden. Diese Gangarten sind daher weniger oft anzutreffen. Die Fluidzusammensetzung, die zu den Vererzungen im Schwarzwald führte (Markl, 2004), unterscheidet sich nicht von den heute im ORG auftretenden Wässern (Stober & Bucher, 2014). Hauptsächlich kommen Na-Cl- und Ca-Cl-Fluide vor, mit geringer Konzentration von Mg, Fe, K und andere erzbildende Elemente wie eine ganze Bandbreite an Metallen (Pb, Zn, Cu und Fe sowie Ba, S, F, Wo).

Für die Reservoirgesteine in den drei stratigraphischen Einheiten des Oberrheingrabens wurden

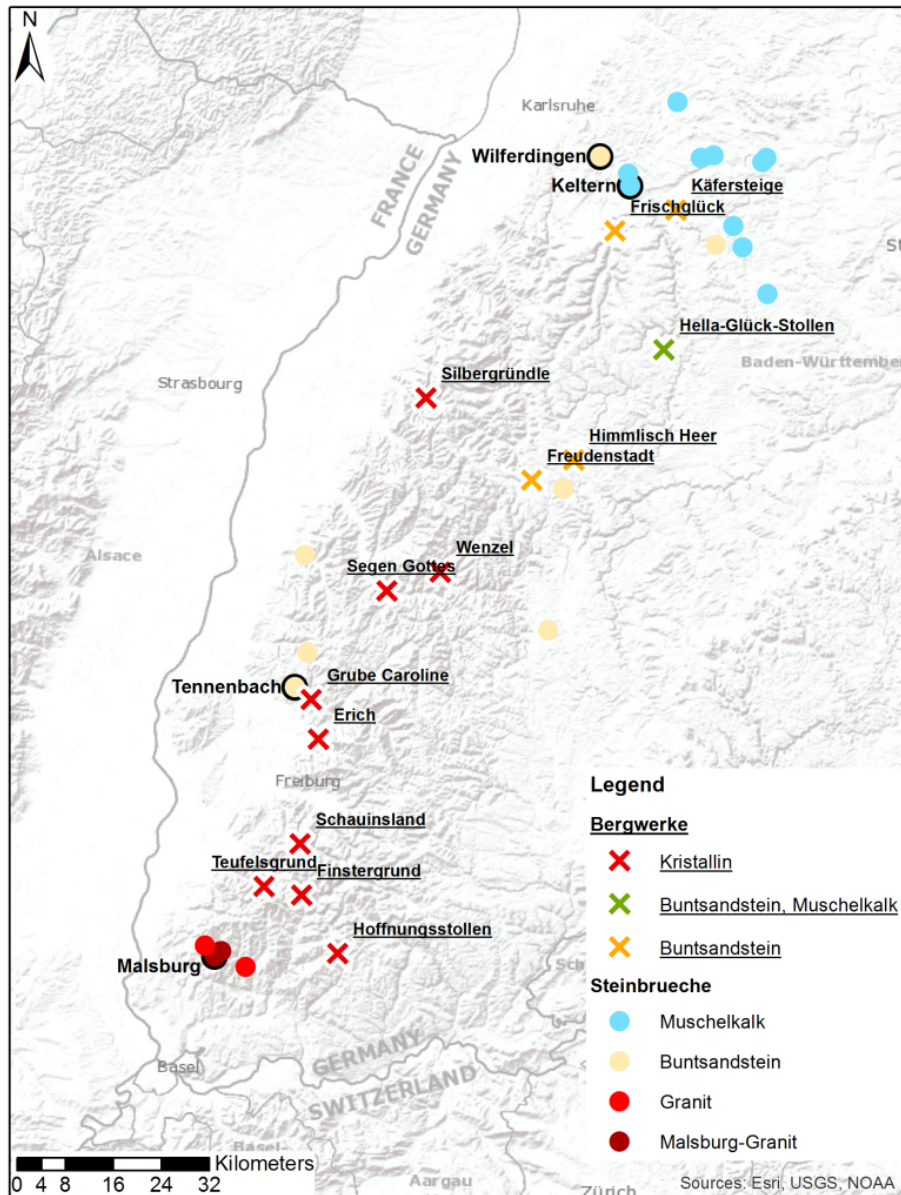


Abb. 11 – Auswahl an Bergwerken im Schwarzwald.

mehrere Bergwerke ausgewählt und die dort vorkommenden Störungszone untersucht. Leider konnten keine Störungszone in Bergwerken im Buntsandstein und Muschelkalk für Untersuchungszwecke angetroffen werden (Anl. 1). Die Hauptschwierigkeit besteht darin, dass der Bergbau sich i. d. R. entlang von Störungszone vollzog und somit der Störungskern inklusive der Damage-Zone zusammen mit den dort vorkommenden Erz- und Mineralgängen abgebaut wurde. Für das kristalline Grundgebirge konnte das ehemalige Fluorit- und Baryt-Bergwerk Teufelsgrund, südöstlich von Münstertal im Südschwarzwald, ausgewählt werden. Das Rahmengestein besteht aus Paragneis. Im vorderen Bereich des zugänglichen Ganges wird der Gneis durch einen mehrere Meter mächtigen Porphyrgang durchschlagen. In beiden Gesteinen kommen Störungszone vor, wobei sowohl vererzte als auch nicht vererzte Zone in beiden Lithologien vorhanden

sind.

Im Bergwerk Teufelsgrund ist der Friedrichstollen mit einer Gesamtlänge von ca. 600 m für Besucher zugänglich (Abb. 12). Der längste Bereich des Friedrichsstollens befindet sich in Gneis. Hierbei handelt es sich um einen Biotit-Gneis aus dem Zentralschwarzwälder Gneiskomplex (Hann & Sawatzki, 2000). Als Mineralphasen kommen, sortiert nach abnehmendem Volumenanteil Quarz, Alkalifeldspat, Biotit und Plagioklas vor (Hartung, 2015). Im Bereich 160 bis 200 m vom Stolleneingang durchschlägt der ca. 40 m mächtige Porphyrgang den Gneis. Ein weiterer dünner (ca. 3 m) Porphyrgang ist im Bereiche 230 m anstehend. Lithologisch handelt es sich hierbei um einen Granit zusammengesetzt aus Kalifeldspat, Quarz, Glimmer und Plagioklas in einer mikrokristallinen Matrix (Hartung, 2015). Im Friedrichstollen des Bergwerkes Teufelsgrund wurden im Zuge des Projektes *StörTief* verschiedene Untersuchungen zur geomechanischen, hydraulischen und geochemisch-mineralogischen Charakterisierung von Störungszonen durchgeführt (Anl. 1, 4, 5, 6).

Zusätzlich wurden geologische Untersuchungen und Auswertungen von in Schichtenverzeichnissen von **Tiefbohrungen** beschriebenen Störungszonen aber auch an Bohrkernmaterial vorgenommen. Das umfangreichste und beste Datenmaterial von Tiefbohrungen liegt von den Bohrungen in Soultz-sous-Forêts vor, die die wichtigsten Reservoirgesteine im Oberrheingraben durchteuften. Außerdem wurden uns freundlicherweise sämtliche Berichte sowie Gesteinsmaterial von GEIE Exploitation Minière de la Chaleur (GEIE, Dr. A. Genter) für das Projekt zur Verfügung gestellt. Daneben haben wir uns jedoch auch andere Bohrungsdaten, u.a. die vollständig gekernte Forschungsbohrung Kraichgau angeschaut, die uns freundlicherweise vom LGRB (Regierungspräsidium Freiburg) zur Verfügung gestellt wurde. Nachstehend werden die Ergebnisse der Bohrung EPS-1 von Soultz-Sous-Forêts beschrieben, da diese Bohrung drei Störungsbereiche in drei unterschiedlichen Lithologien durchteuft: ein etwa 20 m mächtiger Bereich innerhalb des Muschelkalks, eine Störungzone im Buntsandstein und mehrere kleinere Störungszonen im Granit. Die ausführliche Auswertung ist in Anlage 2 enthalten.

Die Störungzone im Muschelkalk ist brekziös ausgebildet und die Zwischenräume zwischen den Kataklassen mit Tonmineralen und Gesteinsmehl verfüllt. Dadurch ist die Störung größtenteils dicht und nicht hydraulisch aktiv. An dieser Störungzone ist keine Alteration festzustellen (Abb. 13). Die Störungzone im Buntsandstein zeigt deutliche Anzeichen für eine phasenweise hydraulische Aktivität. Zum einen findet sich in den Bereichen Alteration, die durch eine Fluidzirkulation begünstigt wurde, zum anderen wurden entlang der offenen Klüfte sekundäre Mineralien wie Baryt, Kalzit und Quarz ausgefällt. Weiter zeigt der Porenzwischenraum eine Zementation von Quarz, welche zu einer Verringerung der Porosität sowie Permeabilität und

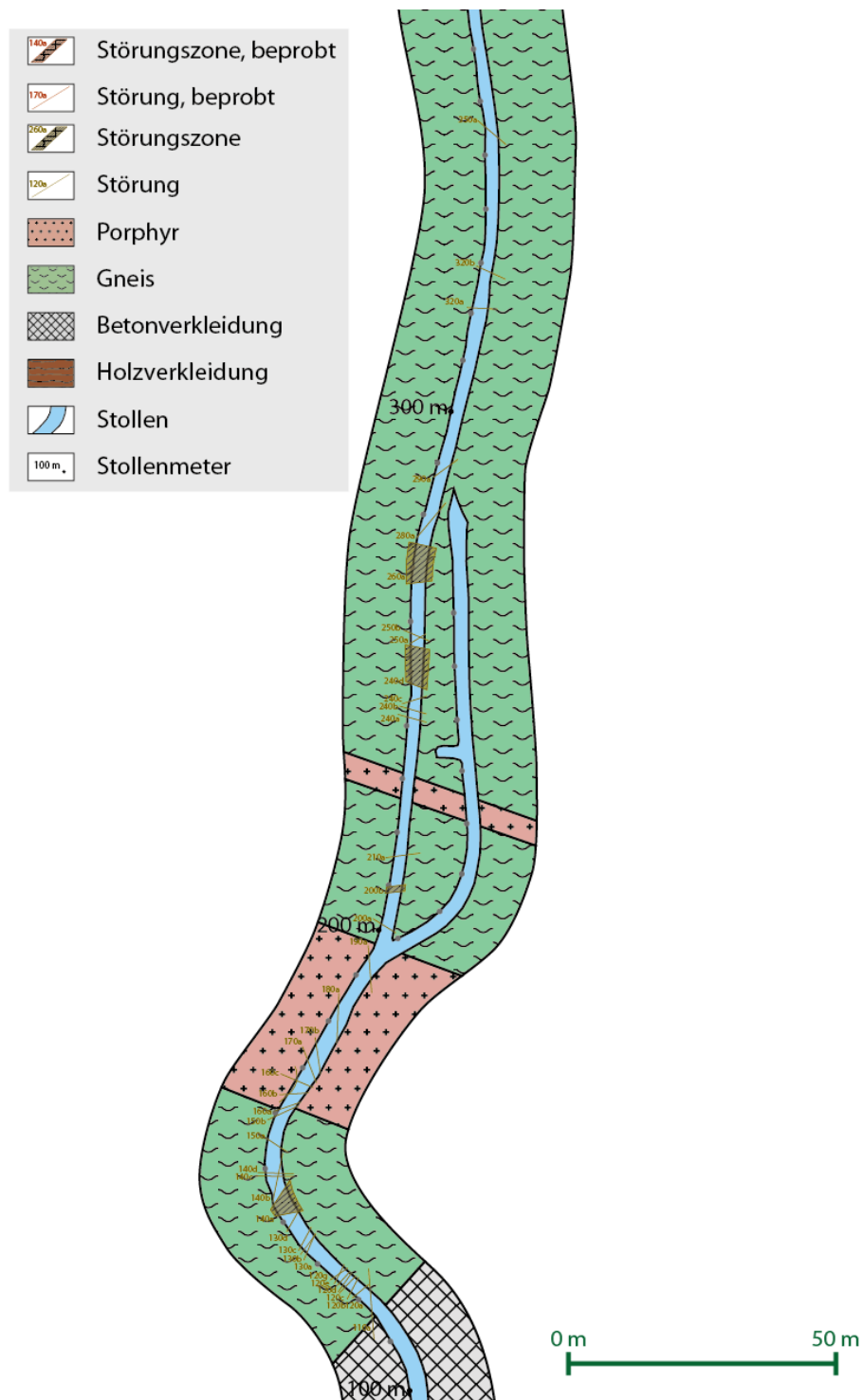


Abb. 12 – Grundriss des Friedrichstollens im Bergwerk Teufelsgrund (Hartung, 2015).

einer Erhöhung der Schallgeschwindigkeit führt. Anhand von Dünnschliffaufnahmen und Geschwindigkeitsmessungen konnte eine Korrelation zwischen Porosität und Schallgeschwindigkeit hergestellt werden.

Somit hat sich gezeigt, dass trotz der fossilen hydraulischen Aktivität der Störungszone, durch Ausfällung eine deutliche Reduktion der primären Kluftporosität erfolgte. Die Mineralisation führte zu einem erneuten Verfestigen der Kataklasten, das trotz bestehender Klüfte zu einem mechanisch festen Gestein innerhalb der Störungszone führt. Eine mehrphasige Aktivität der Störungszone zeigt, dass sich in der Bildungsgeschichte Parameter geändert haben. Ein bedeutender Parameter hier ist das Spannungsfeld, das sich durch die Alpenbildung und die phasenweise Öffnung des Oberrheingrabens geändert hat. Durch erhöhte Scherkräfte auf den Störungsflächen konnten diese reaktiviert werden und erneut Fluid zirkulieren, das zu Ausfällungen geführt hat. Solch eine Reaktivierung ist auch an den Störungsstellen im Granit festzustellen. Diese sind nicht so gut lokalisierbar, da sie als Bereich mit einer erhöhten Kluftdichte in Erscheinung treten und die Störungsfläche in den Kernen nicht gut detektiert werden kann. Es zeigt sich jedoch auch, wie im Buntsandstein eine mehrphasige hydraulische Aktivierung anhand von Mineralausfällungen erfolgte.

Die **Fluid-Durchlässigkeit** von Störungsstellen ist ein wichtiger Parameter zur Charakterisierung und letztendlich Nutzung von Störungsstellen für die geothermische Energieerzeugung. Die Unterschiede der Permeabilität zwischen unalteriertem Rahmengestein und Störungsstellen sind zum Teil erheblich. Im Rahmen dieses Projektes wurden Labormessungen der Permeabilität unalterierter Reservoirgesteine durchgeführt. Diese sollten mit Messungen an natürlichen Störungsstellen und an in Laborexperimenten alterierten Proben verglichen werden.

Die Permeabilität K nach dem Darcyschen Gesetz gibt die Durchlässigkeit in m^2 an. In Laborexperimenten ist sie abhängig von der Fließrate Q [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$], der dynamischen Viskosität des Fluids η [Pa s], der Länge der durchströmten Gesteinsprobe l [m], der durchströmten Querschnittsfläche des Körpers A [m^2] und der Druckdifferenz Δp [Pa] innerhalb des Gesteins. Die Durchlässigkeit kann auch durch den Durchlässigkeitsbeiwert/hydraulische Leitfähigkeit k_f [m s^{-1}] beziffert werden.

Durchlässigkeitsuntersuchungen wurden für alle vier ausgewählten Lithologien durchgeführt. Die Untersuchungen und Ergebnisse sind ausführlich in Anlage 3 beschrieben. Für den Pfingsttäl Sandstein ergeben sich Mittelwerte für die Permeabilität von $\log k_{f10\varnothing} = -9,53 \text{ m s}^{-1}$ bzw. von $\log K_{\varnothing} = -1,52 \text{ mD}$. Der Tennenbacher Sandstein hat eine mittlere Durchlässigkeit von $\log k_{f10\varnothing} = -8,40 \text{ m s}^{-1}$ bzw. $\log K_{\varnothing} = -0,39 \text{ mD}$. Für den Keltener Kalkstein und den

EPS-1 Störungszone im mittleren Muschelkalk (937 m - 955 m)

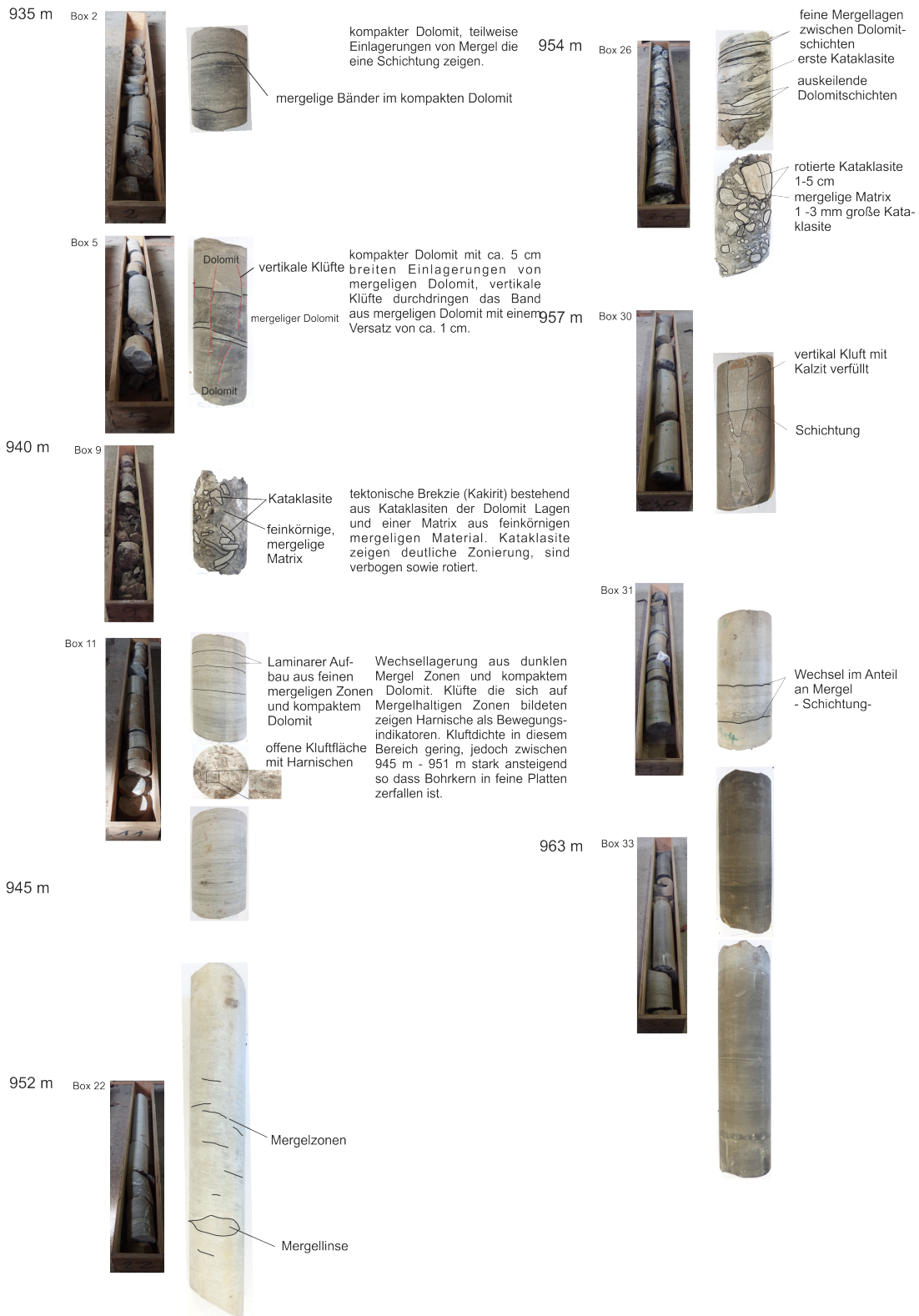


Abb. 13 – Beispiel für eine Störungszone im Muschelkalk (EPS-1 Bohrung Sultz-sous-Forêts).

Malsburg Granit können lediglich jeweils die Werte von $\log k_{f10\varnothing} < -10,1 \text{ m s}^{-1}$ bzw. von $\log K_{\varnothing} < -2,1 \text{ mD}$ angegeben werden (Abb. 14).

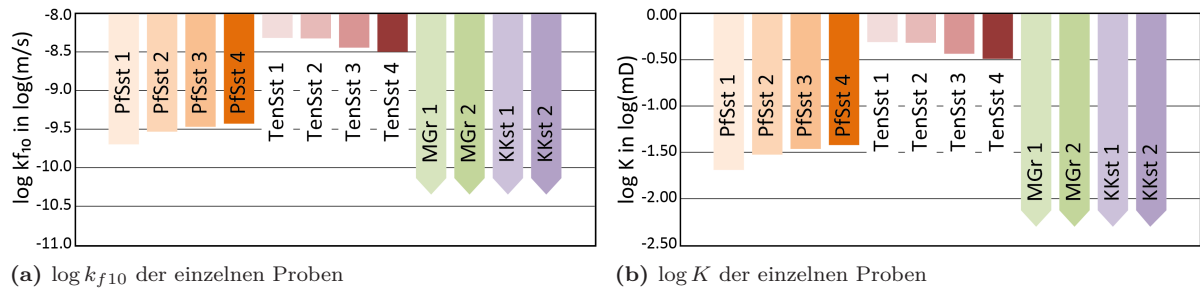


Abb. 14 – Permeabilitäten und hydraulische Leitfähigkeit ungestörter Proben, die typische Reservoiregesteine in SW-Deutschland darstellen.

Die gemessenen Permeabilitäten des Tennenbacher Sandstein liegen im Bereich der im Oberrheingraben angetroffenen Messwerte von Bohrkernen aus dem Buntsandstein (Jodocy & Stober, 2011). Dagegen sind die geringeren Durchlässigkeiten des Pfinztäler Sandsteines unterhalb derer im Oberrhein gemessenen Werte (Abb. 15). Allerdings sind die in (Jodocy & Stober, 2011) berücksichtigten Gesteinsformationen im Hinblick auf mögliche Reservoire der Kohlenwasserstoffindustrie mit erhöhten Poro-Perm-Werten ausgewählt worden. Der kompakte, Poren-arme Pfinztäler Sandstein, mit relativ hohem Muscovit-Anteil, ist jedoch in Bezug auf die Matrix-Durchlässigkeit nicht als typisches Reservoir-Gestein bei der Erdölindustrie anzusehen.

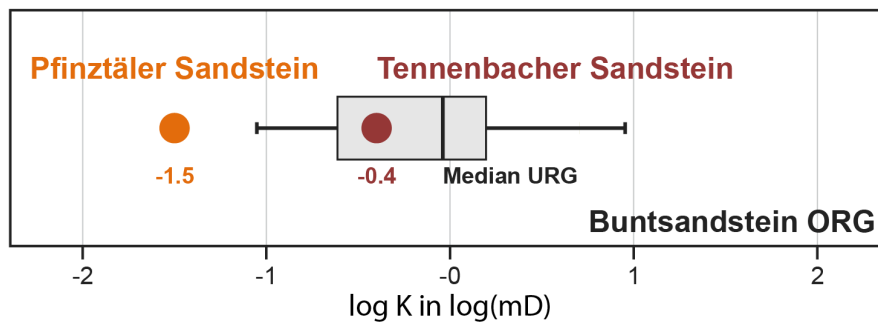


Abb. 15 – Permeabilität des Buntsandsteins im ORG (Jodocy & Stober, 2011) im Vergleich zu Werten des Pfinztäler und des Tennenbacher Sandsteins.

Messungen von Fluiddurchlässigkeiten an natürlichen Störungszonen in tiefen Reservoiregesteinen sind nur eingeschränkt möglich. Jedoch können in Bergwerken Störungszonen unter Tage untersucht werden, ohne dass sie der Witterung ausgesetzt sind. Zwar ist die Variabilität von Störungszonen sehr groß, z. B. Breite der Störungszone, Störungsfüllung, Rahmengestein, Fluidzusammensetzung, u. v. a., jedoch können exemplarische Untersuchungen zu einem besseren Verständnis von Störungszonen in Bezug zur geothermischen Nutzung einen wichtigen Beitrag liefern.

Im Bergwerk Teufelsgrund konnte eine geeignete Störungszone für Fluid-Durchlässigkeitsuntersuchungen angetroffen werden. Grundsätzlich können Versuche in zugänglichen Bergwerken nur unter der Maßgabe durchgeführt werden, dass das Bergwerk keine größeren "Beschädigungen" erfährt. Aus diesem Grund war es uns nicht möglich, größere Umbauten oder Bohrmaßnahmen auf der Stollensohle durchzuführen, und wir waren daher mit unseren Versuchen auf die Durchführung in Bohrungen an Stollenwänden angewiesen. Schwierigkeiten bei der Abdichtung der Messapparatur zur Störungszone hin verhinderten jedoch wahrscheinlich auch aufgrund der erhöhten Durchlässigkeit der Störungszone eine wirksame Abdichtung bei den Tests, so dass leider eine erfolgreiche Messung der Permeabilitäten der Störungszonen im Bergwerk Teufelsgrund trotz intensiver Bemühungen nicht gelang (Anl. 4). Allerdings haben die Versuche damit auch gezeigt, dass die Durchlässigkeit in der Damage-Zone der Störungszone ein Vielfaches des Wertes des ungestörten Gebirges aufweist.

Dieser Umstand wird beispielsweise auch in der Mineralwassererschließung im Schwarzwald-Kristallin genutzt. Mineralwasserbohrungen werden auf Störungszonen angesetzt und durchteufen diese. Die eigentliche Wassererschließung erfolgt dort dann aus Wässern, die in der Damage-Zone zirkulieren. Ebenso wurde beispielsweise die Thermalwasserbohrung Freiburg mit Erfolg auf eine Störungszone im Oberen Muschelkalk angesetzt. Auch natürliche Thermalwässer wie Bad Säckingen, Baden-Baden oder Ohlsbach nutzen die Damage-Zone als Aufstiegswege (Stober, 1995; Stober u. a., 1999). Beispiele hierzu werden in Abschnitt 6.1 (gemeinsamer Teil) präsentiert.

Anhand von Image-Logs kann das Reservoir struktureologisch sowie geomechanisch beschrieben werden. Hier untersuchten wir an den Bohrungen des Geothermie-Projektes Sauerlach die Klüftung und interpretierten Spannungsindikatoren, die mittels Inversion das lokale Spannungsfeld beschreiben (Anl. 11). Dies zeigte eine mögliche lokale Spannungsanomalie in der Bohrung Sauerlach Th1, welche struktureologisch auf eine ausgedehnte Strike-Slip Störungszone hindeutet. Die beiden anderen Bohrungen Sauerlach Th2 und Th3 wiederum zeigen deutliche Ähnlichkeit im Spannungsregime sowie in der Kluft Population. Anhand von hydraulischen Testdaten in den drei Bohrungen konnte ein unterschiedliches Fließregime festgestellt werden: Ein Störungsgeländes in der Th1 und ein mehr oder weniger radiales in der Th2 und Th3. In wie weit das Spannungsfeld die Klufthydraulik beeinflusst ist in Anlage 11 genauer erläutert.

Durch tektonische Deformationen können die mechanischen Parameter im Umfeld von Störungszonen im Vergleich zu dem Ausgangsgestein deutlich verändert sein (vgl. Abb. 3 in Abschnitt 6.1). Zur Beschreibung dieser Veränderung und als Proxy zur Permeabilitätsänderung entlang einer Störungszone wurden in dem Bergwerk Teufelsgrund Schmidhammermessungen

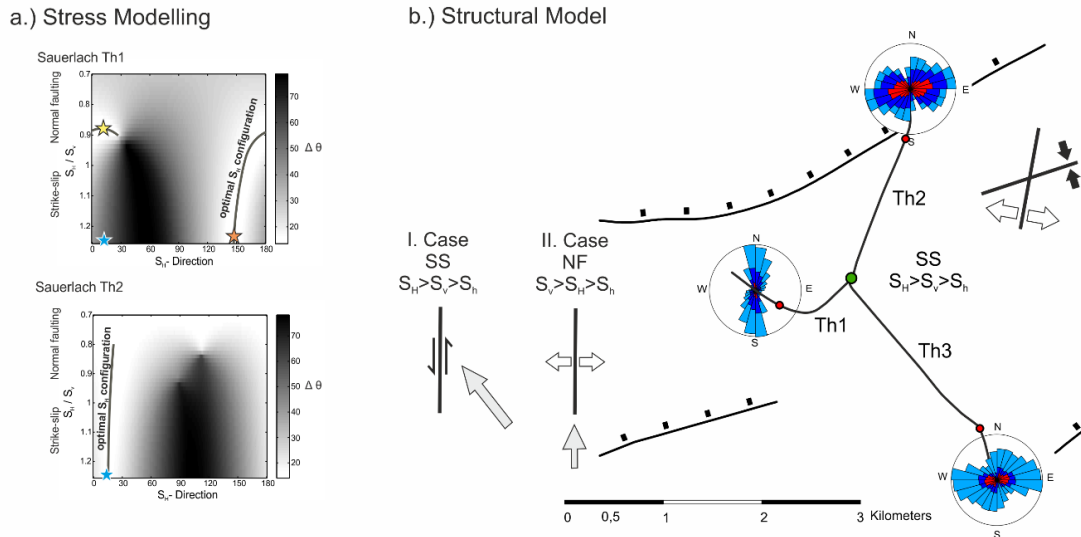


Abb. 16 – (a) Darstellung des modellierten mis-fits ($\Delta\theta$) zwischen den beobachteten und modellierten Spannungsindikatoren. Die Ergebnisse zeigen ein variiertes Spannungsregime von einem Abschiebungs- zu einem Strike-Slip Spannungsregime ($S_H = 0,7$ bis $1,25 S_V$). (b) Untersuchungsgebiet mit der Lage der bekannten Störungen, Verlauf der Bohrungen und Darstellung der Terzaghi-korrigierten Klufitdaten in einem Rosendiagramm.

durchgeführt. Mittels dieser Messungen kann die **Gesteinsfestigkeit** abgeschätzt werden. Wir führten diese Messungen über eine **Störungszone** im Bergwerk Teufelsgrund durch.

Bei dieser Messung wird ein Bolzen mit einer Feder gegen das Gestein geschlagen. Nach dem Aufprall wird die Rückprallenergie gemessen. Umso fester das Gestein umso weniger Energie wird durch das Gestein absorbiert und der Bolzen wird mit einer größeren Rückprallenergie zurückgeschleudert. Entlang der Bergwerkswand in der Grube Teufelsgrund wurde ein Profil über die bereits oben beschriebene Störungszone (Abb. 12, 17) hinweg gemessen. Da die Störungszone in einem Winkel von 30° zum Tunnelgang (Messprofil) verläuft mussten die Messwerte im Anschluss entsprechend korrigiert werden. Entlang des Profils entfernt man sich somit immer weiter von der Störungszone und man bekommt eine Abschätzung wie sich die Materialparameter im Umfeld einer Störung verändern. Es hat sich gezeigt, dass umso weiter man sich von der Störung entfernt das Gestein steigende Rückprallwerte aufweist. Im Störungskern selbst konnten aus materialtechnischen Gründen keine Messungen durchgeführt werden.

Anhand der statistischen Auswertung konnte eine Zonierung der Messwerte in einen stark beanspruchten Bereich mit einer relativ geringen uniaxialen Druckfestigkeit (UCS) und E-Modul und einen weniger stark beanspruchten Bereich mit einem relativ hohen UCS- und E-Modul festgestellt werden. Unsere Vermutung, dass mit steigendem Abstand von der Störungszone die Festigkeit und der E-Modul zunehmen, konnte bestätigt werden (Abb. 17). Mit unseren Untersu-

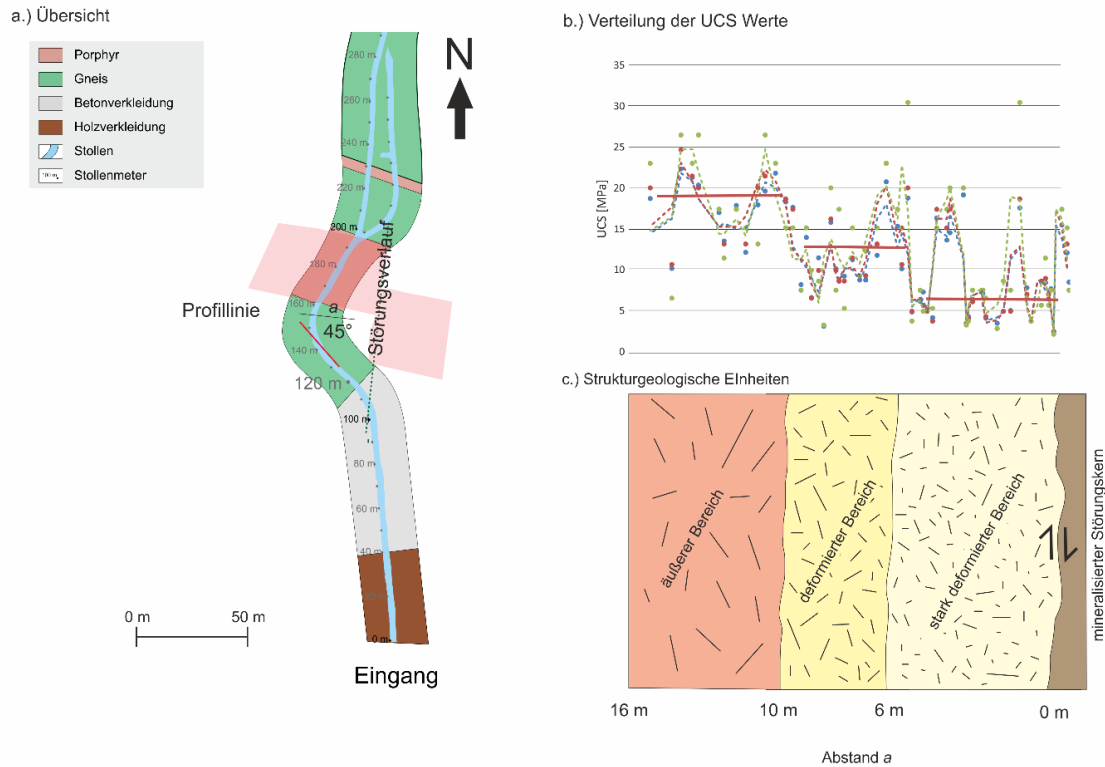


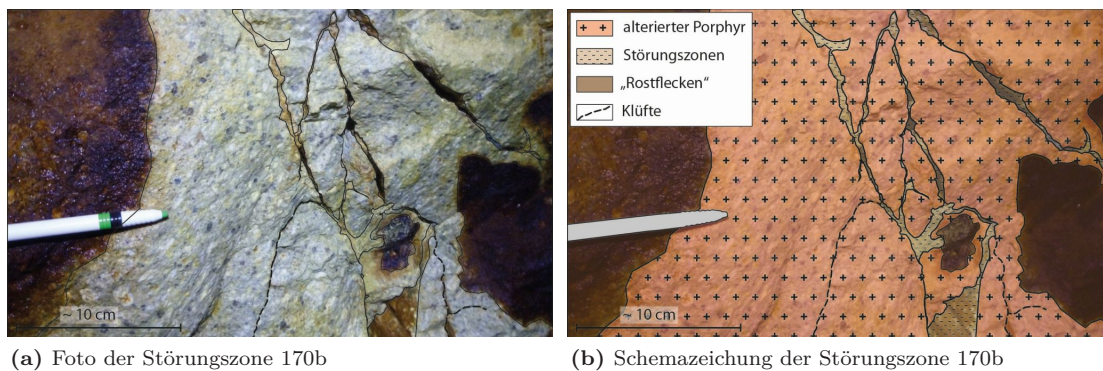
Abb. 17 – (a) Bergwerksskizze mit Verlauf der Störungszone (grün gestrichelt) und der dazugehörigen Profillinie (rot); der Bereich mit Betonverkleidung endet bei Laufmeter 117 m (nach Hartung, 2015). (b) Messprofil mit Verteilung der uniaxialen Druckfestigkeit (UCS). (c) Strukturgeologische Einheiten.

chungen konnten somit vom mehr oder weniger unbeanspruchtem in stark deformiertes Gebirge (Randbereich des Störungskerns) eine Abnahme des UCS-Wertes auf weniger als ein Drittel des Ausgangswertes sowie eine Abnahme des E-Moduls um etwa das 2,4-fache des Ausgangswertes gezeigt werden. Der ausführliche Bericht ist in Anlage 5 vorhanden.

Im Folgenden untersuchten wir die Störungszone im Bergwerk Teufelsgrund (Abb.12) **mineralogisch-geochemisch**, um die Abhängigkeit des Fließverhaltens von hydrothermalen Fluiden innerhalb der **Störungszone** mit der Mineralvergesellschaftung zu erfassen. Damit sollen Hinweise zur Genese der Störungszone erhalten werden und ggf. Vergleiche mit den Ergebnissen der Autoklav-Versuche aufgezeigt werden. Außerdem dienen diese Untersuchungen dazu, den komplexen Aufbau von Störungszone zu erfassen, und mit anderen Untersuchungsbefunden aus der Störungszone zu vergleichen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Anlage 6 ausführlich beschrieben und flossen auch in Abschnitt 6.1 (gemeinsamer Abschnitt) ein.

Die tonhaltigen Proben aus den Störungszone des Bergwerks Teufelsgrund (Abb. 18, 19) wurden mit Methoden der tonmineralogischen Charakterisierung untersucht. Dies beinhaltet die Bestimmung der Kationenaustauschkapazität mit der anschließenden Messung der Kationen,

Röntgendiffraktometrie an Pulver- und Texturpräparaten. Die Untersuchungen wurden am Institut für Funktionelle Grenzflächen (IFG) des KIT durchgeführt.



(a) Foto der Störungszone 170b

(b) Schemazeichnung der Störungszone 170b

Abb. 18 – Dünne Störungszone (170b) im Porphyr des Bergwerks *Teufelsgrund*.

Der mineralogische Aufbau der untersuchten Störungszone im Bergwerk Teufelsgrund zeigt eine modale Zunahme von Schichtsilikaten vom randlichen Rahmengestein der Störung über die äußeren Bereiche mit stark alteriertem Rahmengestein, hin zu den zentralen Bereichen der Störung. Bei der Störungszone im Porphyr kommt vor allem Kaolinit vor. Dagegen herrscht in den Störungszone im Gneis Chlorit als Schichtsilikat vor. In allen zentralen Bereichen der Störungszone ist Gips vorhanden. Zusätzlich sind die Störungfüllungen im Rahmengestein Gneis geprägt von karbonatischen Mineralphasen. Es wurden sowohl Calcit als auch Dolomit und Siderit angetroffen. Zusätzlich zu den genannten Hauptgemengteilen der Störungfüllungen kommen in einzelnen Proben Apatit, Chalkopyrit und Zinn vor. Das Vorkommen weiterer (Erz-) Phasen kann nicht ausgeschlossen werden bzw. ist wahrscheinlich.



(a) Foto der Störungszone 200b

(b) Detailaufnahme der Störungszone 200b

Abb. 19 – Dünne Störungszone (200b) im Gneis des Bergwerks *Teufelsgrund*.

Im Vergleich zwischen den natürlichen Störungszonen und zu den Autoklavexperimenten (Anl. 8.1 – 8.3) mit dem Malsburg Granit können primär nur wenige Gemeinsamkeiten beobachtet werden. So konnten in den Autoklavexperimenten zwar ebenfalls Chlorit-Neubildungen beobachtet werden, jedoch haben sich die in den Proben befindlichen Tonminerale während der Versuche gelöst. Dies steht im Widerspruch zu dem beobachteten Kaolinit in den natürlichen Störungszonen. Die natürlichen Störungsfüllungen sind außerdem vor allem durch Carbonate und Sulfate geprägt. Die Autoklavexperimente fanden unter vereinfachten, CO₂- und S-freien Bedingungen statt, was das Auftreten der beiden Mineralgruppen ausschließt.

Die im Bergwerk Teufelsgrund angetroffenen Störungszonen stellen weit entwickelte Störungen dar, die von, mit großer Wahrscheinlichkeit, hoch mineralisierten Wässern durchströmt wurden. Die Autoklavexperimente stellen jedoch die ersten Mineralreaktionen einer frischen Kluftoberfläche dar. Das künstliche Fluid, das in den Experimenten eingesetzt wurde, ist eine starke Vereinfachung der natürlich vorkommenden Fluide, welche zwar dem Gesamtgehalt gelöster Stoffe der natürlichen Fluide entspricht, jedoch nicht deren Elementvielfalt. Somit widersprechen sich die Beobachtungen der natürlichen Störungszonen im Bergwerk nicht mit den Ergebnissen der Autoklavexperimente. Aus diesem Grund sind für das Projekt *GeoFaces* komplexere Fluide im Autoklav vorgesehen. Der ausführliche Bericht ist in Anlage 6 vorhanden.

6.2.2 Geologie/Mineralogie, Laborexperimente Geochemie

Probengesteine Für die geomechanischen (Abs. 6.2.3) und geochemisch-mineralogischen Untersuchungen (dieser Abschnitt) wurden typische Lithologien von für die tiefe Geothermie relevanten Gesteine bzw. Stratigraphien im Oberrheingraben ausgewählt. Um repräsentative Gesteine, aber auch eine Bandbreite von unterschiedlichen Lithologien zu berücksichtigen, musste eine gründliche Auswahl an Probenmaterial getroffen werden. Für das kristalline Grundgebirge wurde ein Granit ausgewählt, für den Buntsandstein zwei silikatisch gebundene Sandsteine, einen grobkörnigen, und einen feinkörnigen, und für den Muschelkalk fiel die Wahl auf einen schillhaltigen Kalkstein mit stellenweisen fein-kristallinen, mikritischen Bereichen (Abb. 20). Eine kurze Zusammenfassung der grundlegenden Charakteristika ausgewählter Lithologien ist in Tabelle 2 enthalten. Die Herkunft der Probengesteine ist auf der Karte Abbildung 11 dargestellt. Eine detaillierte Charakterisierung der vier Lithologien ist in Anlage 7 sowie in Anlage 8.2 beschrieben.

Autoklavversuche Insbesondere bei der Technologie von EGS (Enhanced Geothermal Systems) oder im Zuge von Erdbeben werden frische Gesteinsoberflächen geschaffen, die dem Tiefenfluid

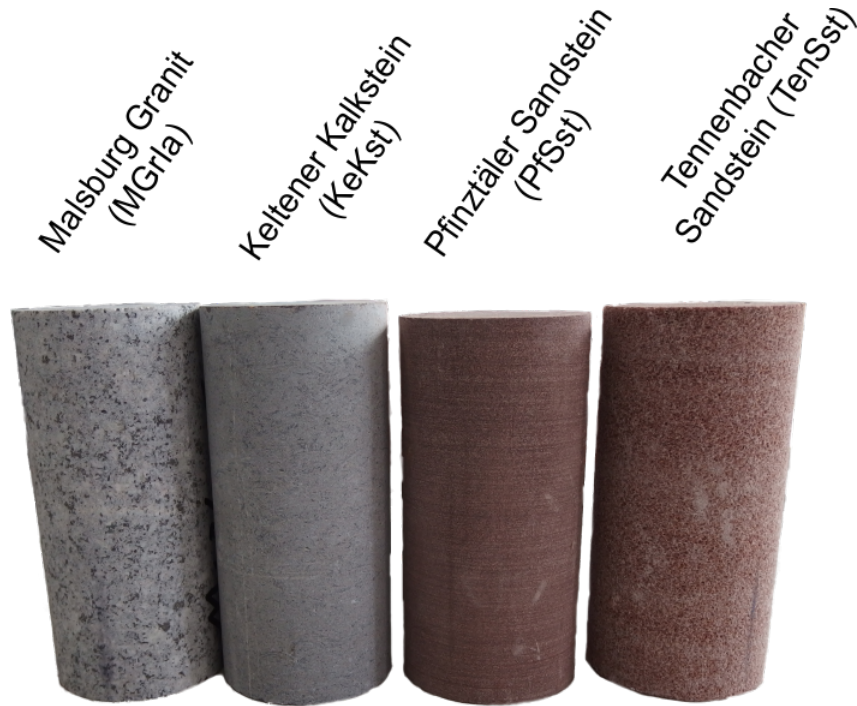


Abb. 20 – Probengesteine für geomechanische und geochemische Untersuchungen.

Tabelle 2 – Probengesteine.

Probenname	Abk.	Stratigraphie	Charakteristika
Malsburg Granit	MGr	Südschwarzw. Granitpluton	gleichkörnig, isotropes Gefüge, sehr hart, unverwittert
Tennenbacher Sandstein	TenSst	Oberer Buntsandstein	silikatisch gebunden, grobkörnig, so gut wie kein Lagenbau/Schichtungen, sehr homogen, unverwittert
Pfinztäler Sandstein	PfSst	Oberer Buntsandstein	silikatisch gebunden, feinkörnig, ausgeprägter Lagenbau, Muscovit-reich, homogen, unverwittert
Kelterner Kalkstein	KeKst	Muschelkalk	schillhaltig, stellenweise fein-kristallin mikritisch, dicht

ausgesetzt sind und mit diesem in Wechselwirkung treten. Mit den Autoklavversuchen war beabsichtigt, diese Vorgänge zu simulieren, um zum einen zu einem besseren Verständnis der ablaufenden Reaktionen zu gelangen. Vorrangiges Ziel der Autoklav-Versuche ist daher die Erfassung von Veränderungen der Kluft- bzw. Störungsoberfläche charakteristischer Reservoirgesteinstypen (Muschelkalk, Buntsandstein, Granit, Abb. 20) nach Kontakt mit salinaren Fluiden unter verschiedenen p-/T-Bedingungen, wie sie in Reservoirs des Oberrheingrabens vorherrschen. Dabei sollten neben Veränderungen in der Rauigkeit, chemisch-mineralogische Reaktionen untersucht werden. Dazu gehören ein Vergleich der Rauigkeit (z. B. mit einem Weißlichtinterferometer) vor und nach dem Autoklav-Experiment, eine Gesamtchemie-Analyse vor und nach dem Versuch, eine Phasenbestimmung und -charakterisierung sowie eine chemische Analyse des eingesetzten Fluids vor und nach der Reaktionen mit der Gesteinsprobe.

Mit den Versuchen sollte auch untersucht werden, wie sich Gesteinsoberflächen, d. h. Kluftflächen in der Reservoirumgebung (heißes, Na-Cl-reiches Fluid) verändern; ob Minerale neu gebil-

det werden oder vorhandene aufgelöst werden und wie sich dadurch die Permeabilität ändert. Zudem dienen die Autoklav-Versuche dazu, die geochemisch-mineralogische Entwicklung und Ausbildung von Störungszonen kennen zu lernen.

Das Fluid wurde künstlich im Labor hergestellt, ähnlich den Tiefenwässern, die im Oberrheingraben in 2 bis 5 km Tiefe vorherrschen. Für die Versuchsreihen wurde ein Na-Cl-Wasser aus destilliertem Wasser und reinem NaCl mit einer Konzentration von 2 mol l^{-1} bzw. $116,880 \text{ g kgw}^{-1}$ hergestellt. Diese Konzentration entspricht in etwa den TDS-Werten der Wasserproben, die z. B. in der Geothermieanlage Soultz-sous-Forêts im Granit oder in Bruchsal im Buntsandstein angetroffen wurden (Pauwels u. a., 1993; Stober & Bucher, 2014). Die Temperaturbedingungen des Versuchs wurden auf 200°C und 260°C festgelegt. Dies entspricht der Größenordnung an Reservoirtemperaturen an Geothermiestandorten im Oberrheingraben: 200 bis 240°C (Sanjuan u. a., 2010) und 220 bis 260°C (Aquilina u. a., 1997). Der Druck bei den Autoklavversuchen wird nur durch den Dampfdruck des eingesetzten Fluids kontrolliert. Eine künstliche Erhöhung des Druckes ist an den zur Verfügung stehenden Geräten nicht ohne weiteres möglich. Da die zu erwartenden geochemisch-mineralogischen Reaktionen jedoch vor allem temperatur- und nur untergeordnet druckabhängig sind, ist ein exaktes Druckmanagement nicht zwingend nötig.

Abbildung 21 zeigt, anschaulich das Versuchsschema mit den verschiedenen Analysemethoden, wobei folgende Methoden angewandt wurden, um die Gesteins- und Fluid-Proben vor und nach dem Experiment zu charakterisieren und Veränderungen festzustellen.

- Oberflächenbild:
 - Digitale 3D-Mikroskopie (DM)
 - Raster-Elektronenmikroskopie (REM/SEM)
- Gesamtgesteinschemie, Mineralphasen:
 - Röntgenfluoreszenz-Analyse (XRF)
 - Röntgendiffraktometrie (XRD)
- Reaktionsprofil, Reaktionsfront, Mineralchemie, Elementverteilung:
 - Polarisationsmikroskopie
 - Raster-Elektronenmikroskopie (REM/SEM)
 - Elektronenstrahl-Mikrosonde (EMP)
- Fluidanalysen von Kationen und Anionen:
 - Massenspektrometrie (ICP-MS)
 - Optische Emissionsspektrometrie (ICP-OES)
 - Ionenchromatographie (IC)

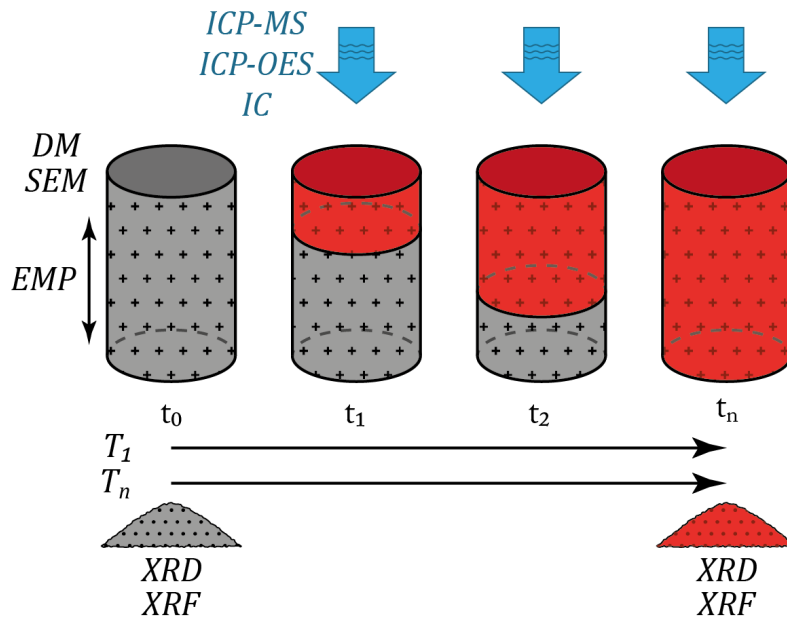


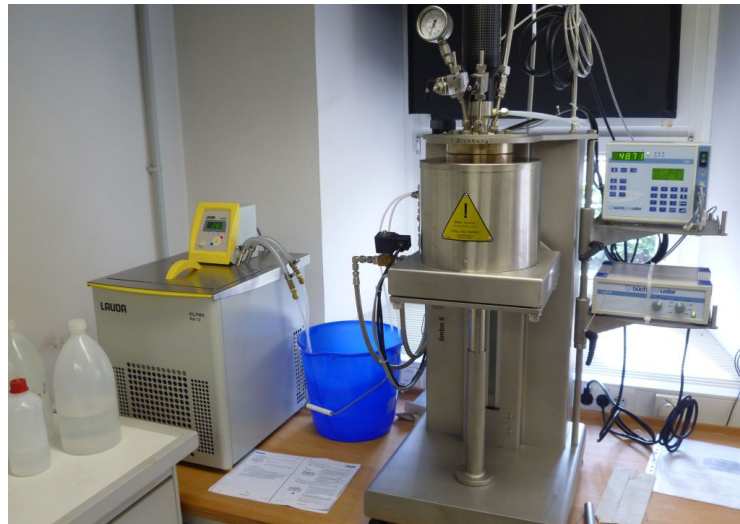
Abb. 21 – Versuchsschema mit Analysemethoden

Für die Versuche wurden verschiedene Autoklaven verwendet. Notwendig ist dies durch die sehr lange Dauer eines einzelnen Experimentes, sowie die unterschiedlichen Ausstattungen und somit verschiedenen Versuchsparameter. Der Autoklav im Geowissenschaftlichen Institut der Universität Freiburg ist ein Limbo li Labor Hochdruck Reaktor der Firma büchiglasuster (Abb. 22).

Bei den Experimenten im Limbo wurden die Reservoirgesteine Malsburg Granit, Pfnztäler Sandstein, Tennenbacher Sandstein und Kelterner Kalkstein jeweils bei 200 °C und 260 °C über einen Zeitraum von jeweils über 40 Tagen 2 molarer Na-Cl-Lösung ausgesetzt. Genaue Beschreibungen der Versuchsgeräte und -parameter sind in Anlage 8.1 dokumentiert.

Beschreibung der Versuchsergebnisse Die Experimente zeigen eine hohe Reaktivität der Gesteine mit dem Fluid unter den vorgegebenen Versuchsbedingungen. Eine frische Gesteinsoberfläche, gleichzusetzen mit einer neuen Kluftoberfläche im Reservoirgestein, ist somit großen geochemischen-mineralogischen Veränderungen unterzogen.

In den Autoklav-Experimenten konnten mehrere Mineralreaktionen beobachtet werden. Die wichtigsten Reaktionen umfassen eine intensive Quarzlösung in den Granit- und Sandsteinproben bei allen Experimenten (Abb. 23a + 23b + 23f). Sie reichen teilweise bis tief in die Quarzkörner an der Oberfläche hinein und erhöhen dadurch die Porosität. Eine oberflächliche Anlösung der Kalifeldspatkörner kann ebenfalls in den silikatischen Gesteinsproben beobachtet werden. Zusätzlich konnte eine punktuell Albitisierung von Kalifeldspäten, die in direktem Kontakt mit dem Versuchsfluid standen, festgestellt werden (Abb. 23c). Der Albit der Granitproben



(a) Limbo, geschlossen mit Kühlung



(b) Limbo, offen



(c) Stahlgefäß

Abb. 22 – Limbo li Labor Hochdruck Reaktor von *büchiglasuster* des geowissenschaftlichen Labors der Universität Freiburg.

zeigt keinerlei Reaktion in den Autoklavexperimenten.

In den Granitproben konnte eine Chloritisierung des Phlogopits während der Versuche beobachtet werden. Dieser ist mit einer Delaminierung der Schichten und einer Volumenzunahme der einzelnen Mineralkörner verbunden (Abb. 23d). Dagegen zeigen die Muscovite in den Pfinztäler Sandsteinen keine fundamentalen Reaktionen mit dem Versuchsfluid während den Experimenten.

Die Sandsteinproben sind geprägt von der Auflösung der Matrixmineralphasen Kaolinit und Illit während der Experimente bei beiden Versuchstemperaturen. Als Reaktionsprodukt kann eine massive Auskristallisierung von Analcim beobachtet werden (Abb. 23e – 23h). Bei den 200 °C-Experimenten kommen sie oft in Vergesellschaftung mit Tonmineralen vor (Abb. 23e + 23f). Die meisten neugebildeten Analcim-Kristalle sind hoch idiomorph ausgebildet (Abb. 23g + 23h).

Bei den Kalksteinproben kam es hauptsächlich zur Umkristallisation von Calcit. Es wurden außerdem untergeordnet neugebildeten Schichtsilikate auf den Kalkstein-Oberflächen entdeckt. Die Ergebnisse der Kalksteinproben sind schwer mit den silikatischen der Sandstein- und Granitproben zu vergleichen. Alle detaillierten Beschreibungen der Ergebnisse der Autoklavexperimente sind in Anlage 8.2 und 8.3 ausführlich beschrieben und erklärt, auch die Zusammensetzungen der Versuchsfluide nach den Experimenten, welche die Fluid-Mineral-Reaktionen gut widerspiegeln. Zusammenfassend können Prozesse in den Proben beobachtet werden, die die Fluidwegsamkeit einer Kluft erhöhen, wie z. B. Lösungsreaktionen von Quarz, Illit und Kaolinit. Außerdem kann die festgestellte Lockerung des Gesteinsverbandes eine Erhöhung der Permeabilität im Kluftbereich verursachen. Andererseits finden parallel dazu Reaktionen statt, die mit einer Volumenzunahme des Gesteinskörpers einhergehen und somit eine Reduktion der Fluidwegsamkeit bewirken können. Zu diesen Prozessen kann zum einen die Volumenzunahme bei der Chloritisierung von Glimmern zählen. Des Weiteren kann die massive Ausfällung von Analcim ein Verheilen neu entstandener Bruchflächen im Gestein bewirken.

Nichtsdestotrotz muss berücksichtigt werden, dass das künstliche Fluid, das bei den Experimenten verwendet wurde außer Na^+ und Cl^- keine weiteren Bestandteile enthielt; ein natürliches Reservoirfluid jedoch wesentlich mehr Komponenten enthält. Somit ist das künstliche Fluid zu Beginn der Experimente zu nahezu aller Mineralphase untersättigt.

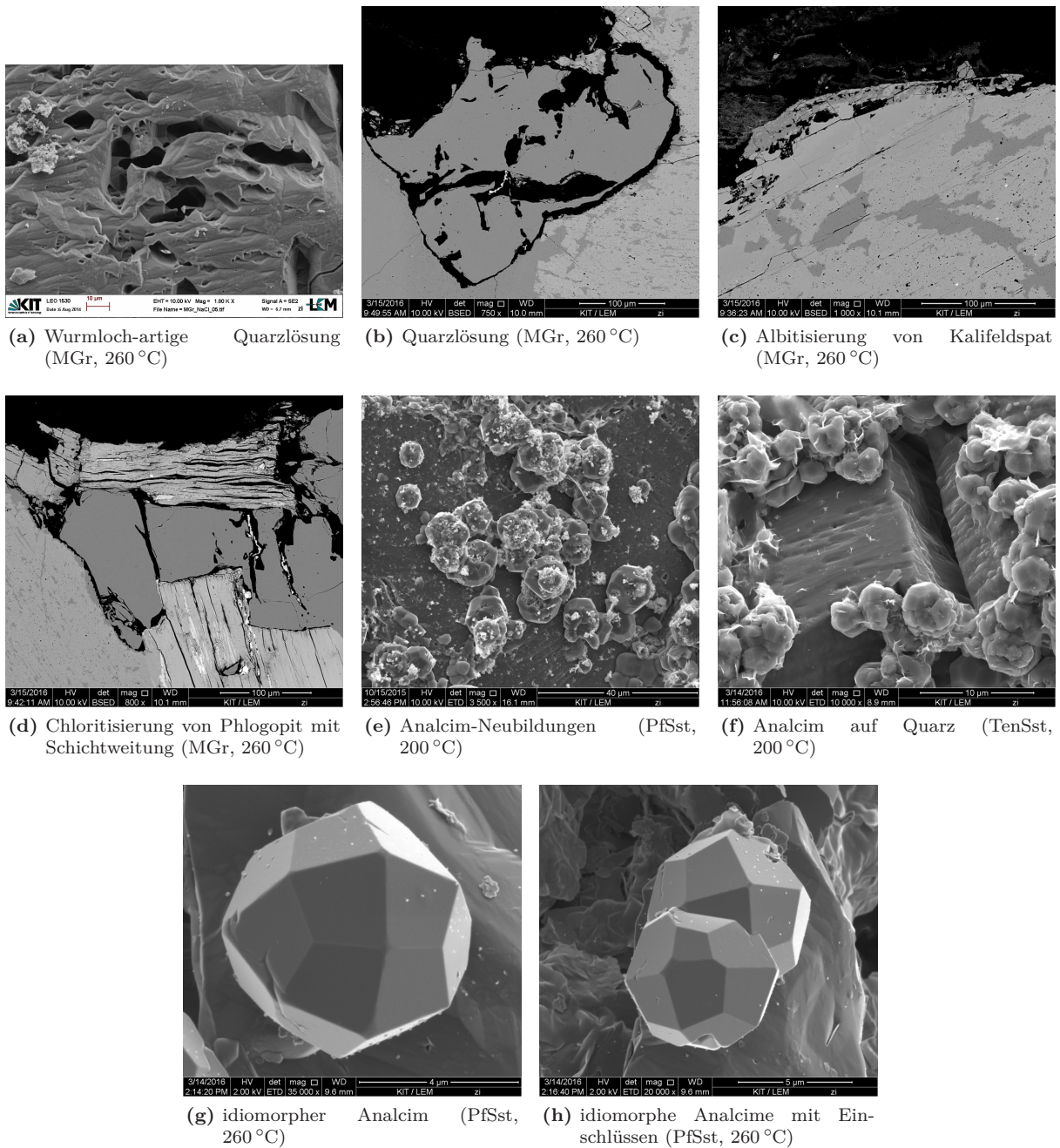


Abb. 23 – REM-Aufnahmen der Probenoberfläche (SE) und von Dünnschliffen (BSE) der Proben nach den Autoklav-Experimenten. (a) MGr Oberfläche (260 °C, Pr. 006): Quarzlösung resultiert in stufige Oberfläche und tiefe Wurmloch-artige Löcher. (b) MGr Dünnschliffe (260 °C, TS 098): Intensive Quarz-Lösung an den Korngrenzen und im Inneren des Kornes. (c) MGr Dünnschliff (260 °C, TS 098): Albitisierung der Kalifeldspäte an der Kontaktfläche zum Fluid. (d) MGr Dünnschliff (260 °C, TS 098): Lockerung des Korngefüges durch Quarz-Lösung und Aufweitung des Phlogopits/Chlorits. (e) PfSst Oberfläche (200 °C, Pr. 053): Analcim-Kristalle mit eingeschlossenen Tonmineralen und Hämatit. (f) TenSst Oberfläche (200 °C, Pr. 067): Quarzlösung, oberflächlich und tief in das Mineralkorn hinein. Großflächige Analcim-Neubildungen. (g) PfSst Oberfläche (260 °C, Pr. 145): Idiomorpher Analcim. (h) Pfsst Oberfläche (260 °C, Pr. 145): Idiomorphe Analcime mit Einschlüssen von Hämatit und Tonmineralen.

6.2.3 Geomechanik/Felsmechanik, Versuche an der Triax-Press

Mit den Versuchen an der Triaxial Presse sollten modellbasierte Ansätze zur Genese von Störungssystemen in Sandstein, Karbonatgesteinen sowie Granit entwickelt werden. Hierfür wählten wir möglichst homogene Gesteine des Oberrheingrabens aus dem Buntsandstein, dem Muschelkalk sowie dem Kristallinen Grundgebirge aus. Die Lokalität und Mineralogie ist im Detail in der Anlage 7 beschrieben. Ziel dieser Versuche ist die Untersuchung der mechanischen Parameter bei verschiedenen Umgebungsbedingungen für die Untersuchungsgesteine im Oberrheingraben bzw. Molassebecken, d. h. unter Reservoirbedingungen (Druck und Temperatur, stellvertretend für die Tiefe). Die gemessenen Verformungskurven kennzeichnen signifikante Bereiche, die über Stoffgesetze beschrieben werden können. Dadurch können Kenngrößen wie das E-Modul oder die Poissonzahl ermittelt werden, die ein Gestein unter bestimmten Reservoirbedingungen charakterisieren. In Abhängigkeit der Dichte, der Porosität, des Mineralbestandes oder der Zementation können die mechanischen Parameter variieren, was sich in einer Änderung der Spannungs-Deformationskurve äußert. Es hat sich gezeigt, dass der Bruch sehr häufig spontan bei der Entspannung ausbildet, wodurch es nicht möglich war, die Bruchbildung während der Deformation zu rekonstruieren. Somit entschlossen wir uns die Versuche hinsichtlich der Beschreibung der mechanischen Parameter auszuwerten und die Bruchorientierungen nach dem Versagen an den Kernen zu messen. Als Randbedingungen wurde eine Ringspannung von 0 bis 90 MPa festgelegt. Dies entspricht den Druckbedingungen für ein Geothermie Reservoir im Oberrheingraben oder im Molasse Becken.

Entsprechend der Materialeigenschaften bilden sich im Gestein Brüche in einem Winkel zur maximalen Spannung aus. Im Idealfall entspricht dieser Winkel dem inneren Reibungswinkel des Gesteins und nimmt einen Wert zwischen 30° und 45° ein (Jaeger u. a., 2007). Der Reibungswinkel des Gesteins kann durch eine Reihe an Messungen bei steigendem Ringdruck über das Mohr-Coulomb Bruchkriterium bestimmt werden. Dabei wird eine Kohäsion sowie der innere Reibungswinkel über einen linearen Zusammenhang bestimmt. In der Realität verhalten sich jedoch Gesteine unter einem großen Umgebungsdruck anders als unter einem geringen, wodurch der lineare Zusammenhang gestört wird. Besser kann das Bruchverhalten unter diesen Bedingungen über das Hoek-Brown Bruchkriterium beschrieben werden. Der ausführliche Bericht ist in Anlage 9 vorhanden.

Die Untersuchungen an den Kernen haben gezeigt, dass der Reibungswinkel für alle Gesteine bei einem Wert zwischen 35 bis 47° liegt. Anhand des Mohr-Coulomb Kriteriums konnte bei den Sandsteinen ein Zusammenhang zur Porosität bzw. der Korngröße hergestellt werden. Der

Tennenbacher Sandstein, der eine größere Korngröße aufweist, zeigt einen Reibungswinkel von 35° und eine Kohäsion von 15 MPa. Der Pfnztäler Sandstein mit einer geringeren Korngröße zeigt einen Reibungswinkel von 38° und eine Kohäsion von 33 MPa. Unter Berücksichtigung der rein mechanischen Parameter verhält sich der Keltener Kalkstein sehr ähnlich zu dem Pfnztäler Sandstein. Der Kalkstein zeigt einen Reibungswinkel von 37° und eine Kohäsion von 33 MPa. Deutlich davon abweichend kann der Granit beschrieben werden. Der sehr feinkörnige, kompakte Granit hat einen sehr großen Reibungswinkel von 47° und eine hohe Kohäsion von 32 MPa.

Die Analyse der Druckabhängigkeit des E-Moduls zeigt einen ansteigend linearen Zusammenhang für den Tennenbacher Sandstein, den Pfnztäler Sandstein und den Malsburger Granit (Abb. 24). Die Kurven des Tennenbacher und des Pfnztäler Sandsteins sind in der Steigung sehr ähnlich, jedoch unterscheiden sie sich in der Magnitude. Für den Pfnztäler Sandstein liegt das E-Modul bei 18,4 GPa und für den Tennenbacher Sandstein bei 16,2 GPa. Einen deutlich negativen Zusammenhang zwischen Druck und E-Modul zeigt der Kalkstein. Bei diesem liegt das E-Modul unter uniaxialen Druckbedingungen bei 44,8 GPa und sinkt bei einem Ringdruck von 90 GPa auf ein E-Modul von 35 GPa. Für den Granit zeigen die Ergebnisse eine große Unsicherheit, da eine hohe Variabilität im uniaxialen Fall auftritt. Generell ist aber davon auszugehen, dass der Granit durch seine kompakte Struktur eine geringe Druckabhängigkeit aufweist. Die Änderung des E-Modul bei den Sandsteinen bei erhöhtem Druck kann als diagenetische Veränderung während der Belastung und als eine Abnahme des Porenraumes interpretiert werden. Im Fall des Kalksteins nimmt das E-Modul ab. Bei erhöhtem Ringdruck kann der Kalkstein somit weniger Belastung aufnehmen, was in einem verfrühten Kriechen oder plastischen Verhalten zwischen den Mineralkörnern resultiert (Baud u. a., 2000).

In einer weiteren Analyse wurde die Temperatur von Raumtemperatur (20°C) auf 80°C und 100°C erhöht und die Ringspannung bei 50 MPa konstant gehalten. Es zeigte sich, dass die Proben der Sandsteine (Tennenbacher sowie Pfnztäler Sandstein) keine bedeutende Temperatur Abhängigkeit im E-Modul oder der triaxiale Druckfestigkeit aufweisen und dass bei erhöhter Differenzial-Spannung oder Temperatur der Kalkstein zum plastischen Verhalten neigt, welches sich auf das E-Modul und die Druckfestigkeit auswirkt (Abb. 25). In einem polykristallinen Gestein wie dem Granit, der unter Normalbedingungen sehr kompakt ist, kann eine schnelle Temperaturänderung (wie bei unseren Versuchen) zu einer interkristallinen Auflockerung führen. Dies wird durch unterschiedliche volumetrische Wärmeausdehnungskoeffizienten der Mineralkörner verstärkt. Als Folge kann eine Abnahme des E-Modules sowie der Druckfestigkeit beobachtet werden.

Die Ergebnisse zeigten, dass in Abhängigkeit der Gesteine unterschiedliche Anpassungen an

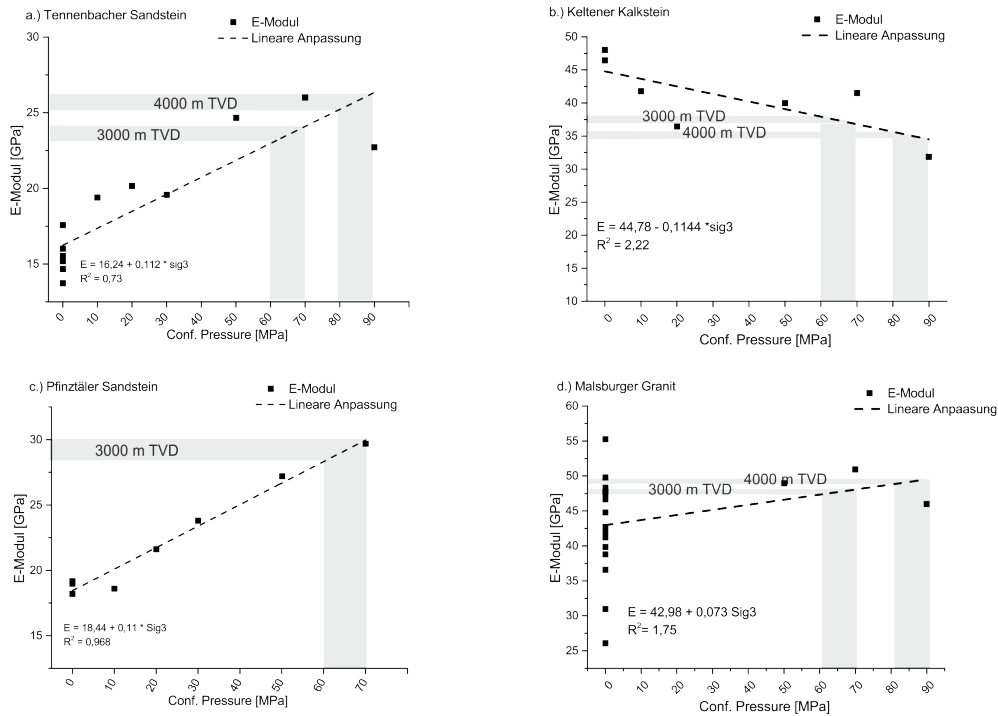


Abb. 24 – Druckabhängigkeit des E-Modules. Messungen wurde bei Raumtemperatur und 0 MPa (uniaxial), 10 MPa, 20 MPa, 30 MPa, 50 MPa, 70 MPa, und 90 MPa Ringspannung durchgeführt.

die Reservoir-Bedingungen nötig sind. Manche Gesteine erlauben eine Interpolation der mechanischen Parameter direkt in die Tiefe, andere erfordern eine Anpassung an Druck- und Temperatur-Bedingungen im Untergrund. Für eine Extrapolation der Ergebnisse in die Breite erfordert es jedoch eine strukturelle Untersuchung, die die deformationsbedingte Verbreitung der mechanischen Parameter beschreibt. Unsere Untersuchungen zeigten, dass z. B. bei geomechanischen Modellierungen die entsprechende Deformation berücksichtigt werden muss. Durch diese Verformung können die Gesteinsparameter in einem größeren Umfang verändert werden, als sie durch Druck- und Temperaturänderung beeinflusst werden. Der ausführliche Bericht ist in Anlage 9 vorhanden.

6.2.4 Geomechanische numerische Modellierungen

Um den Einfluss des Spannungsfeldes auf die hydraulische Leitfähigkeit zu untersuchen wurde an zwei Standorten, im Oberrheingraben und im Molassebecken, eine geomechanische Modellierung durchgeführt. Im Oberrheingraben ist das Ziel Kompressions- und Dekompressionsstrukturen zu lokalisieren und deren Einfluss auf die Hydraulik zu evaluieren. Im Molassebecken herrscht eine weite Diskussion, ob hohe Durchlässigkeiten eher durch die Fazies oder eher durch Störungszonen bedingt werden.

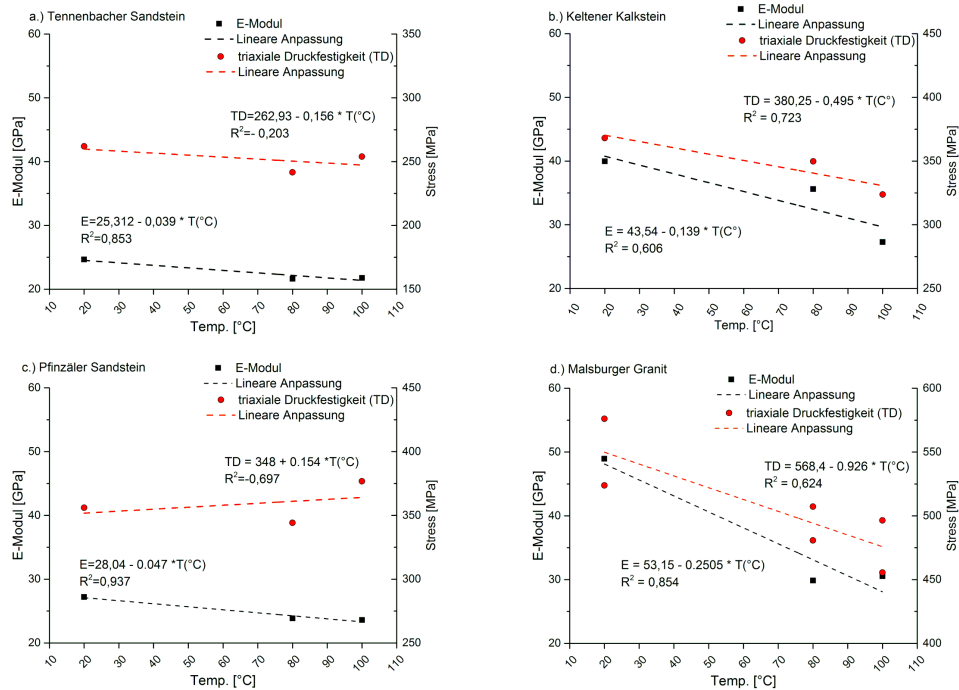


Abb. 25 – Temperaturabhängigkeit der triaxialen Druckfestigkeit und des E-Modules für einen Ringdruck von 50 MPa bei einer Temperatur von 20 °C, 80 °C und 100 °C.

Die hydraulische Wirksamkeit von Störungszonen und Klüften wird maßgeblich durch das lokale Spannungsfeld beeinflusst. Nach Analyse des Spannungsfeldes können schließlich auf Störungs- oder Klüftflächen kritische Parameter wie z. B. die Dilation Tendency („Öffnungstendenz“), Slip Tendency („Schertendenz“) oder ein kritischer Porendruck, der zum Versagen führt, berechnet werden. Diese Parameter können den Einfluss der Störungszonen oder des Klüftnetzwerkes auf die Hydraulik von Bohrungen beschreiben, da kritisch gespannte Klüftflächen oder Störungsflächen ein größeres Potential aufweisen, hydraulisch aktiv zu sein, als stabile Klüftflächen (Barton u. a., 1995).

Geomechanische Charakterisierung und Modellierung im Oberrheingraben anhand der 3D-Seismik am Projektstandort Neuried

Im Oberrheingraben wurde ausgehend eines seismischen Cubes im Untersuchungsgebiet von Neuried Störungsverläufe reinterpretiert und daraus ein Strukturmodell aufgebaut. Der Untersuchungsbereich um Neuried liegt im äußersten nördlichen Bereich des südlichen Oberrheingrabens (Abb. 26). Hier bildet der östliche Rand eine breite Zone, die den Graben zum Schwarzwald abgrenzt. Westlich wird diese Zone durch die Hauptrheingrabenstörung abgegrenzt, an der der größte Versatz stattfindet (Jodocy & Stober, 2010b; Rotstein & Schaming, 2011). Beide Störungen zeigen ein Streichen von N30°O, obwohl der südliche ORG hauptsächlich durch ein N15°O Streichen charakterisiert ist (Jodocy & Stober,

2010a; Rotstein u. a., 2005).

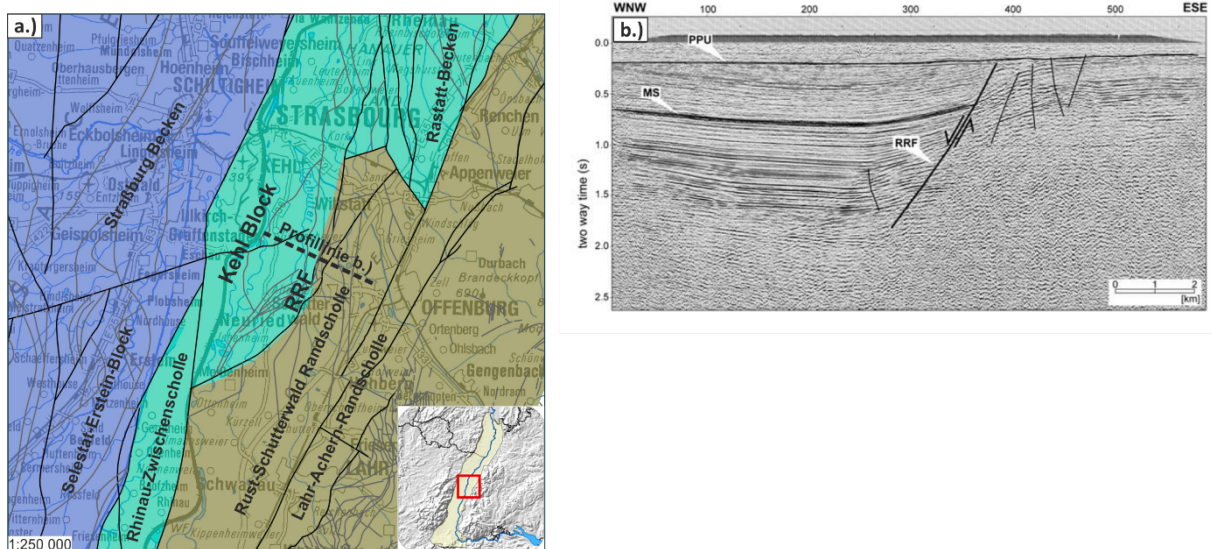


Abb. 26 – Zusammenstellung der Datenlage im Untersuchungsgebiet. (a.) Struktur-geologische Lage der 3D-Seismik im regionalgeologischen Kontext mit der Hauptrheingrabenstörung (HRS, Daten: Kartenserver Georg) (b.) Seismische Linie nördlich des Untersuchungsgebietes mit der HRS als Hauptabschiebung. MS: Meletta Fisch Schiefer Marker, PPU: Plio-Pleistozän Erosionsfläche (Rotstein u. a., 2005).

Das Spannungsfeld im Oberrheingraben hat sich während der Entwicklung im Tertiär von einer N–S-Kompression in eine NE–SW-Kompression gewandelt und zu einer NW–SE-Kompression entwickelt. Die Magnituden liegen im Untersuchungsgebiet im Bereich eines Strike-Slip zu einem Abschiebungsregime. Ausgehend von dem Störungsmodell wurde mit der Software 3D-Stress und dem allgemein gültigen Spannungsfeld die Verteilung der Slip-Tendency untersucht und Bereiche detektiert, die auf hydraulische Wegsamkeiten hindeuten. Da das Spannungsfeld in diesem Bereich nicht genauer bekannt ist und keine Daten vorliegen, wurde eine Unsicherheit in der Spannungsorientierung sowie in der Magnitude eingebaut. Das Spannungsfeld wurde von einem Abschiebungsregime mit einer Magnitude von $S_H = 0.95S_v$ in ein Strike-Slip Regime mit einer Magnitude von $S_H = 1.25S_v$ variiert. Die Orientierung der maximalen Hauptspannung wurde von N130°E auf N150°E nach N170°E variiert. Eine detaillierte Diskussion des Spannungsfeldes im Oberrheingraben findet sich im Anlage 10.

Folgende Beobachtungen ergeben sich aus den Analysen. In einem Abschiebungsregime ist die Slip-Tendency generell geringer als in einem Strike-Slip Spannungsregime. Die N–S-orientierten Störungen weisen tendenziell geringere Slip-Tendency Werte auf als die ENE–WSW orientierten. Die Orientierung der maximalen horizontalen Hauptspannung hat in einem Strike-Slip Regime eine wesentlich größere Auswirkung auf die T_s -Werte als in einem Abschiebungsregime. Bei einer Orientierung von S_H mit 130° zeigen die NNE–SSW-orientierten Flächen T_s -Werte von

0,4 bis 0,6. Hier liegt S_H fast im rechten Winkel zu diesen Flächen. Die ESE–WNW-orientierten Flächen bilden mit S_H einen kleinen Winkel und zeigen T_s -Werte zwischen 0,9 und 1,2. Diese Werte sind durch die geringen Normalspannungen auf den Flächen deutlich erhöht im Vergleich zu denen im Abschiebungsregime. Generell zeigt die Verteilung jedoch einen flachen Anstieg mit ebenfalls Werten unter 0,9. Bei einer Rotation von S_H nach Norden auf einen Wert von 150° steigen die T_s -Werte der NNE–SSW-orientierten Flächen, da der Schnittwinkel sich verringert. Die Scherkräfte steigen an, wodurch die T_s -Werte ebenfalls ansteigen. Der Schnittwinkel der ESE–WNW-Flächen mit der S_H -Orientierung erhöht sich, was eine engere Verteilung von T_s zwischen 0,8 und 1,2 zur Folge hat. Die größten T_s -Werte sind für einen Winkel von 30° zwischen der Orientierung von S_H zu und der Scherfläche zu erwarten, da das Verhältnis von Scher- zu Normalspannung maximal wird. Ein solcher Fall liegt bei der S_H -Orientierung von 150° bevorzugt für die ESE–WNW-Orientierungen vor. Wird das Spannungsfeld weiter nach Norden rotiert (170°), bilden sowohl die NNE–SSW-orientierten Flächen als auch die ESE–WNW einen Winkel von 30° zum Spannungsfeld. Somit kann es sowohl auf den NNE–SSW- als auch auf den ESE–WNW-orientierten Flächen zum Scherversagen kommen.

Vergleicht man die Ergebnisse der T_s -Werte der Störungsmuster unter unterschiedlichen Spannungsorientierungen, ist die Scherwahrscheinlichkeit für ein Strike-Slip Regime mit einer S_H -Orientierung von 130° am geringsten. Betrachtet man den Fall für eine S_H -Orientierung von 150° , steigt sie auf den ESE–WNW-Flächen an, bleibt jedoch auf den NNE–SSW-orientierten Flächen annähernd gleich. Rotiert das Spannungsfeld weiter mit dem Uhrzeigersinn nach 170° , kann es sowohl auf den NNE–SSW- als auch den ESE–WNW-orientierten Flächen zu einem Scherversagen kommen.

In der Untersuchung mit S_H - 130° zeigen in einem Abschiebungsregime als auch im Strike-Slip Regime die ESE–WNW-orientierten (Störungs-)Flächen die größte Scherwahrscheinlichkeit. Rotiert das Spannungsregime nach 150° kommen neben den ESE–WNW-Flächen die NNE–SSW-streichenden Flächen hinzu. In dem Fall mit einer S_H -Orientierung von 170° zeigen sowohl die NNE–SSW- als auch die ESE–WNW-orientierten Flächen in gleicher Weise eine Schertendenz. Hierbei zeigen sich Unterschiede im T_s -Wert, der in einem Strike-Slip Regime größere Werte annimmt als in einem Abschiebungsregime. Vergleicht man den Fall mit einer 170° S_H -Orientierung in einem Abschiebungsregime mit demjenigen im Strike-Slip Regime zeigt sich eine deutlich höhere Schertendenz (SS: $T_s = 1$ – $1,2$; NF: $T_s = 0,8$) für das Strike-Slip Regime (Abb. 27).

Die Scherwahrscheinlichkeit kann herangezogen werden, um Rückschlüsse auf die Kluftdurchlässigkeit zu erhalten. Barton u. a. (1995) analysierte den Slip-Tendency-Wert von Klüften im Granit und das thermische Signal in einem Temperaturlog. Er stellte einen direkten Zusammen-

Strike-Slip Regime

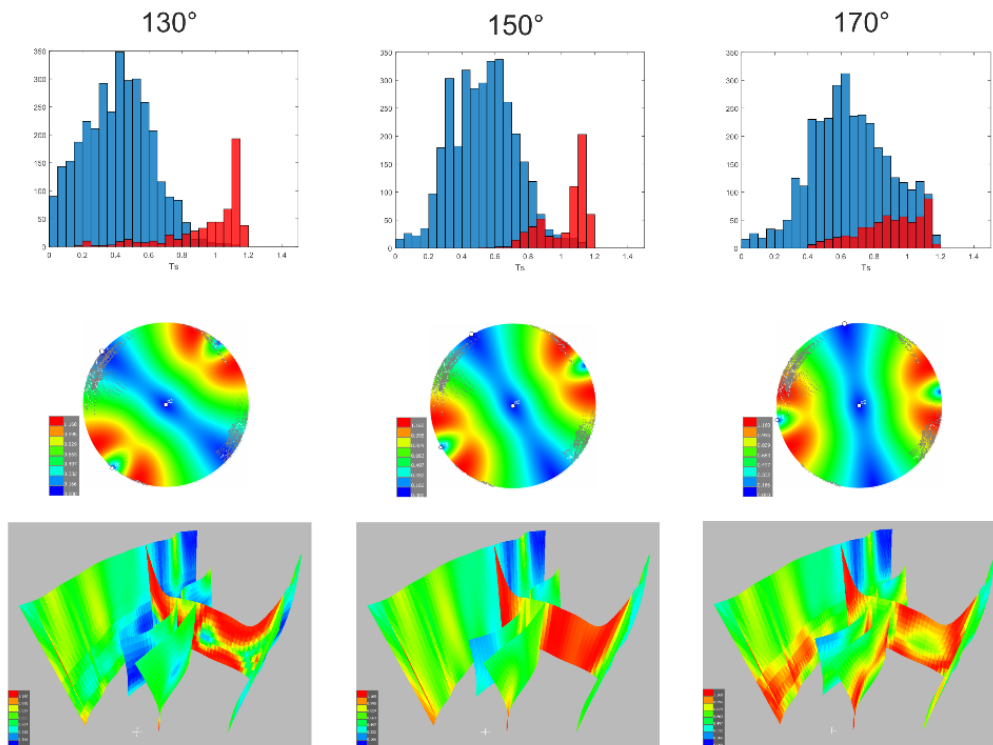


Abb. 27 – Häufigkeitsverteilung der T_s -Werte, Polardarstellung und 3D-View der Störungssysteme unter einem Strike-Slip Regime.

hang zwischen hohen Slip-Tendency-Werten und dem thermischen Signal, das durch hydraulisch aktive Klüfte hervorgerufen wird, dar. Demnach deuten hohe Slip-Tendency-Werte auf hydraulisch aktive Klüfte oder Störungen hin. Somit zeigen die oben genannten Störungen mit besonders hohen T_s -Werte auch eine höhere Tendenz hydraulisch durchlässig zu sein. Der ausführliche Bericht ist in Anlage 10 vorhanden.

Geomechanische Untersuchungen und Modellierungen an der Lokation der Geothermieanlage Sauerlach im Molassebecken

Zur Evaluierung des Fazies- oder Störungs-gebundenen Anteils an der hydraulischen Leitfähigkeit des Untergrundes analysierten wir die drei Bohrungen des Geothermieprojektes Sauerlach aus der bayerischen Molasse (Abb. 16). Durch die Bohrung Sauerlach Th1 wird $140\text{ }^\circ\text{C}$ warmes Wasser mit einer Produktionsrate von 110 l s^{-1} gefördert und über die beiden Bohrungen Sauerlach Th2 und Th3 wieder in den thermalen Grundwasserleiter des Oberjura reinjiziert. Anhand von Image-Logs können Aussagen über Spannungsindikatoren, Klüfte und Kluft-Eigenschaften sowie sedimentäre oder struktureologische Informationen gewonnen werden. Außerdem können Drucktests, die auf der Bohranlage im Reservoirbereich durchgeführt wurden, sowie Zementdichten und zugehörige Druckmessungen verwendet werden, um untere Spannungsgrenzen im Reservoir zu ermitteln. Die hydraulischen Testdaten zeigen eine

etwa doppelt so hohe Transmissivität der Sauerlach Th1 als in den beiden anderen Bohrungen Sauerlach Th2 und Th3.

Als Spannungsindikatoren wurden Breakouts (BO) / Bohrlocherweiterungen detektiert, die auf erhöhte kompressive Spannungen / maximale tangential Hauptspannungen (σ_{tmax}) an der Bohrlochwand hindeuten, sowie „Drilling Induced Tensile Fractures“ (DITF), die auf erhöhte Zugspannungen / minimale tangential Hauptspannungen (σ_{tmin}) an der Bohrlochwand weisen. Des Weiteren wurden Spannungsindikatoren interpretiert, die ein Indiz für Zugspannungen an der Bohrlochwand sind, jedoch nur durch diese überprägt wurden. Die als derartige „Drilling Enhanced Natural Fractures“ (DENF) interpretiert wurden, zeigen die Orientierung der minimalen tangentialen Hauptspannung (σ_{tmin}) an, da sich in dieser Orientierung bestehende Klüfte lokal an der Bohrlochwand öffnen. Eine detaillierte Beschreibung zu Versagensmechanismen im Bohrloch findet sich in Anlage 11.

Zur Bestimmung der Spannungsverteilung in geneigten Bohrungen sind weitere Berechnungsschritte notwendig (Hiramatsu & Oka, 1968). Die Orientierung der BOs, der DITFs und DENFs ist somit abhängig von der Magnitude der maximalen Hauptspannungen sowie von der Orientierung des Bohrpfad relativ zum Spannungstensor (Mastin, 1988). Zur Bestimmung der minimalen (σ_{tmin}) und maximalen tangentialen Hauptspannung (σ_{tmax}) werden das in Peška & Zoback (1995) aufgeführte Verfahren verwendet. In einem vorgegebenen Spannungsfeld und einer definierten Bohrlochorientierung werden somit die θ -Winkel zu TOH oder BOH bestimmt. Diese können mit den Beobachtungen der BOs, DITFs oder DENFs verglichen werden.

Das regionale Spannungsfeld wurde über die „frictional equilibrium theory“ bestimmt, die eine gängige Methode für Regionen darstellt, in denen wenige Eingangsdaten vorliegen. Die Vertikalkomponente wird über die Dichte des Überlagernden, der Porendruck (Pp) über Daten aus Pumpversuchen oder S_h aus Abschätzungen der Vertikalkomponente unter Annahme, dass keine horizontale Verschiebung existiert. Falls „Formation Integrity Tests“ (FIT) oder Daten zu Zementationsarbeiten vorliegen, können auch diese ausgewertet werden, um die untere Grenze der minimalen horizontalen Hauptspannung zu bestimmen (Abb. 28).

In den Image-Logs der Bohrungen konnten sehr viele natürliche Klüfte identifiziert werden. In den Bohrungen Sauerlach Th2 und Th3 liegt ein zweigeteiltes Kluftsystem vor, mit einer Hauptkluftrichtung in ENE–WSW- und einer zweiten Kluftrichtung nach N–S bis NNE–SSW. Die Bohrung Sauerlach Th1 ist im Reservoir nach N300°O orientiert und die Klüfte zeigen eine N–S-Orientierung. Bohrlochrandausbrüche treten in der Sauerlach Th1 mit einer mittleren Orientierung von $115 \pm 14^\circ$ TOH in oberen Abschnitt von 4050 bis 4390 m MD, im Bereich mit

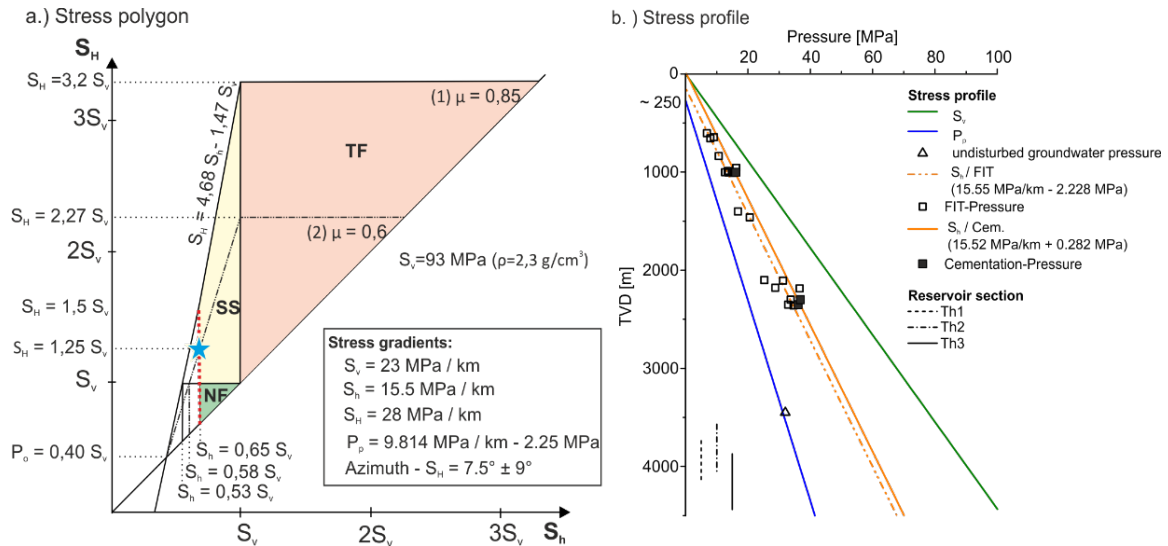


Abb. 28 – Spannungsfeldanalyse. (a) Spannungspolygon für eine Reservoirtiefe von 4000 m TVD mit den Spannungsbereichen für ein Abschiebungsregime (NF), Strike-Slip Regime (SS) und ein Überschiebungsregime (TF) für einen Reibungskoeffizienten von $\mu = 0.85$ und $\mu = 0.6$. (b) Spannungsprofile für den Porenwasserdruck P_p , die minimale horizontale Hauptspannung (S_h), abgeleitet aus den „Formation Integrity Test“ (FIT) Daten und die Zementationsdaten sowie die vertikale Spannung S_v für eine konstante Dichte von 2300 kg m^{-3} (Seithel u. a., 2015).

gekreuzten Klüften auf. Im unteren Abschnitt führt der Bohrprozess zu einer Reaktivierung bestehender Klüfte als DENF mit einer Orientierung von $27 \pm 11^\circ$ TOH. In der Sauerlach Th2 ist die Orientierung der DITF und DENF $176,0 \pm 9,6^\circ$ TOH und Breakouts konnten in einem kurzen Intervall von 4020 bis 4140 m MD mit einer Orientierung von $95 \pm 14^\circ$ TOH interpretiert werden. In der Sauerlach Th3 wurden über das gesamte Reservoir-Intervall DENFs mit einer Orientierung von $179,0 \pm 75,3^\circ$ TOH ermittelt.

Klüfte, die im Zusammenhang mit Abschiebungen stehen, bilden häufig subparallele Netzwerke aus, welche mit dem WSW-ONO-orientierten Kluft-Netzwerken korrelieren. Tatsächlich zeigt die Kluft-Orientierung in Sauerlach Th2 und Th3 diese Richtung. Die Bohrung Sauerlach Th1 ist zwischen zwei Abschiebungssystemen abgeteuft worden und zeigt eine Kluftorientierung zwischen $N350^\circ$ und 10° O. Für gewöhnlich nimmt die Kluftdichte in der Umgebung zu Störungszonen zu und die Gesteinsfestigkeit nimmt ab. Der obere Abschnitt von Sauerlach Th1 zeigt eine starke Zerklüftung und Breakoutdichte und spiegelt ein deformiertes Gestein mit verminderter Festigkeit aus einem zentralen Störungsbereich wieder.

Die Verteilung der tangentialen Hauptspannung an der Bohrlochwand und das Auftreten von Spannungsindikatoren (BO, DENF, DITF) werden bestimmt durch die Bohrlochorientierung sowie das lokale Spannungsfeld. In einem ersten Test wurde die theoretische Orientierung der minimalen tangentialen Hauptspannung, die die DITF und die DENF darstellt, sowie die Orien-

tierung der maximalen tangentialen Hauptspannung, die die Breakoutorientierung darstellt, in dem oben genannten Strike-Slip Spannungsfeld untersucht. In der Sauerlach Th1 zeigte sich eine Abweichung von 35 bis 45° im Bereich zwischen 4000 bis 4380 m MD und 15 bis 30° im Bereich zwischen 4380 bis 4760 m MD. In den beiden anderen Bohrungen spiegeln die Spannungsindikatoren die Spannungsverteilung im Bohrloch in dem oben genannten Strike-Slip Spannungsregime wieder. Diese Beobachtung bringt die Diskussion einer lokalen Spannungsanomalie im Bereich der Sauerlach Th1 auf.

Um das lokale Spannungsregime mit den Beobachtungen der Spannungsindikatoren zu vergleichen, wurde ein Winkel ($\Delta\theta$) bestimmt (Mis-Fit), der die Beobachtungen mit dem angenommenen Spannungsmodell vergleicht (Seithel u. a., 2015). Einer der bestimmenden Parameter der entscheidend den Spannungstensor beschreibt, ist dessen Orientierung in Bezug auf Norden sowie die Magnitude der maximalen Hauptspannung S_H . Hierfür wurde S_H konstant bei 0,65 S_v angenommen, die Orientierung von S_H im Uhrzeigersinn von N0° nach 180°S rotiert und das Spannungsregime aus einem Abschiebungsregime ($S_H = 0.7S_v$) in ein Strike-Slip Regime ($S_H = 1.25S_v$) variiert (Abb. 29). Für jedes dieser Spannungsregime ergibt sich ein mittlerer Mis-Fit, der in einer Spannungskonstellation mit guter Übereinstimmung ein Minimum ergibt. Die Analyse zeigt für die nach NW-orientierte Bohrung Sauerlach Th1 ein Abschiebungsregime ($S_H = 0.85S_v$) mit einer N-S-orientierten maximalen Hauptspannung oder aber ein Strike-Slip Spannungsregime ($S_H = 1.25S_v$) orientiert nach N150°S. Im Gegensatz dazu zeigt die Analyse der nach Norden orientierten Bohrung Sauerlach Th2 ein Strike-Slip Spannungsregime ($S_H = 1.25S_v$) mit N10°S oder ein Abschiebungsregime ($S_H < S_v$) in gleicher Orientierung.

Verglichen mit den Beobachtungen in Sauerlach Th2 und Th3 bedeutet dies ein regional rotiertes Spannungsregime. Ein derartig verändertes Spannungsfeld kann im Malmreservoir auf lithofaziellen Wechsel an Materialparametern oder auf tektonische Strukturen zurückgeführt werden.

Um den Einfluss der Kluft-Orientierung und des Spannungsfeldes auf die Hydraulik genauer zu untersuchen, verwendeten wir erneut die Slip- und Dilation-Tendency-Methode sowie das Hoek-Brown-Bruchkriterium, um einen kritischen Porendruck zu ermitteln. Den Wert der Slip-Tendency wurde auf einen Reibungskoeffizienten von 0,8 normiert, um zwischen den Bohrungen besser vergleichen zu können. Der kritische Porendruck entspricht dem Abstand vom Bruchkriterium, das mit dem Hoek-Brown-Kriterium auf einen Kalkstein aus einer Störungszone, einem geklüfteten und einem Kalkstein mit weit stehenden Klüften bezogen werden kann. Unter Verwendung aller Klüfte einer Bohrung berechneten wir die Slip-Tendency, Dilatation-Tendency sowie den kritischen Porendruck und stellten die kumulierte Dichte Funktion dar. Mittels des Median der Kurven können die einzelnen Parameter verglichen und Aussagen über hydraulische

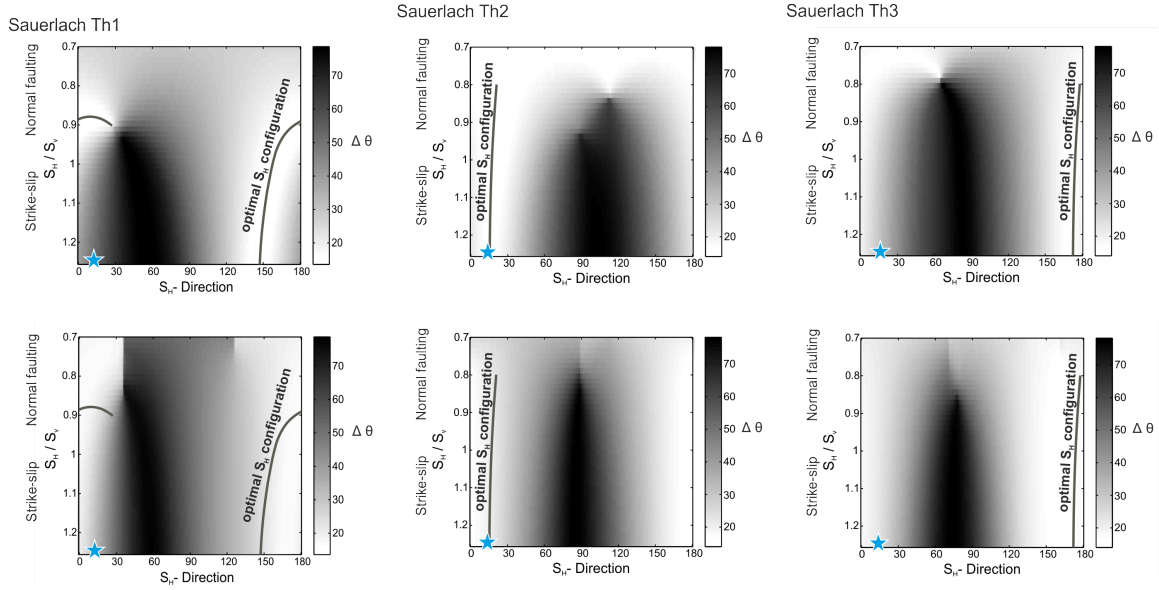


Abb. 29 – Darstellung der modellierten und beobachteten Spannungsindikatoren für eine variierte Orientierung sowie Spannungsregime. Die Vertikal-Spannung (S_v) und die minimale Hauptspannung ($S_h = 0.65S_v$) wird als konstant angenommen. Die maximale horizontale Hauptspannung wird von $N0^\circ$ – 180° S variiert. Das Spannungsregime variiert von einem Abschiebungs- zu einem Strike-Slip-Spannungsregime ($S_H = 0.7 - 1.25S_v$). Mit einem blauen Stern sind die Werte des Strike-Slip-Spannungstensor markiert. Die Graustufen stellen den Mis-Fit zwischen den beobachteten Spannungsindikatoren und den modellierten Tangential-Spannungen dar. Die Spannungsinversion in Sauerlach Th1 zeigt ein Abschiebungsregime ($S_H < S_v$) mit S_H -Dir. $N10^\circ$ O oder ein nach $N150^\circ$ O rotiertes Strike-Slip Spannungsregime ($S_v < S_H < 1,25S_v$) an.

Aktivitäten der Klüfte unter angewandten Spannungsmagnituden oder Orientierungen gemacht werden.

In der Bohrung Th1 zeigt sich, dass die Slip-Tendency in dem Strike-Slip $N150^\circ$ E orientierten Spannungsregime am größten ist. Für die Dilation-Tendency sind die Werte in dem $N7^\circ$ E orientierten Strike-Slip-Regime am größten. Die Kombination beider Werte (T_{sntdt}) zeigt, dass die Werte für ein Strike-Slip $N7^\circ$ E orientiertes Spannungsregime größer sind als in einem $N150^\circ$ E orientiertes Spannungsregime (Abb. 30). In den Bohrungen Th2 und Th3 ist die Slip Tendency im Strike-Slip-Regime (Median $\sim 0,22$ bis $0,36$) deutlich geringer als in der Th1 (Median $\sim 0,54$ bis $0,67$). Die Slip-Tendency im Abschiebungsregime ist generell für alle drei Bohrungen sehr gering (Median $\sim 0,22$ bis $0,3$). Die Dilation Tendency für Bohrung Th2 und Th3 ist im Strike-Slip-Regime mit $N7^\circ$ E Orientierung am geringsten (Median $\sim 0,2$ bis $0,26$) und steigt im Abschiebungsregime (Median $\sim 0,46$ bis $0,48$). Die Dilation-Tendency ist jedoch generell geringer als in der Bohrung Th1. Kombiniert man die Analyse auf den T_{sntdt} -Wert, trennen sich die Bohrungen deutlich voneinander ab. Die Bohrungen Th2 und Th3 zeigen für das Strike-Slip und Abschiebungsregime wesentlich geringere Werte (Median $\sim 0,53$ bis $0,72$) des T_{sntdt} als für die Bohrung Th1 (Median $\sim 1,2$ bis $1,43$).

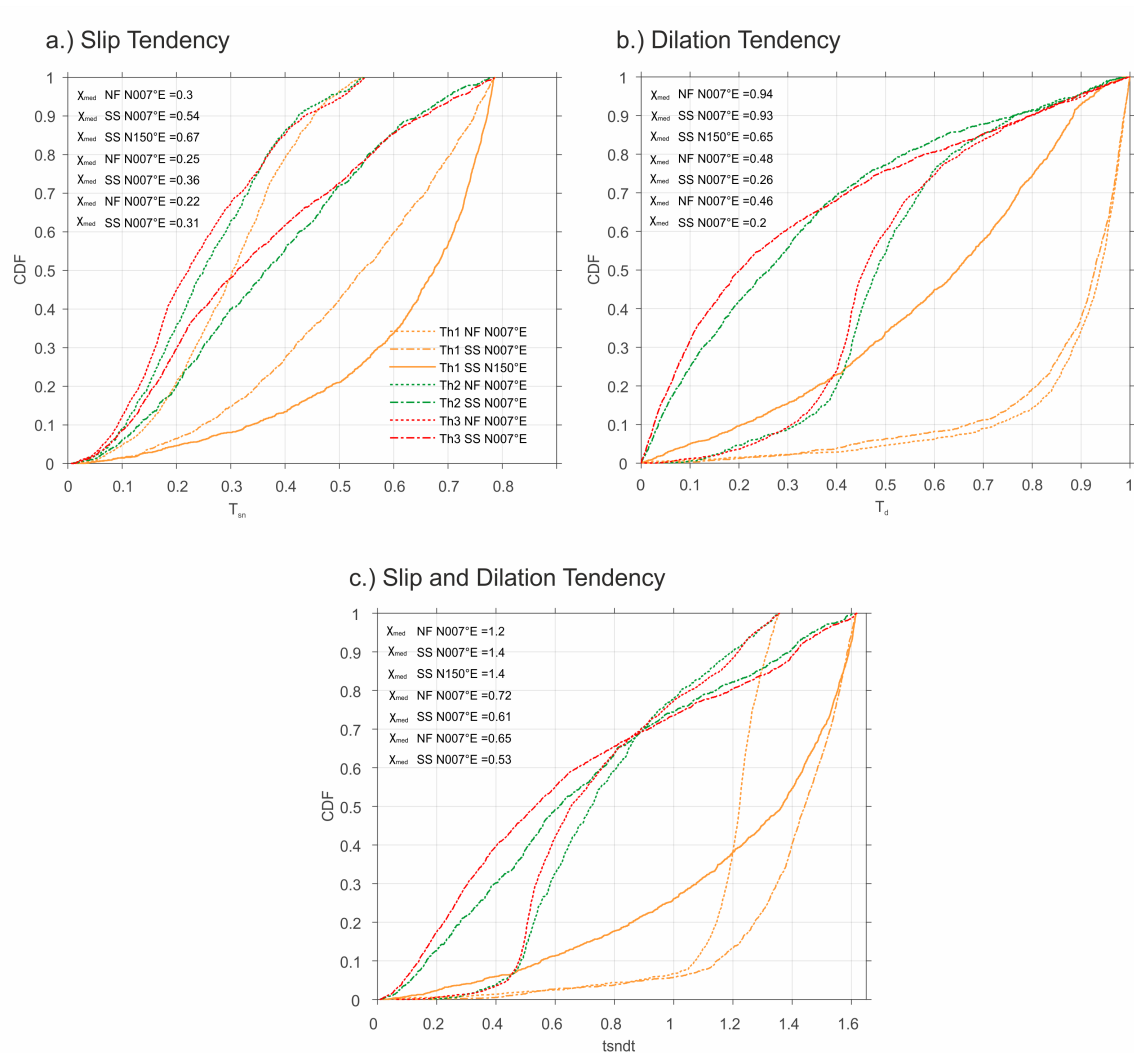


Abb. 30 – Darstellung der Ergebnisse mit der kumulierten Dichtefunktion (CDF). (a) Auf $\mu = 0.8$ normierte Slip-Tendency (T_{sn}) der Klüfte in den Bohrungen Sauerlach Th1, Th2 sowie Th3 mit den Spannungsregimen. Statistische Werte des Medians (χ_{med}) bei 50% der Werte. (b) Dilation-Tendency (T_d) der Klüfte in den Bohrungen und des Medians. (c) Kombinierte Darstellung der Slip- und Dilation-Tendency (t_{sndt}) der Klüfte in den Bohrungen und des Medians.

Abbildung 31 zeigt, dass in dem N150°E orientierte Strike-Slip-Spannungsregime der kritische Porendruck der Klüfte auf eine bessere hydraulische Leitfähigkeit hindeutet. Aufgrund des negativen kritischen Porendrucks ab einem GSI von 40 in dieser Orientierung, kann daraus geschlossen werden, dass das Reservoir mindestens die Festigkeit eines eng geklüfteten Kalksteins besitzen muss. Der kritische Porendruck in Th2 und Th3 zeigt keine signifikante Abhängigkeit von der Orientierung von S_H . Die Sensitivitätsanalyse (siehe Anl. 11) hat gezeigt, dass für das Strike-Slip-Spannungsregime mit der N7°E sowie N150°E Orientierung auch für eine Brekzie (GSI = 30) kein negativer kritischer Porendruck erreicht wird. Somit wäre auch im Fall einer geringen Gesteinsfestigkeit das Reservoir stabil. Jedoch zeigt es auch an, dass unter diesem Spannungsregime der kritische Porendruck auf eine geringe hydraulische Aktivität im Reservoir

schließen lässt.

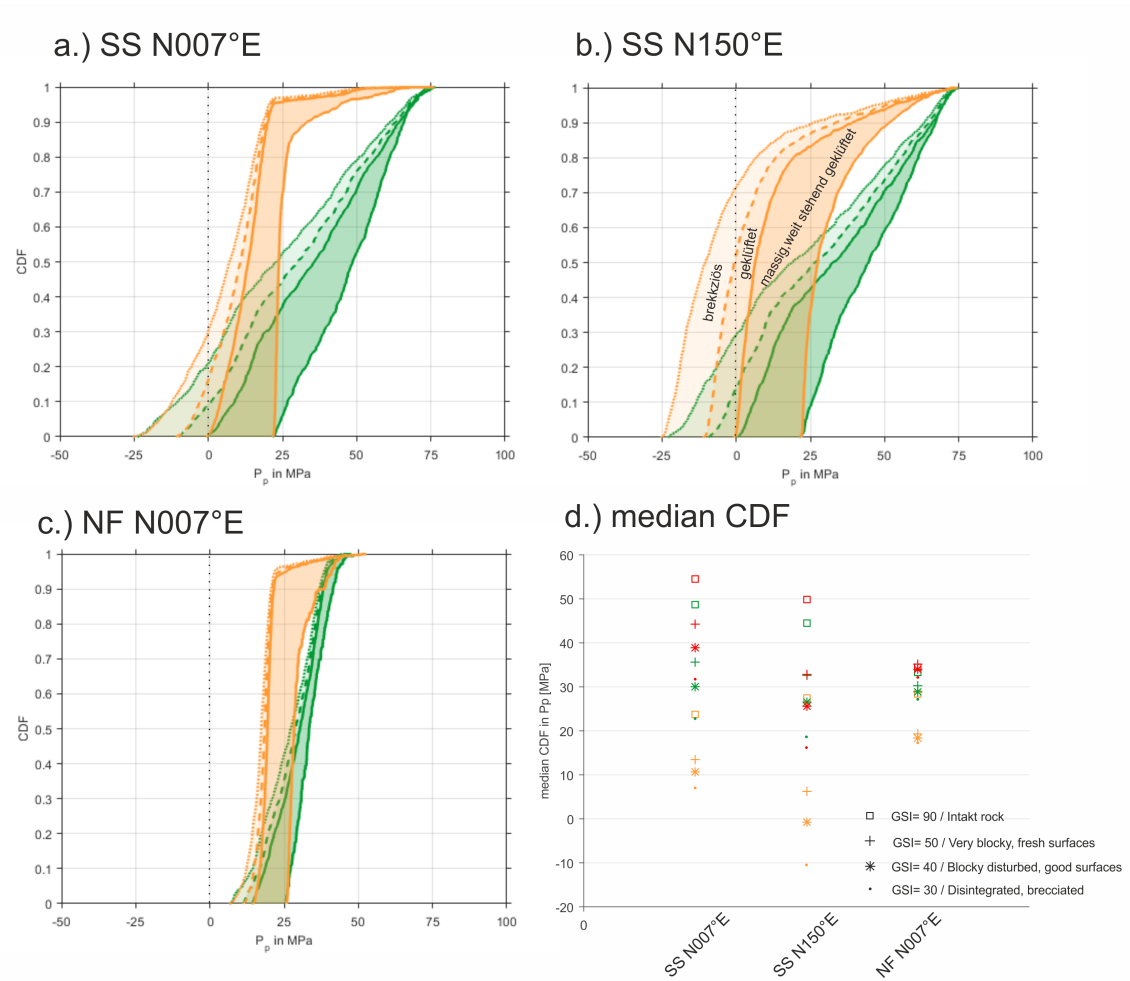


Abb. 31 – Darstellung der CDF-Kurven des kritischen Porendrucks (P_p) mit GSI-Werten von 10, 30, 50 und 70. (a) in einem Strike-Slip-Spannungsregime ($S_H = 1.25S_v$, $S_h = 0.65S_v$) mit N7°E Orientierung, (b) in einem Strike-Slip-Spannungsregime ($S_H = 1.25S_v$, $S_h = 0.65S_v$) in N150°E Orientierung sowie (c) in einem Abschiebungsregime ($S_H = 0.85S_v$, $S_h = 0.65S_v$) mit N7°E Orientierung. Gelbe Kurven entsprechen den Kluftdaten der Bohrung Th1, grüne Kurven den Kluftdaten der Bohrung Th2 und rote Kurven der Bohrung Th3. (d) Aufgetragen ist der Median-CDF-Wert des P_p für die drei untersuchten Spannungsregime bei einer Änderung des GSI von 70 auf 10.

Die vorgestellten Analysen könnten eine Erklärung für den unterschiedlichen hydraulischen Charakter der Bohrung Th1 im Vergleich zu den Bohrungen Th2 und Th3 geben. In der Betriebsphase wird das aus Bohrung Th1 geförderte Wasser in die beiden Bohrungen Th2 und Th3 re-injiziert. Der ausführliche Bericht ist in Anlage 11 vorhanden.

7 Verwertbarkeit

Die BMU-Leitstudie 2010 (Nitsch u. a., 2010) sieht die Geothermie mit Wachstumspotenzial, jedoch nur mit einem kleinen Anteil an der Strommenge, die aus Erneuerbaren Energien erzeugt werden kann. Dennoch sind im sog. „Basisszenario 2010 A“ erhebliche Steigerungen der installierten Leistung von Geothermie-Kraftwerken eingerechnet (a. a. O. Tab. 10-2): Von der derzeitigen installierten elektrischen Leistung (12 MW) sind bis 2020 Steigerungen auf knapp 300 MW vorgesehen. Um diese Leistungen in diesem Zeitraum zu erreichen, sind innerhalb der nächsten sieben Jahre zahlreiche weitere geothermische Kraftwerke zu errichten. Die bisherigen geothermischen Heiz- und Kraftwerke nutzen weitestgehend Aquifere (hydrothermale Geothermie). Laut der TAB-Studie (Paschen u. a., 2003) stellen Aquifere aber nur rund 1% des geothermischen Strompotenzials dar. Tiefe Störungszonen haben demnach rund das vierfache Potenzial.

Mit dem Projekt *StörTief* konnte der Kenntnisstand über tief reichende Störungszonen wesentlich erweitert werden, notwendige Daten und Evaluationsmöglichkeiten wurden kompiliert, so dass neue geowissenschaftliche Grundlagen für erfolgreiche Geothermieprojekte geschaffen werden konnten. Störungszonen sind wesentlich komplexer als bislang angenommen. Die mechanischen Eigenschaften ändern sich in Abhängigkeit vom Ausgangsgestein deutlich mit zunehmender Tiefe (Druck, Temperatur). Diese Erkenntnisse müssen bei einer geomechanischen Modellierung berücksichtigt werden. Mit zunehmender Tiefe ändert sich in den Reservoiren neben der Temperatur und dem Druck auch die hydrochemische Eigenschaft der Tiefenwässer. Dies führt insgesamt zu einer Alteration der Kluftoberflächen, wobei manche Minerale aufgelockert und gelöst werden, was einer Permeabilitätserhöhung gleichkommt, andere Minerale werden neu gebildet und erniedrigen dadurch die primäre Permeabilität. Entscheidend ist auch hier das Ausgangsgestein. So konnten deutliche Unterschiede bei Granit, den untersuchten Sandsteinen oder dem Kalkstein festgestellt werden.

Somit ist es wesentlich, das Ausgangsgestein zu kennen, in dem Störungszonen verlaufen, die Tiefenlage (Temperaturen, Drucke), die hydrochemischen Eigenschaften der Tiefenwässer, das natürliche Stressfeld und die Orientierung der Störungszone im Raum. Nur dann lassen sich die geomechanischen Eigenschaften abschätzen und verbesserte geomechanische Modellierungen zur Erfassung höffiger Bereiche durchführen. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden Methoden, Verfahren und Entscheidungshilfen für die Exploration von tiefreichenden Störungszonen im Hinblick auf die geothermische Nutzung entwickelt bzw. weiterentwickelt.

Die Daten, Informationen und neuen Erkenntnisse werden über das Geothermische Informationssystem (*GeotIS*) kostenlos der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Ergebnisse des Projektes

wurden zudem auf Fachtagungen präsentiert und in Fachzeitschriften publiziert.

Das Forschungsvorhaben zielte auf keinen eigenen wirtschaftlichen Erfolg.

Die Forschungsergebnisse tragen insgesamt dazu bei, das Fündigkeitsrisiko zu vermindern und die geothermische Nutzung von tiefen Störungszonen entscheidend voranzubringen. Die Untersuchungen wurden zwar mit Schwerpunkt auf SW-Deutschland durchgeführt, sie lassen sich jedoch auf andere Regionen in Deutschland und außerhalb von Deutschland mit ähnlichen geothermischen Rahmenbedingungen übertragen. Durch die Erstellung eines deutschlandweit gültigen Kriterienkatalogs für die Erfassung tiefreichender Störungen bezüglich ihrer geothermischen Nutzbarkeit im Rahmen des Verbundprojektes wurden diese allgemeingültigen Gesetzmäßigkeiten aufgezeigt. Damit wird auch die internationale Wettbewerbsfähigkeit von deutschen Forschungseinrichtungen und für deutsche Unternehmen, die auf diesem Sektor arbeiten, gestärkt.

Die Ergebnisse des Vorhabens stellen die Grundlage für eine wirtschaftliche Nutzung von tiefreichenden Störungszonen für die geothermische Energie dar. Sie dienen der Abschätzung des Fündigkeitsrisikos für geothermische Bohrungen in Störungszonen und sind somit eine wichtige Entscheidungshilfe für die wirtschaftliche Nutzung der Geothermie in Störungszonen. Mit den aus den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnissen dürfte es zudem möglich sein, im Vorfeld des Abteufens einer Bohrung hydrogeothermisch interessante und uninteressante Störungen durch geeignete Voruntersuchungen voneinander zu unterscheiden. Diese Arbeit bietet somit auch Grundlage für eine Optimierung zukünftiger Untersuchungen von Tiefenstrukturen in SW-Deutschland.

8 Fortschritt Anderer

Im nördlichen Oberrheingraben wurde das vom BMWi geförderte Projekt *TRACE* durchgeführt, das sich mit der Erkundung von aufsteigenden Tiefenwässern entlang einer Störungzone mit Hilfe einfacher kostengünstiger Methoden befasste.

Vergleichbare Untersuchungen erfolgten nach unserem Kenntnisstand derzeit jedoch nicht.

9 Publikationen und Vorträge

Agemar, T., Hese, F., Moeck, I. & Stober, I. (2016): Kriterien für die Erfassung tiefreichender Störungen und ihrer geothermischen Nutzbarkeit in Deutschland. – Vortrag. – GtV Bundesverband Kongress, Essen.

- Schmidt, R. B., Bucher, K., Mundhenk, N. & Stober, I. (2016a): Reactivity of geothermal reservoir rocks under temperature conditions found in the Upper Rhine Graben (Germany). – Vortrag. – 15th Water-Rock Interaction International Symposium, WRI-15, Évora, Portugal.
- Schmidt, R. B., Bucher, K. & Stober, I. (2016b): Alteration of primary minerals from geothermal reservoirs in the Upper Rhine graben. – Poster Präsentation. – GeoTherm 2016, Offenburg.
- Schmidt, R. B., Bucher, K. & Stober, I. (2016c): Alteration products of reservoir rocks from the Upper Rhine Graben under geothermal conditions. – Poster Präsentation. – Workshop Geothermische Fluide in salinaren Systemen, Karlsruhe.
- Schmidt, R. B., Bucher, K. & Stober, I. (2016d): Alteration products of reservoir rocks from the Upper Rhine Graben under geothermal conditions. – Poster Präsentation. – European Geothermal Congress 19-24 September 2016, Strasbourg, France.
- Schmidt, R. B., Bucher, K. & Stober, I. (2016e): Alteration products of reservoir rocks of the Upper Rhine Graben under geothermal conditions. – Poster Präsentation. – 25. Meeting of the German Association for Hydrogeology, KIT, 13-27 April 2016.
- Schmidt, R. B., Bucher, K. & Stober, I. (2014a): Geochemical reactions of fresh granite with in-situ fluids under geothermal reservoir conditions in the crystalline basement of the Upper Rhine Graben. – Poster Präsentation. – 3rd European Geothermal Workshop Karlsruhe, 15–16 October 2014.
- Schmidt, R. B., Mundhenk, N., Bucher, K. & Stober, I. (2015a): Alteration of primary minerals from geothermal reservoirs in the Upper Rhine graben. – Poster Präsentation. – 4th European Geothermal Workshop Karlsruhe, 19–20 October 2015.
- Schmidt, R. B., Seithel, R., Bucher, K. & Stober, I. (2015b): Fluid-Rock Interaction in Deep Fault Systems and the Influence on Permeability in Typical Rocks of the Upper Rhine Graben, Southwest Germany. – in: *Proceedings World Geothermal Congress*.
- Schmidt, R. B., Seithel, R. & Stober, I. (2014b): From Laboratory Experiments to Modelling Fault Structures – Geomechanical Characterization and Water Rock Interactions of Geothermal Reservoirs in the Upper Rhine Graben (URG). – Poster Präsentation. – European Geothermal PhD Days 2014, Darmstadt.
- Seithel, R., Müller, B., Steiner, U., Kohl, T. & Stober, I. (2016): Slip Tendency Analysis & Frictional Strength of Reservoir Rocks in south Germany. – Vortrag. – European Geothermal Congress 19-24 September 2016, Strasbourg, France.
- Seithel, R., Schmidt, R. B., Kohl, T., Henk, A. & Stober, I. (2015a): Local Stress Anomaly, Their Interplay to Deep Seated Fault Structures and Geomechanical Characterization of Geothermal Reservoirs in South Germany. – in: *Proceedings World Geothermal Congress*.
- Seithel, R., Steiner, U., Müller, B., Hecht, C. & Kohl, T. (2015b): Local stress anomaly in the Bavarian Molasse Basin. – in: *Geothermal Energy* 3 (1), S. 4.

- Stober, I. & Bucher, K. (2014): Hydraulic and hydrochemical properties of deep sedimentary reservoirs of the Upper Rhine Graben, Europe. – in: *Geofluids*.
- Stober, I. & Bucher, K. (2015a): Hydraulic conductivity of fractured upper crust: insights from hydraulic tests in boreholes and fluid-rock interaction in crystalline basement rocks. – in: *Geofluids* 15 (1-2), S. 161–178.
- Stober, I., Jodocy, M. & Hintersberger, B. (2013): Gegenüberstellung von Durchlässigkeiten aus verschiedenen Verfahren im tief liegenden Oberjura des südwestdeutschen Molassebeckens. – in: *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 164 (4), S. 663–679.
- Stober, I. (2013): Die thermalen Karbonat-Aquifere Oberjura und Oberer Muschelkalk im Südwestdeutschen Alpenvorland. – in: *Grundwasser* 18 (4), S. 259–269.
- Stober, I. (2014): Hydrochemical properties of deep carbonate aquifers in the SW German Molasse basin. – in: *Geothermal Energy* 2 (1), S. 108.
- Stober, I. & Bucher, K. (2015b): Significance of Hydraulic Conductivity as Precondition to Fluid Flow in Fractured and Faulted Crystalline Basement and Its Impact on Fluid-Rock Interaction Processes. – in: *Proceedings World Geothermal Congress*.
- Stober, I., Fritzer, T., Obst, K., Agemar, T. & Schulz, R. (2016a): Tiefe Geothermie - Grundlagen und Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland. – hrsg. von LIAG. – 4. Aufl.. – Hannover, S. 85.
- Stober, I., Schmidt, R. B. & Seithel, R. (2016b): Die Rolle von tiefreichenden Störungen bei der geothermischen Energienutzung. – Vortrag. – GeoTherm 2016, Offenburg.

10 Im Endbericht zitierte Literatur

- Aquilina, L., Pauwels, H., Genter, A. & Fouillac, C. (1997): Water-rock interaction processes in the Triassic sandstone and the granitic basement of the Rhine Graben; geochemical investigation of a geothermal reservoir. – in: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61 (20), S. 4281–4295.
- Barton, C. A., Zoback, M. D. & Moos, D. (1995): Fluid-Flow Along Potentially Active Faults in Crystalline Rock. – in: *Geology* 23 (8), S. 683–686.
- Baud, P., Schubnel, A. & Wong, T.-f. (2000): Dilatancy, compaction, and failure mode in Solnhofen limestone. – in: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 105 (B8), S. 19289–19303.
- Bense, V. F., Gleeson, T., Loveless, S. E., Bour, O. & Scibek, J. (2013): Fault zone hydrogeology. – in: *Earth-Science Reviews* 127, S. 171–192.
- Bertleff, B. (1986): Das Strömungssystem der Grundwässer im Malm-Karst des West-Teils des süddeutschen Molassebeckens. – in: *Abhandlungen des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg* 12.
- Bertleff, B., Joachim, H., Kozirowski, G., Leiber, J., Ohmert, W., Prestel, R., Stober, I., Strayle, G., Villinger, E. & Werner, J. (1988): Ergebnisse der Hydrogeothermiebohrungen in Baden-Wuerttemberg. – in: *Jahreshefte des Geologischen Landesamtes in BadenWuerttemberg* 30, S. 27–116.
- Bertleff, B., Ondreka, J., Plum, H., Storz, R. & Schloz, W. (2005): Bereitstellung hydrogeologischer und geothermischer Grundlagen zur Nutzung der tiefen Geothermie/Hydrogeothermie in der Region Bodensee-Oberschwaben.
- Birner, J., Fritzer, T., Jodocy, M., Savartis, A., Schneider, M. & Stober, I. (2012): Hydraulische Eigenschaften des Malmaquifers im Süddeutschen Molassebecken und ihre Bedeutung für die geothermische Erschließung. – in: *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften* 40 (2/3), S. 133–156.
- Bliedtner, M. & Martin, M. (1986): Erz- und Minerallagerstätten des Mittleren Schwarzwaldes: eine bergbaugeschichtliche und lagerstättenkundliche Darstellung. – (Keine Angabe). – Geolog. Landesamt Baden-Württemberg, S. 782–782.
- Brill, R. (1933): Die Tektonik an der Hauptrheintalverwerfung am Lorettoberg bei Freiburg i. Br.. – in: *Geol. Rundschau* (23a), S. 31–58.
- Brockert, M., Koch, E., Kuckelkorn, K., Lemcke, K., Müller, M., Paulus, B. & Schwarzenhölzer, W. (2007): Bei der Erforschung der Kohlenwasserstoff-Potentiale Süddeutschlands gewonnene Erkenntnisse über den tieferen Untergrund. – Hannover.
- Caine, J. S., Evans, J. P. & Forster, C. B. (1996): Fault zone architecture and permeability structure. – in: *Geology* 24 (11), S. 1025–1028.

- Cherubini, Y., Cacace, M., Scheck-Wenderoth, M. & Noack, V. (2014): Influence of major fault zones on 3-D coupled fluid and heat transport for the Brandenburg region (NE German Basin). – in: *Geothermal Energy Science* (2), S. 1–20.
- Choi, J.-H., Edwards, P., Ko, K. & Kim, Y.-S. (2016): Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach. – in: *Earth-Science Reviews* 152, S. 70–87.
- Curewitz, D. & Karson, J. A. (1997): Structural settings of hydrothermal outflow: Fracture permeability maintained by fault propagation and interaction. – in: *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 79 (3-4), S. 149–168.
- Europäische Gemeinschaft & Schweizerische Eidgenossenschaft (2007): Grenzüberschreitende Bewirtschaftung des Grundwassers im Raum Hegau - Schaffhausen: INTERREG IIIA - Alpenrhein Bodensee Hochrhein, Abschlussbericht.
- Fasching, F. & Vanek, R. (2011): Engineering geological characterisation of fault rocks and fault zones / Ingenieurgeologische Charakterisierung von Störungsgesteinen und Störungszonen. – in: *Geomechanics and Tunnelling* 4 (3), S. 181–194.
- Faulds, J. E. & Hinz, N. (2015): Favorable Tectonic and Structural Settings of Geothermal Systems in the Great Basin Region, Western USA: Proxies for Discovering Blind Geothermal Systems. – Melbourne, Australia.
- Ferrill, D. A. & Morris, A. P. (2003a): Dilational normal faults. – in: *Journal of Structural Geology* 25 (2), S. 183–196.
- Ferrill, D. A. & Morris, A. P. (2003b): Erratum to: “Dilational normal faults”. – in: *Journal of Structural Geology* 25 (5), S. 827.
- Ferrill, D. A. & Morris, A. P. (2007): Second Erratum to “Dilational normal faults” [Journal of Structural Geology 25 (2003) 183–196]. – in: *Journal of Structural Geology* 29 (8), S. 1419–1420.
- Fossen, H., Schultz, R. A., Shipton, Z. K. & Mair, K. (2007): Deformation bands in sandstone; a review. – in: *Journal of the Geological Society of London* 164 (4), S. 755–769.
- Geologisches Landesamt Baden-Württemberg & Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (1989): Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt des Malmkarstes im süddeutschen Molassebecken: Abschlussbericht des Verbundprojektes des BMBF.
- Griesshaber, E., O’Nions, R. K. & Oxburgh, E. R. (1992): Helium and carbon isotope systematics in crustal fluids from the Eifel, the Rhine Graben and Black Forest, F.R.G. – in: *Chemical Geology* 99 (4), S. 213–235.
- Haenel, R. & Staroste, E. (1988): Atlas of geothermal resources in the European Community, Austria and Switzerland. – Hannover.
- Hann, H. P. & Sawatzki, G. (2000): Neue Daten zur Tektonik des Südschwarzwalds. – in: *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins* 82, S. 363–376.

- Hartung, A. (2015): The relationship between the structural development and ore-bearing veins in the Teufelsgrund-mine. – M.Sc. thesis. – Freiburg, Albert-Ludwigs-Universität.
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfess, D. & Mueller, B. (2008): The 2008 database release of the World Stress Map Project.
- Hiramatsu, Y. & Oka, Y. (1968): Determination of the stress in rock unaffected by boreholes or drifts, from measured strains or deformations. – in: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 5 (4), S. 337–353.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W. & Zimmerman, R. W. (2007): Fundamentals of rock mechanics. – 4. ed.. – Malden Mass. u.a.: Blackwell Publ, S. 475.
- Jodocy, M. & Stober, I. (2008): Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland - Landesteil Baden-Württemberg. – in: *Erdöl Erdgas Kohle* 124 (10), S. 386–393.
- Jodocy, M. & Stober, I. (2010a): Geologisch-geothermische Tiefenprofile fuer den suedlichen Teil des Oberrheingrabens in Baden-Wuerttemberg. – in: *Zeitschrift fuer Geologische Wissenschaften* 38 (1), S. 3–25.
- Jodocy, M. & Stober, I. (2010b): Geologisch-geothermische Tiefenprofile für den baden-wuerttembergischen Teil des noerdlichen und mittleren Oberrheingrabens. – in: *Erdoel Erdgas Kohle* 126 (2), S. 68–76.
- Jodocy, M. & Stober, I. (2011): Porositäten und Permeabilitäten im Oberrheingraben und Südwestdeutschen Molassebecken. – in: *Erdoel Erdgas Kohle* 127 (1), S. 20–27.
- Jolie, E., Klinkmueller, M., Moeck, I. & Bruhn, D. (2016): Linking gas fluxes at Earth's surface with fracture zones in an active geothermal field. – in: *Geology* 44 (3), S. 187–190.
- Jung, R., Röhling, S., Ochsmann, N., Rogge, S., Schellschmidt, R., Schulz, R. & Thielemann, T. (2002): Abschätzung des technischen Potenzials der geothermischen Stromerzeugung und der geothermischen Kraft-Wärmekopplung (KWK) in Deutschland: Bericht für das Büro für Technikfolgenabschätzung beim deutschen Bundestag. – Hannover.
- Kolyukhin, D. & Torabi, A. (2012): Statistical analysis of the relationships between faults attributes. – in: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 117 (B5).
- Larsen, P.-H. (1988): Relay structures in a Lower Permian basement-involved extension system, East Greenland. – in: *Journal of Structural Geology* 10 (1), S. 3–8.
- Lee, C.-H. & Farmer, I. (1993): Fluid flow in discontinuous rocks. – 1. ed.. – London u.a.: Chapman & Hall, S. 169.
- Markl, G. (2004): „Wie kommt das Silber ins Gestein? - Die Bildung der Schwarzwälder Erzgänge und ihr Mineralien“. – in: *Silber, Kupfer, Kobalt - Bergbau im Schwarzwald*. – hrsg. von Gregor Markl & Sönke Lorenz. – Bd. 72. – Schriftenreihe des Mineralienmuseums Oberwolfach. – Filderstadt: Markstein Verl., S. 216.
- Mastin, L. (1988): Effect of borehole deviation on breakout orientations. – in: *Journal of Geophysical Research* 93 (B8), S. 9187–9195.

- Moeck, I., Mraz, E., Loske, B., Jentsch, A., Uhlig, S. & Hild, S. (2015): Analysis of multiphase fossil normal faults for geothermal exploration in the Bavarian Molasse Basin. – in: *Journal of Earth Sciences (eingereicht)*.
- Müller, C. & Reinhold, K. (2011): Geologische Charakterisierung tiefliegender Speicher- und Barrierehorizonte in Deutschland - Speicher-Kataster Deutschland. – in: *Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 74.
- Neßler, E., Fröhler, M. & Lebede, S. (1993): Die Rheingrabenverwerfung im Wattkopf-Tunnel bei Ettlingen (Nordschwarzwald). – in: *Geol. Rundschau* 82, S. 765–768.
- Nitsch, J., Pregger, T., Scholz, Y., Naegler, T., Sterner, M., Gerhardt, N., Oehsen, A. von, Pape, C., Saint-Drenan, Y.-M. & Wenzel, B. (2010): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global: Leitstudie 2010. – hrsg. von BMU.
- Paschen, H., Oertel, D. & Grünwald, R. (2003): Möglichkeiten der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland.
- Pauwels, H., Fouillac, C. & Fouillac, A. M. (1993): Chemistry and Isotopes of Deep Geothermal Saline Fluids in the Upper Rhine Graben - Origin of Compounds and Water-Rock Interactions. – in: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57 (12), S. 2737–2749.
- Peška, P. & Zoback, M. D. (1995): Compressive and tensile failure of inclined well bores and determination of in situ stress and rock strength. – in: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 100 (B7), S. 12791–12811.
- Philipp, S. L., Reyer, D., Meier, S. & Hemes, S. (2008): Prognose von Bruchsystemen und Prognose von Bruchsystemen und Permeabilität im Muschelkalk des Oberrheingrabens: Ergebnisse von Geländestudien und numerischen Modellierungen. – Karlsruhe.
- Prestel, R. (1990): Untersuchungen zur Diagenese von Malm-Karbonatgestein und Entwicklung des Malm-Grundwassers im süddeutschen Molassebecken. – Dissertation. – Universität Stuttgart.
- Ramsay, J. G. (1980): The crack–seal mechanism of rock deformation. – in: *Nature* 284 (5752), S. 135–139.
- Reyer, D., Bauer, J. F. & Philipp, S. L. (2012): Fracture systems in normal fault zones cross-cutting sedimentary rocks, Northwest German Basin. – in: *Journal of Structural Geology* 45, S. 38–51.
- Rotevatn, A., Tveranger, J., Howell, J. A. & Fossen, H. (2009): Dynamic investigation of the effect of a relay ramp on simulated fluid flow: Geocellular modelling of the Delicate Arch Ramp, Utah. – in: *Petroleum Geoscience* 15 (1), S. 45–58.
- Rotstein, Y., Behrmann, J. H., Lutz, M., Wirsing, G. & Luz, A. (2005): Tectonic implications of transpression and transtension: Upper Rhine Graben. – in: *Tectonics* 24 (6).

- Rotstein, Y. & Schaming, M. (2011): The Upper Rhine Graben (URG) revisited: Miocene transtension and transpression account for the observed first-order structures. – in: *Tectonics* 30 (3).
- Rühaak, W., Rath, V. & Clauser, C. (2010): Detecting thermal anomalies within the Molasse Basin, southern Germany. – in: *Hydrogeology Journal* 18 (8), S. 1897–1915.
- Sägesser, R. & Mayer-Rosa, D. (1978): Erdbebengefährdung in der Schweiz. – in: *Schweizerische Bauzeitung* 96 (7), S. 107–122.
- Sanjuan, B., Millot, R., Dezayes, C. & Brach, M. (2010): Main characteristics of the deep geothermal brine (5 km) at Soultz-sous-Forêts (France) determined using geochemical and tracer test data. – in: *Comptes Rendus Geoscience* 342, S. 546–559.
- Schuck, A., Vormbaum, M., Gratzl, S. & Stober, I. (2012): Seismische Modellierung zur Detektierbarkeit von Störungen im Kristallin. – in: *Erdöl Erdgas Kohle* 2012 (1), S. 14–20.
- Schulz, R. (2009): Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland - Endbericht.
- Schulz, R., Agemar, T., Alten, J.-A., Kühne, K., Maul, A.-A., Pester, S. & Wirth, W. (2007): Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland. – in: *Erdöl Erdgas Kohle* 123 (2), S. 76–81.
- Schwarz, M. & Henk, A. (2005): Evolution and structure of the Upper Rhine Graben: Insights from three-dimensional thermomechanical modelling. – in: *International Journal of Earth Sciences* 94 (4), S. 732–750.
- Seithel, R., Steiner, U., Müller, B., Hecht, C. & Kohl, T. (2015): Local stress anomaly in the Bavarian Molasse Basin. – in: *Geothermal Energy* 3 (1), S. 77.
- Signorelli, S., Andenmatten-Berthoud, N. & Kohl, T. (2004): Geothermischer Ressourcenatlas der Schweiz: Erarbeitung und Bewertung des geothermischen Potenzials der Schweiz. – hrsg. von Bundesamt für Energie.
- Stober, I. & Jodocy, M. (2011a): Geothermische Nutzhorizonte im westlichen Teil des Süddeutschen Molassebeckens. – in: *Jahreshefte des Geologischen Landesamtes in Baden-Wuerttemberg* 37, S. 7–24.
- Stober, I. & Jodocy, M. (2011b): Hydrochemie der Tiefenwässer im Oberrheingraben - eine Basisinformation für geothermische Nutzungssysteme. – in: *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften* 39 (1), S. 39–57.
- Stober, I., Jodocy, M. & Hintersberger, B. (2012): Vergleich von Durchlässigkeiten aus unterschiedlichen Verfahren - Am Beispiel des tief liegenden Oberen Muschelkalk-Aquifers im Oberrheingraben und westlichen Molassebecken. – in: *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften* 40 (1), S. 1–18.

- Stober, I. & Villinger, E. (1997): Hydraulisches Potential und Durchlässigkeit des höheren Oberjuras und des Oberen Muschelkalks unter dem Baden-Württembergischen Molassebecken. – in: *Jahreshefte des Geologischen Landesamtes in Baden-Wuerttemberg* 37, S. 7–24.
- Stober, I. (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges 16 Tabellen. – Stuttgart: Enke, S. 191.
- Stober, I. & Bucher, K. (2014): Hydraulic and hydrochemical properties of deep sedimentary reservoirs of the Upper Rhine Graben, Europe. – in: *Geofluids*.
- Stober, I., Richter, A., Brost, E. & Bucher, K. (1999): The Ohlsbach plume; discharge of deep saline water from the crystalline basement of the Black Forest, Germany. – in: *Hydrogeology Journal* 7 (3), S. 273–283.
- Torabi, A. & Berg, S. S. (2011): Scaling of fault attributes: A review. – in: *Marine and Petroleum Geology* 28 (8), S. 1444–1460.
- Valley, B. & Evans, K. F. (2003): Strength and elastic properties of the Soultz granite. – Zürich, Switzerland.
- Villinger, E. (1988): Bemerkungen zur Verkarstung des Malms unter dem westlichen süddeutschen Molassebecken. – in: *Bulletin der Vereinigung Schweiz. Petroleum-Geologen und -Ingenieure* 54 (127), S. 41–59.
- Werner, W. & Dennert, V. (2004): Lagerstätten und Bergbau im Schwarzwald - Ein Führer unter besonderer Berücksichtigung der für die Öffentlichkeit zugänglichen Bergwerke. – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, S. 334–334.
- Yielding, G., Freeman, B. & Needham, D. T. (1997): Quantitative Fault Seal Prediction. – in: *AAPG Bulletin* 81 (6), S. 897–917.
- Zitzmann A. (1981): Tektonische Karte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 1 000 000. – Hannover.

Dank

Für die vertrauensvolle Zusammenarbeit danken wir den Partnern des Verbundvorhabens, dem LIAG und dem LLUG. Für die Unterstützung bei den Triaxversuchen gebührt unser Dank Prof. Dr. Kenkmann (Universität Freiburg) und Prof. Dr. Henk (TU Darmstadt). Herrn Prof. Dr. Bucher (Universität Freiburg) danken wir für die großzügige Benutzung des Autoklaven. Für die Erlaubnis zur Benutzung der 3D-Seismikdaten aus dem Oberrheingraben danken wir dem Konsortium Hybridkraftwerk Neuried GmbH & Co.KG sowie Herrn Dr. Bruness (LIAG). Der Firma Erdwerk GmbH und den Stadtwerken München danken wir für die Bereitstellung der Daten aus dem Molassebecken. Herrn Dr. A. Genter von GEIE Exploitation Minière de la Chaleur danken wir für die Bereitstellung von Bohrkernen der Bohrung Soultz GPK1 und von Untersuchungsberichten. Dem LGRB in Freiburg gebührt unser Dank für die Einsichtnahme in das Kernarchiv von Baden-Württemberg. Für großzügige Unterstützungen im Bergwerk Teufelsgrund des S-Schwarzwaldes danken wir dem ehrenamtlichen Team des Besucherbergwerkes. Unser ganz besonderer Dank gilt dem PTJ und BMWi für die Unterstützung des Forschungsprojektes.

Anlagen

- 1 Bergwerke im Schwarzwald
- 2 Permeabilitätsmessungen
- 3 Störungszonen in der Tiefbohrung Soultz-Sous-Forêts
- 4 Bergwerk Teufelsgrund – Schmidthammermessungen
- 5 Bergwerk Teufelsgrund – Durchlässigkeitsversuche
- 6 Bergwerk Teufelsgrund – Mineralogie von Störungszonen
- 7 Probengesteine
- 8.1 Autoklavexperimente – Versuchsbeschreibungen
- 8.2 Autoklavexperimente – Gestein
- 8.3 Autoklavexperimente – Fluide
- 9 Triaxialversuche an ungestörten Proben
- 10 Geomechanische Untersuchungen und Modellierung – Neuried
- 11 Geomechanische Untersuchungen und Modellierung – Sauerlach