

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

Verbundvorhaben „GeoFaces“

**Charakterisierung geothermischer Ressourcen unter Berücksichtigung
von Grenz- und Trennflächen**

Teilvorhaben „GeoFaces-SD“

**Systematische Untersuchung von Fluidwegsamkeiten im Bereich von
Trennflächen in Süd-Deutschland „GeoFaces-SD“**

– Endbericht –

Projektleitung: Prof. Dr. Ingrid Stober (bis 30. 09. 2018)
Prof. Dr. Thomas Kohl (ab 01. 10. 2018)

Zuwendungsgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
(BMWi)
Projektträger Jülich (PtJ-EEN)

Förderkennzeichen: 0324025C

Laufzeit des Vorhabens: 01.11. 2016 – 31. 06. 2019

Archivnummer:

***Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für
Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0324025C gefördert. Die Verantwortung
für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.***

Autoren

Robert Egert, Roman Schmidt, Ingrid Stober, Thomas Kohl

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)

Abteilung Geothermie

Inhalt

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	15
6 Ergebnisse	16
6.1 Beschreibung von Trennflächen	17
6.2 Geochemische Analysen	18
6.3 Thermo-hydro-(geo-)mechanisch-gekoppelte Modellierungen	32
7 Verwertbarkeit	48
8 Fortschritt Anderer	49
9 Publikationen und Vorträge	50
10 Im Endbericht zitierte Literatur	52
Dank	60
Anlagen	60

Zusammenfassung

Im Untergrund gibt es eine Vielzahl verschiedener Trennflächen, die den Fluss hydrothermaler Fluide und damit die geothermische Nutzbarkeit begünstigen oder verhindern können. Während einige Typen (u.a. Schichtung und Schieferung) eine eher untergeordnete Rolle bei der geothermischen Nutzbarkeit spielen, können Störungs- und Klüftzonen erfolgsversprechende Explorationsziele für die geothermische Energienutzung darstellen. Von Interesse sind hierbei vor allem tiefreichende Störungszonen, in denen hohe Temperaturen und eine gute Fluidwegsamkeit vermutet wird. Die Bestimmung eben dieser Trennflächen und deren interner Aufbau im Untergrund ist allerdings mit großen Unsicherheiten belegt, da die thermischen, hydraulischen, geomechanischen und chemischen Eigenschaften oftmals unbekannt sind und direkte Erkundungsmaßnahmen, wie Erkundungsbohrungen, einen hohen Kostenfaktor darstellen. Indirekte Messverfahren, wie geophysikalische Untersuchungen, zeigen zwar die Lokation der Trennflächen durch Materialkontraste an, geben allerdings keinerlei Auskunft über deren Materialbeschaffenheit und tektonischer Historie. Aufbauend auf den ersten, im Projekt *StörTief*, gewonnen Erkenntnissen und Untersuchungskriterien, wurde daher der interne Aufbau von Trennflächen im Detail untersucht und die bei der Entstehung und darauffolgenden tektonischen Historie beteiligten Prozesse einzeln und gekoppelt quantifiziert.

Im Rahmen des Projektes erfolgte hierzu eine Zusammenstellung und Auswertung geologischer, morphologischer, hydraulischer, geochemischer und geomechanischer Daten zur Beschreibung möglicher Trennflächenarten. Neben der rein qualitativen Beschreibung der unterschiedlichen Trennflächenarten, wurden u.a. Spannbreiten für zu erwartende Materialparameter im regionalen und überregionalen Maßstab ermittelt und Abschätzungen über die geothermische Nutzbarkeit als Reservoirgestein getroffen. Aufbauend auf den hieraus gewonnenen Ergebnissen wurden einige Trennflächenarten, Störungen und Klüfte, im Detail weiter beschrieben und Prozesse an deren Oberfläche und in der inneren Struktur (Kern- und Damagezone), die zu einer Verringerung oder Erhöhung der Fluidwegsamkeit führen können, statisch und zeitabhängig untersucht. Hierzu wurden verschiedene Analoggesteine des Oberrheingrabens sowie numerische Modelle genutzt, um die Tiefenlage geothermischer Reservoirs, ausgebildet als Poren- und/oder Klüftgrundwasserleiter, simulieren zu können. Zudem erfolgte ein Vergleich der Ergebnisse mit Bohrkernen und Experimentaldaten vorhandener Tiefbohrungen die im Oberrheingraben abgeteuft wurden sowie den Störungszonen innerhalb des Bergwerks Teufelsgrund.

In Laborversuchen wurde die Entwicklung frischer Bruchflächen hin zu alterierten Trennflächen simuliert. Hierzu wurden Versuche an verschiedenen typischen Reservoirgesteinen des Oberrheingrabens (Granit, Buntsandstein sowie Kalkstein) unter

Reservoirbedingungen (Druck, Temperatur, Mineralisation) in Autoklaven und Batchzellen durchgeführt und die frühe Phase der geochemisch-mineralogischen Trennflächenentwicklung aufgezeichnet. Es wurden hierzu hochsalinare Fluid genutzt, welche den natürlichen Fluiden des Oberrheingrabens nachempfunden wurden und den Fokus auf eine chemische Verbindung gelegt haben (Na-Cl oder Ca-Cl-dominierte Fluide). Es erfolgte die Identifikation chemischer Prozesse und Reaktionen, die zur Auflösung und/oder Bildung von Mineralphasen an der Oberfläche der frischen Bruchflächen führten und Auswirkungen auf die Fluidwegsamkeiten haben. Zudem konnte die Bildung und Ausbreitung von Rissen durch Kontakt der heißen hochsalinaren Lösung mit der Bruchfläche beobachtet werden. Die Sandstein- und Granitproben weisen eine Lösung von Quarz und Illit und eine Bildung zeolithischer Strukturen sowie Chlorit auf. Im Vergleich hierzu weisen Reaktionen mit einem Kalkstein keine charakteristischen Mineralphasen und Fluid-Mineral-Reaktionen auf. Es erfolgte zudem ein Vergleich mit den natürlichen Störungszonen der Bohrungen in Soultz-sous-Forêts und der kontinentalen Tiefbohrung KTB. Auch hier konnten alterationsbedingte Kluftverfüllungen beobachtet werden, welche allerdings, auf Grund des deutlich größeren Zeitraums, deutlich mächtiger sind. Zudem sind diese meist die Folge von Gasphasen innerhalb der Fluide, weshalb vornehmlich karbonatischer Zusammensetzung sind.

Es wurden verschiedene numerische Simulationen durchgeführt, um thermisch-hydraulisch-geomechanischen Prozesse im Bereich von Trennflächen individuell und gegenseitig gekoppelt quantifizieren zu können. Die gekoppelten hydraulisch-mechanischen Simulationen von Triaxialversuchen konnten genutzt werden, um kritische Spannungen, die zum Versagen des Reservoirgesteins und zu Bildung neuer Trennflächen führen, zu quantifizieren und eine Prognosemodell zu entwickeln, welches die kritischen Spannungen in Abhängigkeit der Reservoirspannungen und –temperaturen vorhersagen kann. Zudem konnte anhand von Reservoir Analogsystemen die Abnahme von Porosität und Permeabilität bei zunehmender lithostatischer Auflast gezeigt werden. Des Weiteren wurde eine Auswertung verschiedener geophysikalischer und hydraulischer Experimente an Bohrungen des Forschungsprojektes Soultz-sous-Forêts durchgeführt und hieraus ein Trennflächenmodell entwickelt, welches neben den hydraulische aktiven Störungs- und Kluftzonen und tiefen Geothermiebohrungen auch das granitische Grundgebirge sowie Teile des Buntsandsteinreservoirs berücksichtigt. Dieses Modell konnte genutzt werden, um verschiedene hydraulische Bohrlochexperimente zu kalibrieren und den Fluidfluss entlang und senkrecht zu den einzelnen Trennflächen zu beschreiben und zu zeigen, in wie weit die tektonische Historie und Trennflächenorientierung Hinweise für mögliche Fluidwegsamkeiten oder –barrieren geben können. Ausgehend von der 3D-seismischen Auswertung des potentiellen geothermischen Reservoirs am Standort Neuried wurden transiente vollständig gekoppelte thermo-hydraulisch-geomechanische Modellierungen an einer vollständig repräsentierten Störungzone (bestehend aus

Damagezone sowie Kern) durchgeführt. Ziel war eine Identifikation relevanter Faktoren und Materialeigenschaften, die förderlich für einen geothermischen Kraftwerksbetrieb sind. Alternativ konnten die minimalen Voraussetzungen identifiziert werden, die für den sicheren Betrieb und Nachhaltigen notwendig sind und Risiken, wie induzierte Seismizität, auch langfristig vermeiden. Die Ergebnisse zeigen, dass neben dem Spannungsfeld im Bereich der Störungszone vor allem deren hydraulische Eigenschaften von Bedeutung sind.

1 Aufgabenstellung

Die Gesteine des tieferen Untergrundes sind nicht homogen verteilt, sondern können je nach Lokation und Tiefe eine unterschiedliche innere Struktur aufweisen und durch tektonische Kräfte deformiert werden. Während in der unteren Erdkruste meist Deformation in Form bruchloser Faltung stattfindet, reagieren Gesteine der oberen Erdkruste auf Deformation meist mit bruchhaftem oder sprödem Versagen. Dabei entstehen Trennflächen, entlang derer es zu Verschiebungen, Scherung und Öffnung bei gleichzeitiger Spannungsentlastung kommt. Diese Trennflächen können deutlich größere Durchlässigkeiten als das benachbarte Wirtsgestein aufweisen, wodurch Fluidbewegungen auf diese Strukturen fokussiert werden können. Entlang dieser Trennflächen können aufsteigende Fluide Wärme und gelöste Mineralphasen aus größeren Tiefen in höher gelegene Bereiche transportieren und das umgebende Gestein damit aufheizen. Diese Umstände machen geklüftete und gestörte Bereiche für eine geothermische Nutzung interessant; hierbei sind vor allem die größeren, mindestens 7 km tief reichenden Tiefenstörungen bedeutsam (Jung et al. 2002), aber auch ab ca. 40 °C ist eine direkte geothermische Nutzung möglich. Andere Formen von Trennflächen, bspw. sedimentäre Ablagerungen und Schichtungen, können diesen Fluidfluss dagegen behindern und die Fluidzirkulation stoppen (Genske 2014).

Eine direkte und gezielte Nutzung von Trennflächen zur Gewinnung von Erdwärme ist in Deutschland bisher nicht gegeben. Allerdings wird bei der Erschließung von geothermischen Reservoiren, z. B. im Oberrheingraben und im Malm des Süddeutschen Molassebeckens, darauf geachtet, geklüftete Bereiche zu durchhörtern, um höhere Durchlässigkeiten und Fließraten zu erzielen. Als typisches Beispiel sei die Bohrung Unterhaching Gt 2 genannt. Das Strompotenzial von Klüften beträgt nach Jung et al. (2002) ca. $4,5 \cdot 10^{19}$ J (entspricht 1400 GWh) und ist damit um ein Vielfaches höher als das Potential von sedimentären Heißwasseraquiferen.

Gesamtziel des Verbundvorhabens war es, die tiefreichenden Störungszonen und Trennflächen genauer in ihrer Geometrie zu erfassen und anhand ihrer thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemischen Eigenschaften zu charakterisieren. Aufbauend darauf sollte eine Bewertung des geothermischen Potentials getroffen werden und Randbedingungen für die wirtschaftliche Erschließung eines Reservoirs zur Verfügung gestellt werden. Über das Geothermische Informationssystem (GeotIS) sollten diese zur Verfügung gestellt werden.

Im Forschungsprojekt des KIT sollten die allgemeinen und stark vereinfachten Annahmen über Trennflächen zunächst näher untersucht werden. Ein Bereich sollte sich mit den grundsätzlichen modellbasierten Ansätzen zur Bildung und Entwicklung von Trennflächen für unterschiedliche Gesteinstypen und dem Einfluss auf die jeweilige hydraulische Leitfähigkeit

befassen (Abschnitt 6.1). Es sollten die verschiedenen Arten von Trennflächen und deren Nutzbarkeit für die Geothermie getroffen werden. Aufbauen hieraus wurden exemplarisch Trennflächen in SW-Deutschland mittels Bergwerken und Bohrkernen hinsichtlich ihres Erscheinungsbildes und den geothermisch relevanten Eigenschaften untersucht (Abschnitt 6.2.3).

Mit Hilfe von Laborversuchen in Autoklaven und thermodynamisch-geochemischen Modellierungen konnte die temporale Entwicklung von einzelnen Trennflächen und die Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen in verschiedenen Reservoirgesteinen und mit unterschiedlichen hochsalinaren Reservoirfluiden unter Reservoirbedingungen nachgestellt werden (vgl. Abschnitt 6.2.1 und 6.2.2). Ziel war die Untersuchung von Alterationsvorgängen (Korrosion, Scaling, Lösung von Mineralphasen) auf Trennflächen im Oberrheingraben und die hieraus resultierenden Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit und Nachhaltigkeit von Geothermieranlagen. Diese Ergebnisse wurden mit natürlichen Trennflächen in Bergwerken sowie Bohrungen verglichen (Abschnitt 6.2.3), um auch Aussagen über die Langzeitentwicklung treffen zu können.

Aufbauend auf den ersten geomechanischen Laborversuchen des Projektes StörTief (Schmidt et al. 2016) sollte die Bruchinitiierung an potentiellen Reservoirgesteinen (u.a. Buntsandstein) genauer untersucht werden und die Folge von mechanischer Belastung, wie sie im geothermischen Reservoir erwartet wird bestimmt werden. Hierzu bot sich eine gekoppelte Betrachtung experimenteller Untersuchungen an. Darauf aufbauend sollte eine quantitative Abschätzung getroffen werden, ob die potentiellen Reservoirgesteine des Oberrheingrabens ausreichende Poren-Durchlässigkeiten für den Betrieb eines geothermischen Kraftwerkes aufweisen oder die Existenz natürlicher Trennflächen eine Grundvoraussetzung für den erfolgreichen Betrieb ist (vgl. Abschnitt 6.3.1 und 6.3.3). Mit Hilfe hydraulischer und geophysikalischer Testdaten konnte der Fluidfluss entlang von natürlichen und künstlich-erweiterten (EGS) Trennflächen, detailliert beschrieben werden (Abschnitt 6.3.2). Aufbauend auf den Ergebnissen der mechanischen Trennflächenbildung geringdurchlässiger Reservoirgesteine sowie der Evaluierung zu erwartender Fluidwegsamkeiten, konnte zudem das Risiko einer Bruchinitiierung im Reservoirgestein anhand einer der erwartenden tektonischen Situation im Oberrheingraben quantifiziert werden, wenn durch Kraftwerksbetrieb Spannungsumlagerungen und –änderungen im Bereich Reservoir entstehen (Abschnitt 6.3.3). Die Ergebnisse dieser thermo-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Reservoirmodellierung liefern Rahmenbedingungen für die geothermische Nutzung tieferreichender Trennflächen.

Sämtliche Untersuchungen sind im Detail im Anhang zu diesem Bericht in einzelnen ausführlichen Forschungsberichten dargelegt (vgl. Anlagen 1–7 auf der beiliegenden CD). In

den Abschnitten 6 des Forschungsberichtes sind die Ergebnisse des Forschungsprojektes in kompilierter Form wiedergegeben.

2 Voraussetzungen

Trennflächen können Aquifere in unterschiedlichen Tiefenlagen miteinander verbinden oder trennen. Abhängig vom Trennflächentyp, d.h. Art und Aufbau der Trennfläche, deren Entstehung, den historischen sowie rezenten Spannungsverhältnissen, aber auch den geochemischen Prozessen, können diese Strukturen eine sehr gut bis schlechte Durchlässigkeit aufweisen. Auf Grund dieser großen Spannbreite und den gegenseitigen Abhängigkeiten der Faktoren, eröffnet sich ein Forschungsbereich, welcher die Unsicherheit dieser hydraulischen Strukturen besser eingrenzt und für die wirtschaftliche Nutzung plan- und vorhersagbar macht.

Baden-Württemberg verfügt über zahlreiche natürliche trennflächen-induzierte Systeme. Hierbei sind vor allem Störungszonen von geothermischer Bedeutung, die von der Erdoberfläche bis in die Tiefe reichen können. An der Oberfläche sind diese u.a. durch natürliche Thermalwasseraustritte erkennbar. Bei rezenten bzw. geologisch jungen Kluftsystemen besteht eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass diese eine erhöhte Durchlässigkeit aufweisen, während ältere Trennflächen oftmals durch Ausfällungen und hydrothermale Alteration versiegelt und damit undurchlässig sind.

In Baden-Württemberg (und auch benachbarten Gebieten z.B. in Frankreich) stehen die mit Trennflächen verbundenen geothermischen Reservoirs im Vordergrund der Nutzung (bspw. Rittershoffen und Soultz-sous-Forêts), jedoch besteht aufgrund der geringen Anzahl und kurzen Betriebsdauer dieser Systeme noch wenig Erfahrung. Die technische Realisierung für eine wirtschaftliche und nachhaltige energetische Nutzung ist stark von den geologischen Verhältnissen abhängig.

Im Rahmen der vom BMU und BMWi geförderten Projekte GeotIS, GeoTool und StörTief (Fördernr.: 0327542, 0325136, 0325623C) wurden u.a. Alt-Seismiksektionen im Oberrheingraben geologisch interpretiert und geologische Schnitte durch das Mesozoikum bis in das kristalline Grundgebirge interpretiert. Es konnten Trennflächen mit Versatzbeträgen von wenigen Metern bis hin zu 1 km identifiziert werden. Abb. 1 zeigt die Hauptstörungszonen des Oberrheingrabens. Die seismischen Sektionen wurden im Hinblick auf das tektonische Regime, Kompression (bzw. Transpression) und Extension (bzw. Transtension), gesichtet. Darauf aufbauend ergeben sich Regionen mit rezent überwiegend extensiver und eher kompressiver Charakteristik (Abb. 1). Allerdings konnte auch gezeigt werden, dass dies lediglich eine grobe Einschätzung ist, eine praktische Anwendung allerdings detaillierte Kenntnisse im potentiellen Reservoir erfordert. Aufbauend auf dem im Projekt StörTief

entwickelten und deutlich erweiterten Ansatz, wurden Modelle exemplarisch für den Oberrheingraben entwickelt, wie Fluidbewegungen im Reservoir und entlang von Trennflächen zu erwarten und welche Voraussetzungen hierfür notwendig sind.

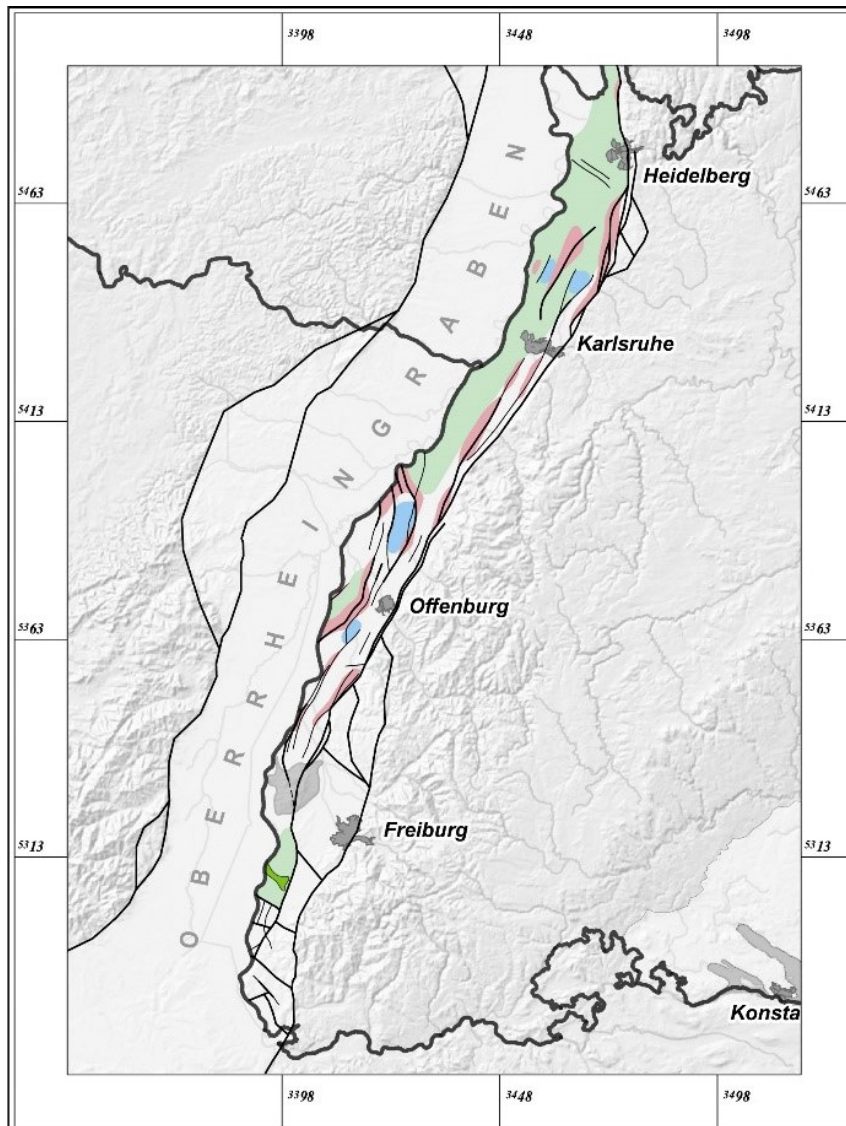


Abb. 1: Im Oberrheingraben lokalisierte Hauptstörungszone sowie deren tektonischer Einfluss (Kompression – rot oder Extension – blau) (Jodocy und Stober 2013)

3 Planung und Ablauf

Der Projektablauf und -fortschritt wurde in Kontakt zum Zuwendungsgeber (BMW) und Projektträger (PtJ) im Rahmen eines halbjährlichen Projekttreffens mit den Kooperationspartnern berichtet. In den Jahren 2016, 2017 und 2018 wurden für den jeweiligen Berichtszeitraum halbjährlich Zwischenberichte verfasst, welche die Arbeits- und Zeitpläne umfassten und über den Leistungsstand informiert haben. Die im Projektantrag definierten Arbeitsschritte wurden gemäß der nachfolgenden Übersicht durch die dazu vorgesehenen

Mitarbeiter erbracht (Tabelle 1). Die Einteilung untergliedert sich dabei in fünf Arbeitspakete: Hydraulisch-geomechanisch gekoppelte 3D-numerische Modellierung, Spezialauswertung hydraulischer Testdaten, Untersuchung natürlicher Trennflächen, detaillierte geochemische Alterationsuntersuchungen sowie Modellierung Alterationsvorgänge.

Tabelle 1: Projektablauf mit der Arbeitspakete sowie deren Bearbeiter

AP	Titel/Kurzform Arbeitspaket: Ressourcen/Detailplanu ng [Anzahl Pers.-Monate PM]	Bearb eiter	2016																PM pro AP	
			2016				2017				2018				2019					
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4		
1	Hydr.-geomechan. gekoppelte 3D-num. Modellierung						1	1	2	3	3	3	2	2	1	1			19	19
	Geomechanische Modellierung	WM 1					1	1	2	3	3	3	2	2	1	1			19	
	Datenrecherche	Hiwi 1								x	x	x							3x	
2	Spezialauswertung hydraul. Testdaten						2	2	1				1	1	2	1			10	10
	Datenrecherche	Hiwi 1											x	x	x	X			7x	
	Auswertung	WM 1					2	2	1					1	2	1			10	
3	Untersuchung natürlicher Trennflächen						1	1	1			1							4	4
	Geländebegehung / Laborarbeiten	WM 2					1	1	1			1							4	
	Probenahme	Hiwi 2					x		x										2x	
4	Detaillierte geochemische Alterationsuntersuchun gen						2	2	2	1	1	1	2	1	1				13	13
	Laborarbeiten	WM 2					2	2	2	1	1	1	2	1	1				13	
	Probenbehandlung	Hiwi 2					x		x		x					x	x		5x	
5	Modellierung Alterationsvorgänge									1	2	1	1	2	2	3	1		13	13
	Geochemische Modellierung	WM 2								1	2	1	1	2	2	3	1		13	
6	Integration der Ergebnisse in GeotIS																			2
	Integration Geomechanik	WM 1															1		1	
	Integration Geochemie	WM 2																1	1	
	Unterstützende Hilfstätigkeit	Hiwi 1														x	x			
WM Pers.-Monate pro Quartal						3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5				
Hiwi-Pers.-Monate pro Quartal						2	3	3	3	1	3	2	3	3	6	2				
WM-Pers.-Monate pro Jahr			2	24				24				11								
Hiwi-Pers.-Monate pro Jahr			2	10				11				8								
Pers.-Monate total																			61	

Der Projektstart des Projektes GeoFaces-SD (FKZ: 0324025C) erfolgte zum 01.11.2016 zunächst mit dem Wissenschaftlichen Mitarbeiter 2 (Roman Schmidt). Die Stelle des Wissenschaftlichen Mitarbeiters 1 (Robert Egert) musste neu ausgeschrieben werden, weshalb sich dessen Beschäftigungsbeginn bis zum 01.01.2017 verzögerte. Diese

Verzögerung wurde im Rahmen einer kostenneutralen Verlängerung berücksichtigt. Die Anstellung des Wissenschaftlichen Mitarbeiters 2 konnte zudem durch Umwidmung nicht genutzter Laboruntersuchungen um einen weiteren Monat verlängert werden. Es wurden geeignete studentische Hilfskräfte über den Projektzeitraum beschäftigt, die unterstützende Tätigkeiten ausführten. Die Leitung des Teilprojektes wurde zum 01.10.2018 von Prof. Dr. Ingrid Stober auf Prof. Dr. Thomas Kohl übergeben.

Das Projekt konnte wie geplant durchgeführt werden. Die geochemischen Untersuchungen mittels Batchzellen sowie Autoklaven wurden in Zeitreihen über den Projektzeitraum durchgeführt und anschließend ausgewertet. Für alle geplanten Reservoir-Analogsysteme konnte aussagekräftige Zeitreihen gewonnen werden. Zudem erfolgte ein Vergleich der Laboruntersuchungen mit den Bohrkernen der Tiefbohrung GPS1 Soultz. Für die Unterstützung und Bereitstellung von Bohrkernen aus der Tiefbohrung GPS1 Soultz danken wir insbesondere Herrn Dr. A. Genter von ÉS-Géothermie und für Einsichtnahme in das Kernarchiv von Baden-Württemberg dem LGRB.

Zur Spezialauswertung hydraulischer Testdaten wurden verschiedene Datensätze des Geothermie-Forschungsprojektes Soultz-sous-Forêts der Bohrungen GPK1 bis GPK4 herangezogen. Diese Datensätze beinhalten neben klassischen Zirkulationsexperimenten auch Markierungsversuche und Flowmeter-Messungen zwischen den einzelnen beteiligten Bohrungen.

Die im Vorgängerprojekt StörTief begonnen numerischen Modellierungen konnten weiter fortgesetzt werden. Hierzu wurden konnten auch die experimentellen hydraulischen Testdaten von Soultz-sous-Forêts zur gekoppelten Modellierung sowie die Triaxialversuche des Vorgängerprojektes StörTief genutzt werden. Des Weiteren wurde eine thermisch, hydraulisch (geo-)mechanisch gekoppelte Modellierung des Buntsandsteinreservoirs im Oberrheingraben, am Beispiel des Standortes Neuried, durchgeführt. Besonderen Dank gilt dem Konsortium Hybridkraftwerk Neuried GmbH & Co.KG für die Erteilung der Erlaubnis und Herrn Dr. Buness (LIAG) für die Übermittlung von Daten.

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). Entsprechende Untersuchungen wurden im süddeutschen Molassebecken mit dem Projekt GeoMol durchgeführt (www.geomol.eu). Im Molassebecken wurden grundlegende Arbeiten bereits seit den 1980er Jahren erstellt. Zu diesen Arbeiten gehören zum Beispiel Bertleff (1986), Bertleff et al. (1988), Bertleff et al. (2005), Brockert et al. (2007), Geologisches Landesamt Baden-Württemberg & Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (1989), Europäische Gemeinschaft & Schweizer Eidgenossenschaft (2007), Villinger (1988), Prestel (1990) und Stober und Villinger (1997).

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 Bundesland Baden-Württemberg (Müller und Reinhold 2011). In den Projekten GeotIS (Geothermisches Informationssystem für Deutschland) (Schulz et al. 2007; Schulz 2009; Jodocy und Stober 2008) und GeoTool (Entwicklung eines Prognosetools zur Unterstützung standortbezogener Aussagen zur Fündigkeit hydrogeothermischer Projekte) in Baden-Württemberg erfolgte eine systematische Aufnahme von geothermisch relevanten Informationen (Poro-Perm-Daten, hydraulische und hydrochemische Daten, seismische Sektionen usw.) über die tief liegenden, potentiell hydrogeothermisch nutzbaren Aquifere (BMU-Fördernummern: 0327542, 0325136). Im Projekt StörTief (BMW-Fördernummer: 0325623C) wurden erste grundlegende Untersuchungen über die Bedeutung von Störungssystemen und die Aussagekraft von Reservoiranalogon erarbeitet. Erste Erkenntnisse über den komplexen geologischen Bau und die physikalischen Prozesse des Oberrheingrabens, insbesondere im Bereich von Trennflächen, liegen somit vor.

Für Deutschland liegt zudem eine Reihe von Kartenwerken vor, die in die Gesamtkarte der Tiefenstörungen von Jung et al. (2002) eingeflossen sind. Dabei handelt es sich um den Atlas geothermischer Ressourcen (Haenel und Staroste 1988), aus dem Informationen für den Oberrheingraben und das süddeutsche Molassebecken entnommen werden können. Großflächige Informationen zur Tektonik sind für Westdeutschland bei Zitzmann (1981) zu entnehmen. Neuere Kompilationen wurden im Projekt StörTief vom KIT zusammen mit dem LIAG und dem LLUR erarbeitet.

Beim Aufbau des Geothermischen Informationssystems konnten wir im Verbundprojekt GeotIS auf die Erfahrungen des vom LIAG entwickelten Fachinformationssystems Geophysik (FIS GP) und die darin enthaltene einzigartige Datensammlung von validierten Geothermiedaten zurückgreifen (Kühne und Gorling 2009) und diese helfen, weiter aufzubauen. Neben der Temperaturdatenbank, die auch vom GeotIS genutzt wird (Agemar et al. 2012; Agemar et al. 2013; Schellschmidt und Stober 2008), enthält das FIS GP ein Subsystem Gesteinsphysik, in dem petrophysikalische Daten gespeichert und zugänglich gemacht werden. Damit war für das Projekt GeoFaces-SD, als assoziierter Partner zum Verbundprojekt GeoFaces ein effizienter Datenaustausch durch die bestehende Infrastruktur gewährleistet.

Die Bearbeitungen des Oberrheingrabens und Süddeutschen Molassebeckens im Rahmen der Projekte GeotIS, GeoTool und StörTief bildeten somit eine exzellente Datengrundlage für das Projektvorhaben GeoFaces-SD. Weitere Untersuchungen insbesondere auf dem hydraulisch-geomechanischen Sektors wurden am KIT-AGW in der Arbeitsgruppe Geothermie durchgeführt (Meixner et al. 2014; Meixner et al. 2016; Hergert et al. 2015). Die dort gewonnenen Daten, Untersuchungsergebnisse, Untersuchungsmethoden und Erkenntnisse wurden im Projekt GeoFaces-SD für weitere ergänzende Bearbeitungen und neue Ansätze insbesondere für allgemeine Trennflächen herangezogen. Wesentliche bislang wenig beachtete Fragestellungen sind beispielsweise die Auswirkung (Reaktion) von regionaler und lokaler geomechanischer Beanspruchung (Tektonik) oder die Interaktion von Klufflächen mit i.d.R. hochmineralisiertem, heißen Tiefenwasser auf die Größe der Permeabilität von Störungen, Klüften oder Trennflächen. Erste Untersuchungsergebnisse hierzu lagen aus dem Projekt StörTief vor. Trennflächen, Klüfte und Störungen können entweder nur wenige Zentimeter breit sein, dann können sie geometrisch als Fläche beschrieben werden, oder sie sind bis zu einigen Dekametern breit und formen dann entsprechende geologische Zonen. Trennflächen, Klüfte und Störungen können einer Extension oder Kompression unterliegen. Auch Mischformen sind möglich. Bekannt ist, dass die Durchlässigkeit von Trennflächen (inkl. Klüfte, Störungen) sehr unterschiedlich sein kann und auch aus dem Wechselspiel von tektonischen Kräften und Spannungsmagnituden, geomechanischer Beanspruchung und Wechselwirkung mit dem Fluid beeinflusst wird.

Geomechanisch-hydraulisch gekoppelte Modellierungen der grundlegenden Triaxialversuche konnten das Verhalten und die Entwicklung von Porosität und Permeabilität der potentiellen Reservoirgesteine unter thermischen und mechanischen Reservoirbedingungen zeigen (Abs. 6.3.1). Es konnten Aussagen und Gesetzmäßigkeiten zur Vorhersagbarkeit von Bruchspannungen zur Trennflächenbildung getroffen werden. Mit Hilfe komplexer hydraulischer Modelle und der gekoppelten Auswertung verschiedener hydraulischer und geophysikalischer Experimente, konnte zudem gezeigt werden, dass Trennflächen eine hohe

Variabilität in der Permeabilität aufweisen. Neben der tektonischen Historie und der Orientierung zum rezenten Spannungsfeld, können u.a. auch fluidchemische und gesteinspezifische Eigenschaften die Durchlässigkeit von Trennflächen fördern oder verringern und müssen bei der Bewertung eines potentiellen Reservoirs berücksichtigt werden (Abs. 6.3.2). Mit Hilfe des im Projekt StörTief entwickelten Trennflächenkonzeptes nach Agemar et al. (2017), konnten die Auswirkungen von Produktion und Injektion in eine dreidimensionale Trennflächenzone simuliert und quantifiziert werden. Unter Berücksichtigung thermischer, hydraulischer sowie geomechanische Prozesse und deren Wechselwirkung, können somit potentielle Rahmenbedingungen für den nachhaltigen Betrieb eines geothermischen Reservoirs evaluiert werden (Abs. 6.3.3).

Anhand von Bohrkernen sowie Messungen im Bergwerk konnte der Mineralbestand innerhalb natürlicher Trennflächen ermittelt werden (Abs. 6.2.2). Mit Hilfe von Autoklav-Experimenten an den verschiedenen potentiellen Reservoirgesteinen des Oberrheingrabens konnte zudem die Alteration an Trennflächen simuliert werden. Hierzu wurden frische Bruchflächen Reservoirbedingungen (hohe Salinität und Temperatur) ausgesetzt und die chemischen Reaktionen mit zunehmender Experimentaldauer quantifiziert. Es konnten Mineralreaktionen identifiziert werden, welche zu Lösungs- und Fällungsprozessen führen und somit die Permeabilität positiv oder negativ beeinflussen können (Abs. 6.2.1). Diese Ergebnisse wurden mit natürlichen Störungszonen aus Bergwerken und Bohrkernen verglichen (Abs. 6.2.3).

Im Projekt GeoFaces-SD konnte auf die Infrastruktur des KIT zurückgegriffen werden. Auch konnte auf die langjährige Erfahrung der Abteilungen Geothermie, Strukturgeologie und Petrophysik des AGW (Institut für Angewandte Geowissenschaften) im KIT bezüglich der Modellierung von gekoppelten Prozessen im geklüfteten Reservoir aufgebaut werden. Durch die Kooperation mit den Geowissenschaften der Universität Freiburg wurde das Fachwissen, insbesondere auch das hydraulische und geochemische, gebündelt und konnte so optimal in das Projekt integriert werden.

5 Zusammenarbeit

Die Erarbeitung regionaler Strukturdaten und hydraulischer Parameter wurde in enger fachlicher Kooperation mit dem LIAG und LUNG erfolgen. Das KIT verfügt über eine nachgewiesene große Erfahrung im Hinblick auf Auswertung und Interpretation hydraulischer, hydrochemischer und geophysikalischer Untersuchungen der KW-Industrie. Diese Expertise wurde dem Verbundprojekt GeoFaces durch die enge Kooperation mit dem Partner KIT (assoziiertes Partner) im Projektvorhaben GeoFaces-SD zur Verfügung gestellt. Bei der inhaltlichen Gestaltung des E-Learning Portals im Verbund-Projektvorhaben GeoFaces hat sich das KIT ebenfalls fachlich inhaltlich eingebracht. Das KIT konnte im beantragten Projekt

auch auf die beratende Expertise von Partnerinstitutionen des LFZG (Landesforschungszentrum Geothermie Baden-Württemberg, lfzg.rz.hs-offenburg.de) und die Geowissenschaften der Universität Freiburg bezüglich Geochemie und Geowissenschaften der TU München zurückgreifen. Zwischen den Angewandten Geowissenschaften des KIT und der Universität Straßburg besteht eine etablierte wissenschaftliche Kooperation und Austausch, der z.B. auf dem mehrtägigen wissenschaftlichen European Geothermal Workshop, EGW, dokumentiert wurde, der jährlich wechselnd in Karlsruhe und Straßburg stattfindet. Für das Projektvorhaben GeoFaces-SD war auch die Expertise der Kollegen der Universität Straßburg mit ihrem großen internationalen Renommee in Bezug auf geochemische aber auch geomechanische Modellierung. Hinzu kommen die Kenntnisse der Kollegen über den tieferen Oberrheingraben auf französischer Seite. Ebenfalls können wir durch unsere langjährige Zusammenarbeit mit den Kollegen an der TU Darmstadt (Ingenieurgeologie) und UNSW Sydney auf ihre Expertise in der geomechanischen Modellierung zurückgreifen und hier einen Austausch pflegen.

Als assoziierter Partner zum Projektvorhaben GeoFaces hat das KIT an allen Arbeitstreffen des Verbundprojektes GeoFaces teilgenommen, dort über den eigenen Projektstand informiert und seiner Berichtspflicht im beantragten Projekt GeoFaces-SD nachgekommen sowie sich an Publikationen beteiligen und die Daten und die gewonnenen Erkenntnisse in geeigneter Weise für das GeotIS zur Verfügung gestellt.

6 Ergebnisse

Die unterschiedlichen Ergebnisse sind in folgenden Publikationen veröffentlicht:

Egert, Robert; Gholami Korzani, Maziar; Held, Sebastian; Kohl, Thomas: Implications on large-scale flow of the fractured EGS reservoir Soultz inferred from hydraulic data and tracer experiments, *Geothermics* 84, (2020), 101749. DOI: [10.1016/j.geothermics.2019.101749](https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101749).

Egert, Robert; Seithel, Robin; Kohl, Thomas; Stober, Ingrid: Triaxial testing and hydraulic–mechanical modeling of sandstone reservoir rock in the Upper Rhine Graben, *Geotherm Energy* 6 (1), (2018), 49. DOI: [10.1186/s40517-018-0109-0](https://doi.org/10.1186/s40517-018-0109-0).

Schmidt, R. B., Bucher, K., Drüppel, K. & Stober, I. (2017a): Experimental interaction of hydrothermal Na-Cl solution with fracture surfaces of geothermal reservoir sandstone of the Upper Rhine Graben. – in: *Applied Geochemistry* 81, S. 36–52. – doi: [10.1016/j.apgeochem.2017.03.010](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.03.010).

Schmidt, R. B., Göttlicher, J. & Stober, I. (2019): Experiments on sandstone alteration under geothermal reservoir conditions and the formation of zeolites. – in: *European Journal of Mineralogy* 31(5), S. 929-944. – doi: [10.1127/ejm/2019/0031-2870](https://doi.org/10.1127/ejm/2019/0031-2870).

Schmidt, R. B., Göttlicher, J. & Stober, I. (2018b): Formation of zeolites in sandstone-brine interaction experiments under geothermal conditions. – Oral presentation. – Goldschmidt Boston.

Weiterhin sind die Ergebnisse teilweise oder maßgeblich ebenfalls in zwei Dissertationen enthalten:

Egert, R.: Coupled processes in the fractured reservoir rock: Inferred from field and laboratory experiments. (Vorraussichtlich 2020)

Schmidt, R. B. (2019): Alteration experiments on geothermal reservoir rocks of the Upper Rhine Graben.

6.1 Beschreibung von Trennflächen

Die Beanspruchung durch geologische Prozesse, wie Erosion oder Plattentektonik, führt in Gesteinen zu Unterbrechungen der mechanischen und/oder gestaltlichen Kontinuität. Diese Unterbrechungen werden als Diskontinuitäten oder Trennflächen bezeichnet. Sie werden in verschiedene Kategorien unterteilt (Genske 2014; Hölting und Coldewey 2013):

- Brüche
- Schieferung
- Schichtung
- Diskordanz

Trennflächen nehmen in vielen geologischen Untersuchungen eine wichtige Rolle ein. Sie haben Auswirkungen auf die mechanischen, hydrologischen und chemischen Eigenschaften einer Gesteinsformation. Da an einigen Trennflächen ein Kohäsionsverlust stattfindet, kann sich das auf die Scherfestigkeit einer Gesteinsschicht auswirken.

An Trennflächen können auf unterschiedliche Art und Weise zusätzliche Wegsamkeiten für Fluide entstehen, die für eine wirtschaftliche Nutzung von Gesteinsformationen, beispielsweise zur Kohlenwasserstoffexploration, die geothermische Energiegewinnung oder für grundwassertechnische Untersuchungen von Bedeutung sind. Alternativ können Trennflächen auch Barrieren für den Fluidfluss darstellen. Die Entscheidung, ob eine Trennfläche eher einen Grundwasserleiter oder eine Barriere darstellt, kann nicht pauschalisiert werden, sondern ist viel mehr von deren Art, internem Aufbau und den beteiligten geologischen Prozessen abhängig. Während bei einigen Trennflächenarten eine Vorhersagbarkeit gegeben ist, zeichnen sich speziell Störungs- und Klüftzonen durch deren große Spannbreite an unterschiedlichen Morphologien und den hieraus resultierenden hydraulischen Fluidwegsamkeiten (bspw. Permeabilitätsunterschiede von mehreren Magnituden) aus. In den Untersuchungen der nachfolgenden Abschnitte 6.2 und 6.3. ist daher liegt daher Fokus auf

Prozessen, die in und entlang von Kluft- sowie Störungszonen stattfinden. Eine ausführliche Beschreibung der Trennflächenarten sowie der zu erwartenden hydraulischen, mechanischen und geochemischen Eigenschaften ist in Anhang 1 dargestellt.

6.2 Geochemische Analysen

6.2.1 Laborexperimente

Autoklave ermöglichen die Beobachtung und Erforschung von Reaktionen von Gesteinsmaterialien mit einem Fluid unter bestimmten Druck- und Temperatur-Bedingungen (Byrappa und Yoshimura 2013). Vorrangiges Ziel der Autoklav-Versuche sind die Veränderungen der Trennflächen bzw. Kluft- und Störungsoberflächen verschiedener Reservoirgesteinen (Muschelkalk, Buntsandstein, Granit) nach Kontakt mit salinaren Fluiden unter verschiedenen p -/T-Bedingungen, wie sie in Reservoiren des Oberrheingrabens vorherrschen. Auf den Autoklav-Experimenten des BMWi-Projektes StörTief mit nur einem Versuchsschritt und reinem Na-Cl-Fluid aufbauend, wurden im Projekt GeoFaces Fluide mit unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen verwendet. Außerdem wurden pro Gestein und Fluid jeweils Zeitreihen-Versuche durchgeführt. Somit konnte einerseits der Einfluss der Fluidzusammensetzung und andererseits der zeitliche Verlauf der Fluid-Mineral-Reaktionen näher betrachtet werden. Dabei wurden neben Veränderungen der Probenmorphologie, chemisch-mineralogische Reaktionen untersucht. Dazu gehören eine Gesamtchemie-Analyse vor und nach dem Versuch, eine Phasenbestimmung und -charakterisierung sowie eine chemische Analyse des eingesetzten Fluids vor und nach den Reaktionen mit der Gesteinsprobe. Die Experimente wurden in einem Autoklavsystem (Abb. 2a) und in mehreren Batch-Zellen (Abb. 2b) durchgeführt. Die Versuchsbeschreibung ist Anlage 3 dargestellt.

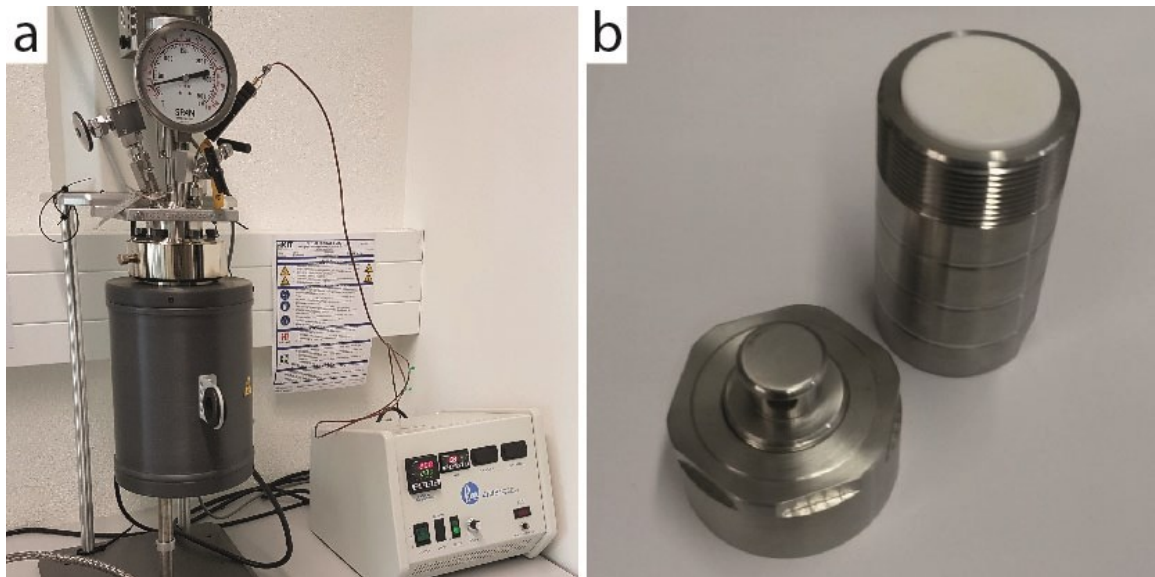


Abb. 2: Im Projekt benutzte Versuchsgeräte: (a) Autoklavsystem von Parr Instruments. (b) Batch-Zellen für die Durchführung von Versuchsreihen.

Mit den Versuchen wurde auch untersucht, wie sich Gesteinsoberflächen, d.h. allgemein Trennflächen, in der Reservoirumgebung (heißes und salinares Fluid) verändern, ob Minerale neu gebildet werden oder vorhandene aufgelöst werden und wie sich dadurch die Durchlässigkeit ändert.

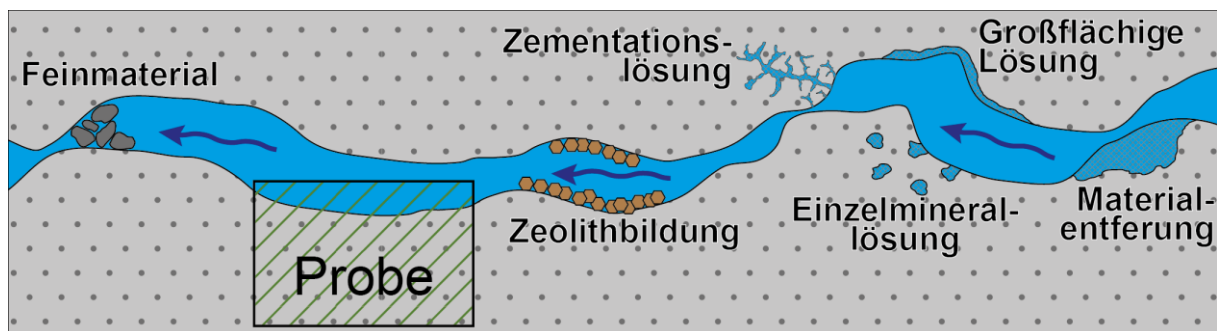


Abb. 3: Konzept der Laborversuche: Die Probe repräsentiert die Oberfläche einer natürlichen Trennfläche.

Für die Experimente wurden Gesteine ausgewählt, die den Reservoirgesteinen des Oberrheingrabens entsprechen. Es wurden feinkörnige, möglichst homogene Lithologien verwendet, um das Verhalten des gesamten Gesteins repräsentativ erfassen zu können.

Für den Buntsandstein wurde der Pfinztäler Sandstein (Abb. 4a), ein quarzitisches gebundener Sandstein, feinslagig, sehr hart, mit hoher Festigkeit, verwendet. Der Malsburg Granit (Abb. 4b) für das kristalline Grundgebirge, ein feinkörniger, relativ unverwitterter Granit. Der Muschelkalk wurde durch den Kelterner Kalkstein (Abb. 4c) repräsentiert, der ein dichter, teilweise schillhaltiger Kalkstein darstellt.

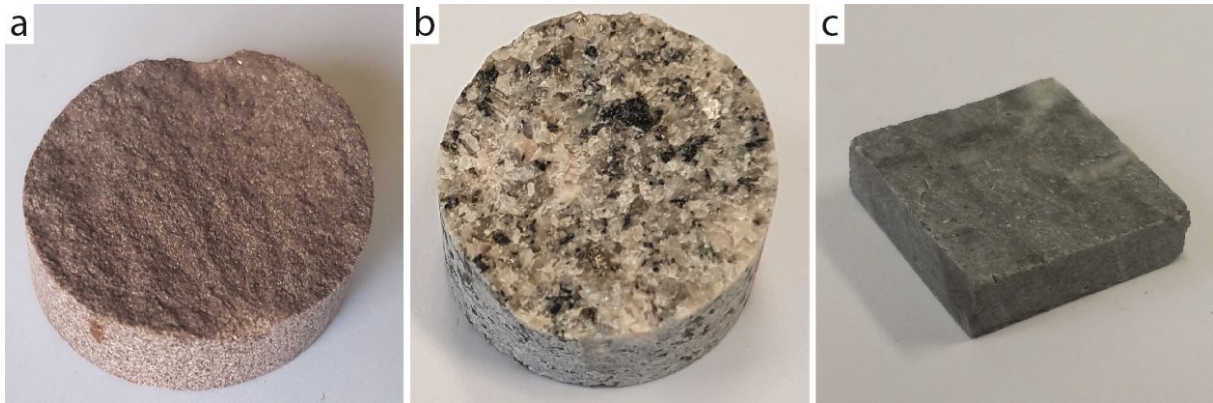


Abb. 4: In den Experimenten verwendete Gesteinsproben: (a) Pfinztäler Sandstein. (b) Malsburg Granit. (c) Kelterner Kalkstein.

Das Fluid wurde künstlich im Labor hergestellt, ähnlich den Tiefenwässern, die im Oberrheingraben in 2 bis 5 km Tiefe vorherrschen. Es wurden mehrere Versuchsreihen mit je Na-Cl-, Na-Ca-Cl- und Ca-Cl-Fluide in den Versuchen verwendet. Die Salinität der Fluide wurde konstant auf 2 mol l^{-1} in Bezug auf die Cl-Konzentration gehalten. 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 (Aquilina et al. 1997; Stober 2014)

Sandstein

Die Beobachtungen auf den Probenoberflächen zeigen in allen Experimenten das Entfernen von Illit aus der Sandsteinzementation nahe der Fluid-Gesteins-Grenze und die Lösung von Quarz unabhängig von der Fluidzusammensetzung. Zusätzlich kommt es zur Lösung von Kalifeldspat in den Ca-Cl-Experimenten. Von diesen Beobachtungen lassen sich Reaktionen der Initialen Mineralphasen mit den Fluiden ableiten, bei denen Zeolithe gebildet werden.

Quarz-Lösung: Quarz-Lösung ist auf den Kornoberflächen allgegenwärtig. Des Weiteren gibt es Quarz-Lösung an den Korngrenzen und reicht dort bis zu $\sim 1 \text{ mm}$ in die Probe hinein (Abb. 5b, c). Dahingegen in den Proben aus den Ca-Cl-Lösungen ist die Quarz-Lösung weniger intensiv (Abb. 5d). Im äußeren Bereich resultiert die Lösung von Quarz in Lösungsgrübchen, welche in den initialen Proben nicht angetroffen wurden (Abb. 5a). Die Langzeitexperimente mit Na-Cl- und Ca-Cl-Lösung zeigen eine weitergehende Quarz-Lösung mit der Versuchsdauer.

Illit-Lösung: Illit löst sich während der Experimente von der Oberfläche und aus der oberflächennahen Zementation in allen Lösungen (Abb. 5). Die Fluide sind meist untersättigt im Bezug zu Illit. Die Fluide sind stärker Illit- als Kalifeldspat-untersättigt, was zu einer erhöhten Lösungsrate von Illit im Vergleich zu Kalifeldspat führt.

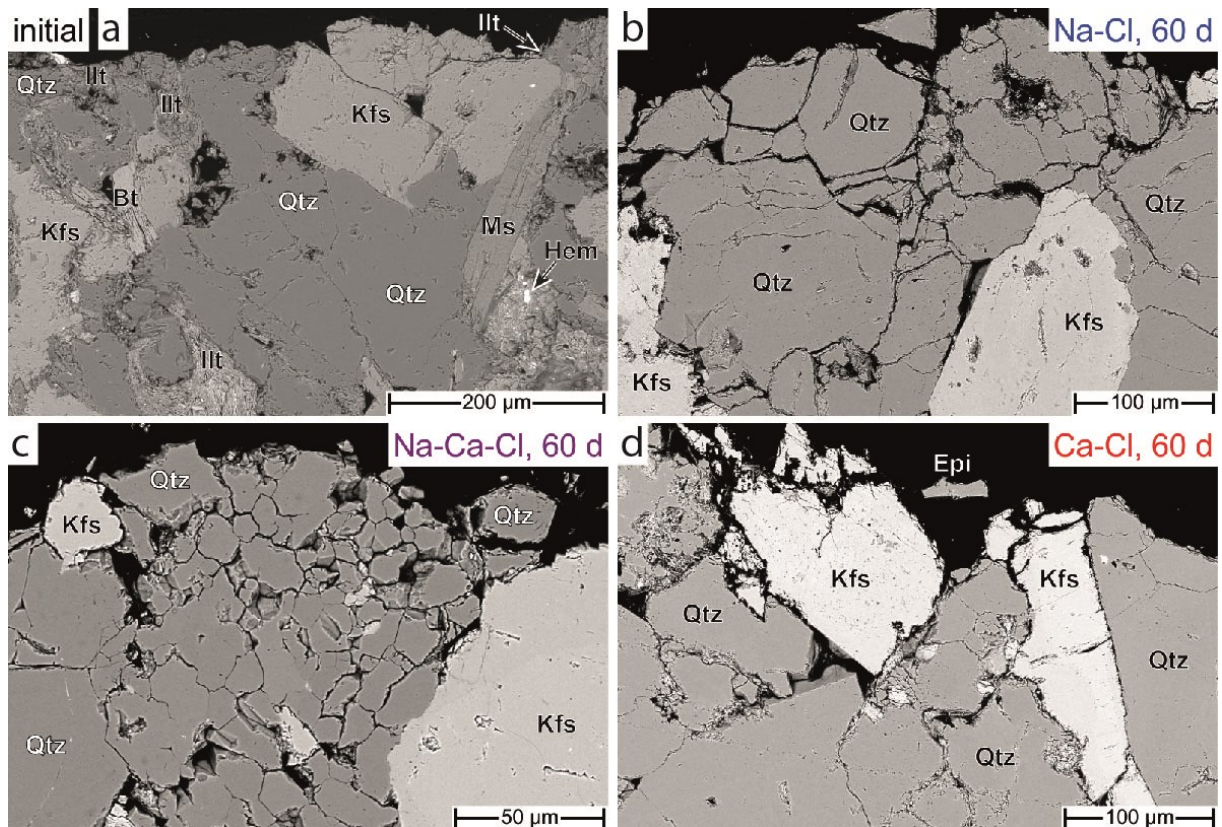


Abb. 5: SEM-BSE-Aufnahme von Dünnschliffen der initialen Probe (a) und nach 60 Tagen Experiment der (b) Na-Cl-, (c) Na-Ca-Cl- und (d) Ca-Cl-Experimenten. (a) Dünnschliff einer frischen Probenoberfläche. Quarz, Kalifeldspat und untergeordnet Muscovit bilden ein kompaktes Gesteinsgefüge mit Illit und akzessorische Biotit und Hämatit im Zwischenraum der Klaster. Poren kommen in größeren Zwischenklasteräumen vor. (b)-(d) Quarz-Körner nahe der Gesteins-Fluid-Kontaktfläche zeigen Lösungserscheinungen an der Oberfläche und intensive Lösung entlang der Korngrenzen. Illit-Entfernung von der Sandsteinzementation erhöht den Zwischenkornraum. Kalifeldspat im Ca-Cl- Experiment zeigt intensive Lösungserscheinungen an den Korngrenzen. Die obere Gesteinskante war jeweils in Kontakt mit der Versuchslösung. Mineralabkürzungen nach Whitney & Evans (2010).

Kalifeldspat-Lösung: Kalifeldspat in Proben die reiner Ca-Cl-Lösung ausgesetzt waren zeigen tiefe Lösungserscheinungen. Vor allem die Proben aus dem 128 d -Experiment zeigen von tiefen Lösungsreaktionen bis in tiefere Bereiche der Probenoberfläche (Abb. 5d). Demgegenüber stehen die Kalifeldspäte aus den Na-Cl- und Na-Ca-Cl-Experimenten, die kaum Lösungserscheinungen vorweisen (Abb. 5b, c). Dementsprechend sind die SI's von Kalifeldspat meist geringer in den Ca-Cl-Lösungen als in den Na-Ca-Cl- und Ca-Cl-Lösungen (Abb. 7).

Da der Kalifeldspat eindeutig Lösungserscheinungen in den Ca-Cl-Experimenten aufweist, kann von einer stöchiometrischen Lösung ausgegangen werden.

Zeolith-Bildung: Drei unterschiedliche Zeolith-Mineralen wurden auf den Proben nach den Experimenten identifiziert (Abb. 6) mit teilweise unterschiedlichen Zusammensetzungen, abhängig von den Lösungszusammensetzungen. Auf den Probenoberflächen der Na-Cl- und Na-Ca-Cl-Experimenten bildeten sich Analcim (Abb. 6a). In den Na-Ca-Cl- und Ca-Cl-

Experimenten ist Wairakit entstanden (Abb. 6b). Epistilbit hat sich sporadisch auf den Proben der reinen Ca-Cl-Experimenten gebildet (Abb. 6c).

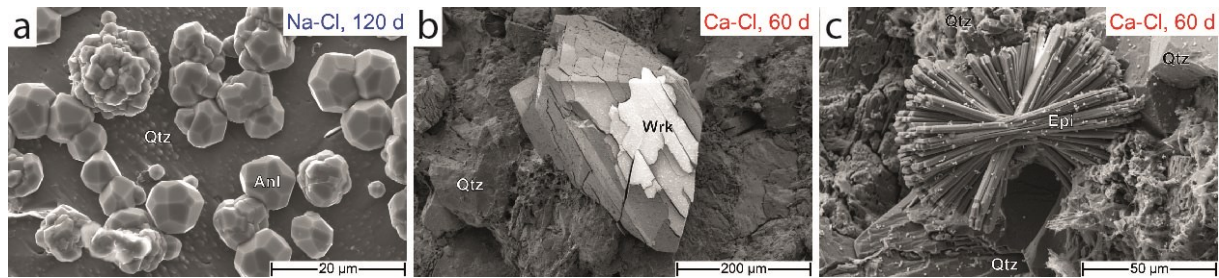


Abb. 6: SEM-SE-Aufnahmen von neugebildeten Zeolithen. (a) Alncime auf der Probenoberfläche nach Versuch mit Na-Cl-Lösung (120 d). (b) Wairakit auf Quarzkörnern der Ca-Cl-Probe nach 60 Tagen Versuchsdauer. (c) Epistilbit auf der Probenoberfläche nach 60 d mit Ca-Cl-Lösung.

Sättigungs-Indizes

Sättigungs-Indizes (SI) wurden mit GWB (Bethke und Yeakel 2015) für verschiedene Mineralphasen berechnet, die potentiell in geochemischen Reaktionen in den Experimenten involviert sein können. Abb. 7 zeigt die SIs für Quarz, Kalifeldspat, Illit, Calcit, Alncim und Wairakit für alle Lösungszusammensetzungen der Experimente und alle Experimentschritte.

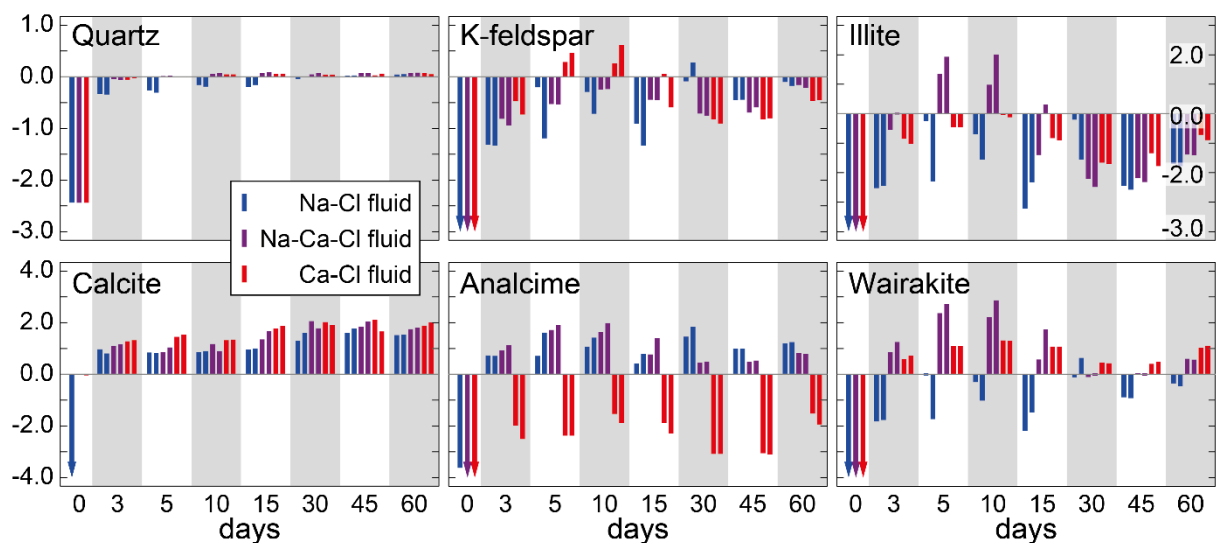


Abb. 7: Sättigungs-Indizes für Quarz, Kalifeldspat, Illit, Calcit, Alncim und Wairakit. Berechnet mit GWB (Bethke & Yeakel, 2015); blau = Na-Cl-Exp., violett = Na-Ca-Cl-Exp., rot = Ca-Cl-Exp.

Die initialen Lösungen sind untersättigt in Bezug zu nahezu allen berechneten Mineralphasen. Die SIs von Quarz streben schnell zu Werten nahe der Quarz-Sättigung, vor allem in den Na-Ca-Cl- und Ca-Cl-Lösungen, wobei die Quarz-Sättigung in den Na-Cl-Lösungen später erreicht wird. Die Lösungen sind über die gesamte Versuchsdauer meist untersättigt in Bezug zu Kalifeldspat und Illit bei allen Lösungszusammensetzungen (mit wenigen Ausnahmen).

Die Versuchslösungen sind übersättigt in Bezug zu Calcit in allen Experimenten (Abb. 7). Die initialen Ca-haltigen Lösungen sind Calcit-gesättigt, wohingegen die initiale Na-Cl untersättigt ist. Die Sättigung in Bezug zu den Zeolithen Alncim und Wairakit reflektieren die

Versuchslösungen: Analcim ist übersättigt in den Na-Cl- und Na-Ca-Cl-Experimenten; Wairakit in den Na-Ca-Cl- und Ca-Cl-Experimenten (mit wenigen Ausnahmen).

Somit zeigen die geochemische Modellierung der zugrundeliegenden Fluiddaten aus den Experimenten, dass die Reaktionen, die von den Versuchen abgeleitet wurden mit den thermodynamisch berechneten Ergebnissen übereinstimmen. Die aufgestellten Mineralreaktionen von Illit und Kalifeldspat als Reaktant und einer Zeolithphase als Produkt sind auch mit geochemischen Modellierungen validierbar.

Zeolithe in ORG-Sandsteinen? Als wichtigster Prozess in den Alterationsexperimenten wurde die Bildung von verschiedenen Zeolith-Phasen und die Auflösung von authigenem Tonmineralen beschrieben. Die Experimentbedingungen bevorzugt die Bildung von Zeolithen: Die chemischen Komponenten, die in den initialen Proben nicht vorhanden sind, werden durch die Versuchslösungen zur Verfügung gestellt, namentlich Wasser und große Mengen an (Erd-) Alkali-Elementen. Die Temperatur- und Druck-Bedingungen sind für die Zeolith-Bildung geeignet. Die Zusammensetzung und das Struktur der Sandsteinproben entsprechen denen natürlichen Gesteinsoberfläche, Das Auftreten und die Zunahme von zeolithischem Material zeigen, dass die Bildung von Zeolith-Bildung kein vorübergehender Prozess ist.

Obwohl Zeolithe in vielen Sandsteinformationen weltweit als Zementationsphasen gefunden (Förster et al. 2006; Schiffman et al. 1985; Coombs und Whetten 1967; Ross 1928, 1941; Coombs 1965), konnten sie in Geothermiereservoirien des ORG bisher nicht angetroffen werden, obwohl die Experimentbedingungen von den ORG-Reservoiren abgeleitet worden sind. Zwei große Unterschiede der natürlichen Zeolith-Vorkommen bestehen allerdings: (1) Die Sandstein-Reservoirien des ORG sind in größere Tiefe (höherer Druck; z.B. Dezayes et al. (2007)), und (2) die Reservoirfluide enthalten größere Mengen an anorganischen Kohlenstoff, im Fluid gelöst (HCO_3^- , $\text{CO}_{2(\text{aq})}$) und/oder als Gasphase (Aquilina et al. 1997; Stober und Bucher 2015; Sanjuan et al. 2016).

(1) Druck/Tiefe: Die Experimente wurden am Dampfdruck der entsprechenden Lösung durchgeführt, d.h. ~ 16 bar bei 200°C . Die entsprechende Tiefe liegt bei ungefähr 200 m, wenn man einen Wasserdruck für hoch-poröses Gestein von $1/3$ des lithostatischen Drucks annimmt ($P_{\text{H}_2\text{O}} \approx 1/3P_{\text{lith}}$, Coombs (1965)). Viele natürliche Zeolith-Vorkommen sind oberflächennah, (z.B. Salt Lake Lewis, Zentral Australien, English, 2001). Jedoch wurde Zeolith-Zementation in Sandsteinen auch in Tiefen bis zu ≤ 10 km nachgewiesen (Chipera und Apps 2001; Coombs 1965). Daher sollte die Tiefe der Geothermie-Reservoirien im ORG im Stabilitätsfeld der Zeolithe liegen.

(2) Anorganischer Kohlenstoff: Der gesamtgelöste anorganische Kohlenstoff (engl. TIC) in den Experimentfluiden liegt bei ca. ≤ 110 mg l^{-1} HCO_3^- für alle Versuchsreihen. Die natürlichen

zeolithischen Sandsteinformationen haben geringe Konzentration von $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$ gemein (Förster et al. 2006; English 2001; Higgs et al. 2015). Im Gegensatz dazu fördern viele Geothermianlagen des ORG Fluide mit erhöhten TIC-Gehalten (Jodocy und Stober 2011; Sanjuan et al. 2016).

Die Stabilität von zeolithischen Mineralvergesellschaftungen wird daher direkt von der CO_2 -Aktivität begrenzt. Bei höheren Gehalten zersetzen sich die Zeolithe zu Calcit, einem Tonmineral und Quarz (Higgs et al. 2015; Weisenberger und Bucher 2010).

Es lässt sich zusammenfassen, Zeolithe sind in natürlichen Sandsteinformationen des ORG stabil. Die Reservoirbedingungen (p, T, Fluidzusammensetzung, Lithologie) sind geeignet für die Bildung von Zeolithen. Der limitierende Faktor ist die Verfügbarkeit bzw. Abwesenheit von Kohlenstoff, gelöst im Formationsfluid oder als Gasphase.

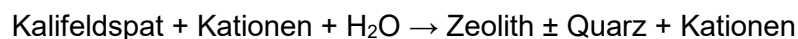
Einfluss der Alterationsprozesse auf den Geothermiekreislauf

Basierend auf den Beobachtungen der Gesteins- und Fluid-Proben, kann die Bildung der Zeolithe mit den Lösungsreaktionen von Illit und Kalifeldspat kombiniert werden.

Somit ergeben sich folgende Reaktionen mit Illit als Ausgangsprodukt:



Die Reaktion von Kalifeldspat hin zu der Bildung von einem Zeolith (bei den Ca-Cl-Fluiden) lautet:



Abhängig davon welche der Reaktionen abläuft und welche Zeolithphase gebildet wird ergeben sich unterschiedliche Gesamtvolumenbilanzen der beteiligten Festphasen. Bei der Bildung von Analcim gibt es einen Volumenzuwachs von 20 %, bei Wairakit 26 % und bei Epistilbit von 35 %. Dabei ist die Lösung von festem Quarz in die Rechnung berücksichtigt. Die Reaktion von Kalifeldspat zu Wairakit und Quarz ergibt eine Volumenzunahme von 16 %. Allerdings wenn das freiwerdende Si nicht als Quarz ausfällt kommt es zu einer Volumenabnahme von -8 % der Festphasen.

Die Experimente zeigen somit, dass die Fluidzusammensetzung bestimmt, welche Mineralphase hauptsächlich gelöst wird, generell Illit in Na-Cl-dominierten Fluiden, Kalifeldspat in Ca-Cl-dominierten Fluiden. Daher entscheidet die Art der Fluide ob eine Zeolithbildende Reaktion eine Volumenzunahme oder -abnahme zur Folge hat. Der Einfluss auf die Permeabilität einer Kluft in einem potentiellen Geothermiekreislauf ist daher groß. Eine Gesamtzunahme der Festphasen verringert tendenziell die Öffnungsweite einer Kluft und reduziert die Effektivität eines Fluidkreislaufes. Andererseits führt eine gesamte

Volumenabnahme zu einer Aufweitung der Kluftöffnung und zu dem gegensätzlichen Effekt. Doch auch wenn in einer Kluft die Lösung von Kalifeldspat der dominierende Prozess ist, kann es zur Ausfällung von $\text{SiO}_{2(\text{aq})}$ in anderen Bereichen des Geothermiekreislaufes kommen, z. B. wo die Fluidtemperatur erniedrigt ist.

Schlussendlich ist das Wissen über die geochemischen und mineralogischen Eigenschaften des geothermalen Fluides und der entsprechenden Reservoirlithologie von entscheidender Bedeutung für einen nachhaltigen Betrieb einer Geothermieanlage.

Granit

Die gleichen Versuche wie mit Sandstein wurden auch mit Malsburg Granit durchgeführt, der Reservoir im kristallinen Grundgebirge repräsentiert.

Der initiale Malsburggranit ist kompakt, relativ unalteriert und zeigt nur vernachlässigbare Lösungserscheinungen in allen vorhandenen Mineralphasen (Quarz, Kalifeldspat, Albit, Biotit/Chlorit). Der initiale Biotit zeigt eine teilweise Chloritisierung in den frischen Proben (Abb. 8).

Reaktionsprozesse

Nach den Versuchen zeigt der Quarz eine intensive Lösung an der Oberfläche der Proben nach Versuchen mit Na-Cl-, Na-Ca-Cl- und Ca-Cl-Fluiden. Sie läuft innerhalb der Mineralkörnern als auch an den Korngrenzen ab (Abb. 8b, c, d). Die Quarz-Lösungsreaktionen in den Versuchen zeigen sich auch in frühen Phasen der Alteration in natürlichen Grundgebirgsreservoirs, z. B. bei der die hydrothermale Alteration im Soultz-sous-Forêts-Granit (Ledésert u.a., 1999). Ebenso kommt Quarz-Lösung in kristallinen Tiefengestein des Kontinentalen Tiefbohrprogramms (KTB) vor (Pielow).

Daneben sind deutliche Lösungserscheinungen in Kalifeldspäten an der Probenoberfläche von Versuchen mit reiner Ca-Cl-Lösung zu erkennen (Abb. 8d).

Die anfänglich schon vorhandene Chloritisierung des Biotits setzte sich während der Versuch an oberflächennahen Biotit-Körnern fort. Somit kommt nach den Versuchen kein Biotit mehr an den Probenoberflächen vor. Des Weiteren zeigen SEM-Aufnahmen der Probenoberflächen und in Dünnschliffen (Abb. 8b, c, d) die Delamination der initialen Biotit-/Chlorit-Körner.

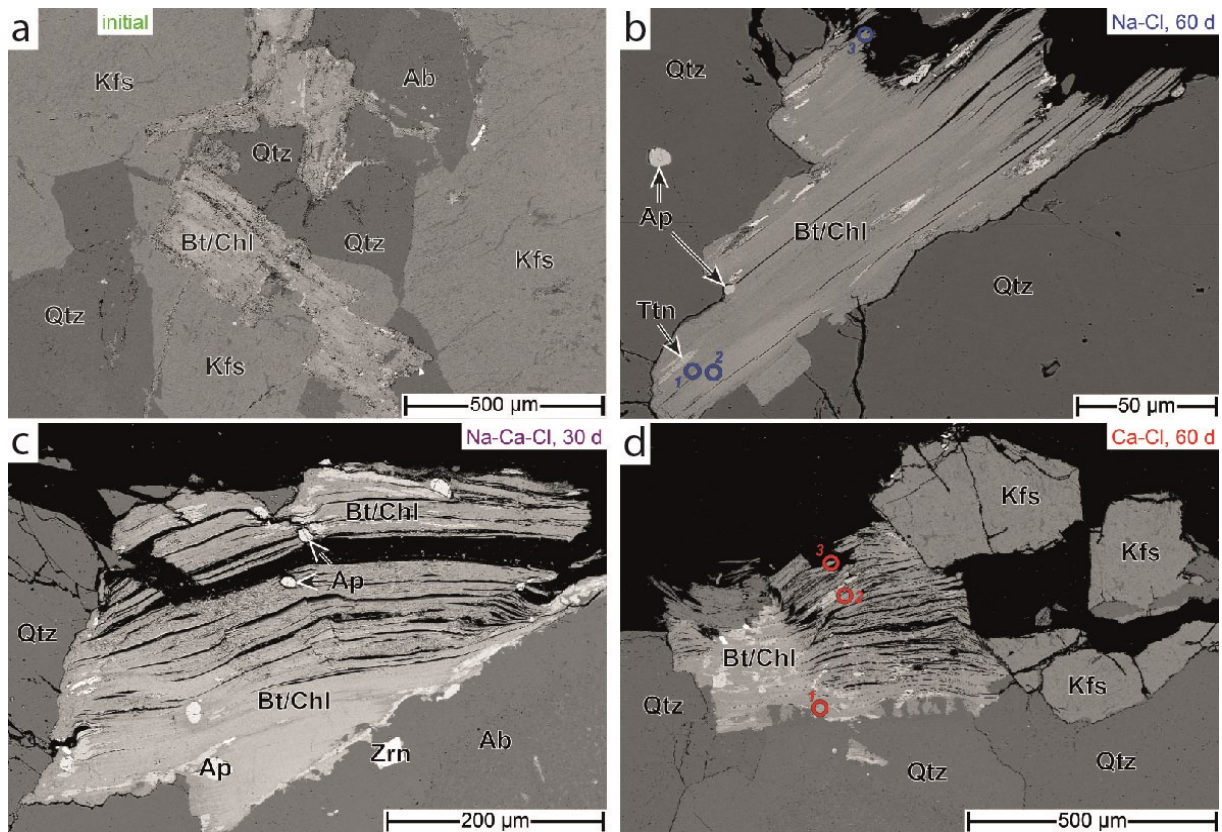


Abb. 8: Dünnschliffabbildungen des Malsburg-Granits: (a) Initiale Probe mit Albit (Ab), Kalifeldspat (Kfs), Quarz (Qtz) und Biotit/Chlorit (Bt/Chl). Biotit/Chlorit an der Probenoberfläche nach 60 Tagen Versuchsdauer mit (b) Na-Cl-Lösung, (c) Na-Ca-Cl-Lösung und (d) Ca-Cl-Lösung.

Das Verschwinden von Biotit von den nach-experimentellen Probenoberflächen geht einher mit dem Auftreten von Hydrobiotit und einer Corrensit-ähnlichen Mineralphase. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass eine Reaktion des initialen Biotit hin zu reinem Chlorit abläuft. Hydrobiotit und das Corrensit-ähnliche Mineral stellen Zwischenprodukte dar, indem sich zuerst die Wechsellagerung von Biotit mit Vermiculit und anschließend von Vermiculit mit Chlorit bildet (Abb. 9).

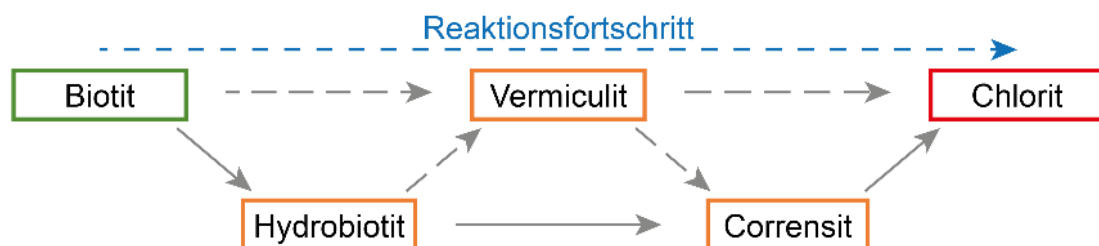


Abb. 9: Phyllosilikatreaktionen während der Versuche. Initialer Biotit wird, über die Zwischenprodukte Hydrobiotit und Corrensit, zu Chlorit umgewandelt.

Die Schwächung des Mineralgefüges ist eine Folge der Biotite/Chlorit-Delamination und Ausdehnungsreaktionen während der Experimente. Die Delamination fördert die Rissausbreitung in angrenzende Mineralkörner, wie viele Studien belegt haben (Rossi und Graham 2010; Isherwood und Street 1976; Wahrhaftig 1965).

Daher ist die Biotit-Alteration, wie sie in den Experimenten beobachtet wurde, hauptsächlich für die Schwächung von Gesteinsmaterial verantwortlich und ist die treibende Kraft für den Fortschritt von Alterationsreaktionen tiefer in den Gesteinskörper hinein.

Wie in den Experimenten ist die Lösung von primärem Quarz und Biotit auch in Granit-Proben der Soultz-sous-Forêts-Bohrung beschrieben. Insbesondere das Auftreten von Tosudit in Alterationszonen des Soultz-Granits entspricht der Bildung von Corrensit in den durchgeführten Experimenten (Bartier et al. 2008; Ledésert et al. 2010; Ledésert et al. 1999)

Somit zeigen die simulierten Mineral–Fluid-Reaktionen der Experimente die gleichen Prozesse wie in frühen Phasen der Reservoirgesteinsalteration in granitischen Systemen des ORG. Dementsprechend läuft die Delaminationsreaktion von Biotit/Chlorit und die resultierende Schwächung des Gesteinsgefüges ab, wenn frisches Reservoirgestein mit hoch-salinaren Reservoirfluiden in Kontakt kommt. Der Einfluss der Alterationsreaktionen auf die Fluidbewegung innerhalb des geothermischen Kreislaufs wird daher die Trennflächendurchlässigkeit erhöhen, zumindest in den frühen Stadien der Alteration.

Vergleich mit Alterationsprozessen in Sandstein-Reservoiren des ORG

Die Ergebnisse der durchgeführten Experimente an Granitproben zeigen eine weitere Ausbreitung von Rissen und Trennflächen in granitischen Reservoiren in Kontakt mit einer heißen, hoch-salinaren Lösung, die durch die Lösung von Quarz und die Chloritisierung, Delamination und z.T. Lösung von Biotit auslöst. Nennenswerte Bildung von Festphasen oder Mineralumwandlungen mit einer Zunahme der Festphasen wurden in den Granitexperimenten nicht beobachtet. Dementsprechend tendieren frische Trennflächen zur weiteren Öffnung während der frühen Phase der Alteration, unter vereinfachten Reservoirbedingungen, wie sie in den Experimenten angenommen wurden.

Dies unterscheidet sich fundamental von den geochemischen Reaktionen in Experimenten unter den gleichen Bedingungen, die mit arkosischem Sandstein durchgeführt wurden. Hierbei reagierte die Sandsteinzementation, bestehend aus Illit, mit den Na-Cl-, Na-Ca-Cl- und Ca-Cl-Lösungen und bildete große Mengen der Zeolithe Analcim, Wairakit und Epistilbit auf den Probenoberflächen.

Daher tendieren frische Trennflächen in Sandsteinen (mit Tonmineral-Zementation) eher zur Reduzierung der Öffnungsweite, wohingegen die Fluidwege in Granit-Reservoiren tendenziell vergrößert werden.

Kalkstein

Wie in allen Experimenten zeigen sich Veränderungen in den Fluidzusammensetzungen der jeweiligen Versuchsfluide nach den Experimenten. Dabei sind die Konzentrationen der meisten Ionen nach den Versuchen im Vergleich zur Ursprungslösung erhöht. Es ergeben sich

von Element abhängige Konzentrationsverläufe über die Zeit, die allerdings keine eindeutigen Trends zeigen, die auf mögliche Fluid-Mineral-Reaktionen schließen lassen.

Dünnschliffe der Proben zeigen Calcit als deutliches Hauptgemengteil (Abb. 10a). Dolomit kommt ebenfalls in größeren Anteilen in den initialen Proben sowie in den Proben nach den Versuchen vor. Außerdem sind in kleinen Adern im Kalkstein geringe Mengen von Silikaten enthalten. Weitere akzessorischen Mineralphasen sind Baryt, Pyrit, Hämatit und Rutil.

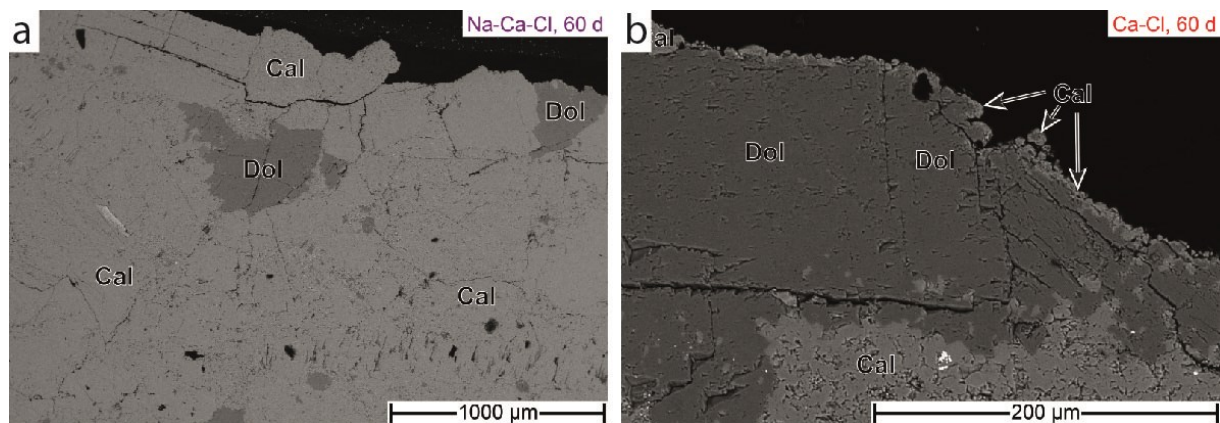


Abb. 10: REM-Aufnahmen von Kalksteinproben in Dünnschliffen nach Experimenten: (a) Übersicht der Probenoberfläche mit Calcit, Dolomit und akzessorisch Baryt nach 60 Tagen mit Na-Ca-Cl-Lösung. (b) Detailaufnahme von Dolomit an der Probenoberfläche mit Calcitrand an der Fluid-Kontaktzone nach 60 Tagen mit Ca-Cl-Lösung. Mineralabkürzungen nach Whitney & Evans (2010).

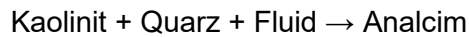
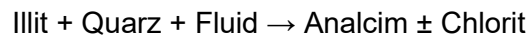
Anders als die Versuche mit Sandstein und Granit haben sich die Probenoberflächen während der Versuche so gut wie nicht verändert. Es sind weder größere Lösungserscheinungen zu erkennen, noch eine die Bildung oder Umbildung von Mineralen auf der Probenoberfläche zu beobachten. Lediglich in den Ca-Cl-Versuchen wurde die oberste Schicht von oberflächennahem Dolomiten vollständig zu Calcit umgewandelt (Abb. 10b). Somit kommt kein Dolomit mehr auf der direkt dem Fluid in Kontakt getretenen Probenoberfläche mehr vor.

Zusammenfassung

Die Ergebnisse der durchgeführten Experimente zeigen eine weitere Ausbreitung von Rissen und Trennflächen in granitischen Reservoirs in Kontakt mit einer heißen, hoch-salinaren Lösung, die durch die Lösung von Quarz und die Chloritisierung, Delamination und z.T. Lösung von Biotit auslöst. Nennenswerte Bildung von Festphasen oder Mineralumwandlungen mit einer Zunahme der Festphasen wurden in den Granitexperimenten nicht beobachtet. Dementsprechend tendieren frische Trennflächen zur weiteren Öffnung während der frühen Phase der Alteration, unter vereinfachten Reservoirbedingungen, wie sie in den Experimenten angenommen wurden.

Dies unterscheidet sich fundamental von den geochemischen Reaktionen in Experimente unter den gleichen Bedingungen, die mit arkoschem Sandstein durchgeführt wurden (Schmidt et al. 2017). Hierbei reagierte die Sandsteinzementation, bestehend aus Kaolinit und

Illit, mit der Na-Cl-Lösung und bildete große Mengen an Analcim auf den Probenoberflächen. Nach Schmidt et al. (2017) verursachen die Reaktionen:



eine Zunahme des Feststoffvolumens um ~20% bzw. ~30%. Die Lösung der Tonminerale fungiert als Al -Quelle, die für die Bildung von Analcim benötigt wird. Folglich limitiert die Verfügbarkeit von Al die Bildung von sekundären Alumosilikaten. Si ist in Fluiden beider Reservoirlithologien durch die Omnipräsenz von Quarz verfügbar. Daher tendieren frische Trennflächen in Sandsteinen (mit Tonmineral-Zementation) eher zur Reduzierung der Öffnungsweite, wohingegen die Fluidwege in Granit-Reservoiren tendenziell vergrößert werden.

Mit den Experimenten konnten die frühen Phasen der geochemisch-mineralogischen Trennflächenentwicklung aufgezeigt werden. Die verwendeten vereinfachten Reservoirbedingungen spiegeln die Temperatur und Fluidzusammensetzung der ORG-Lösungen wider und lösen die Alterationsreaktionen der granitischen Reservoirgesteine aus. Der Vergleich mit natürlichen Alterationserscheinungen in tiefen Kristallingestein, z.B. der KTB und Bohrkernen der Geothermieanlage Soultz-sous-Forêts zeigen klar die Ähnlichkeit zu den Alterationsreaktionen in den Proben der durchgeführten Experimente.

Die Experimente zeigen, Trennflächen in granitische Reservoiren haben die Tendenz bei beginnender Alteration ihre Durchlässigkeit zu erhöhen. Quarz-Lösung und Biotit-Chloritisierung schwächen fundamental das Gesteinsgefüge in der Kontaktzone zwischen Gestein und Lösung und bilden neue Fluidwegsamkeiten in den Gesteinskörper hinein. Hierbei konnten signifikante Unterschiede zu Alterationsprozessen wie sie in Sandstein-Reservoiren ablaufen entdeckt werden. Die dem Fluid ausgesetzte Mineralvergesellschaftung ist daher ein entscheidender Parameter dafür, wie sich die Mineralogie der Trennfläche verändert. In granitischen Reservoiren wandeln sich die Phyllosilikate eher um, als dass sie sich vollständig in das Fluid lösen. Wohingegen die Tonminerale aus der Sandsteinzementation hoch reaktiv unter den Reservoirbedingungen ist und dazu tendieren sich aufzulösen und als Startmaterial für sekundäre Phasen, z.B. Zeolithe, zur Verfügung stehen. Ausführlich sind die Ergebnisse in Anlage 4 dargestellt und beschrieben.

6.2.2 Natürliche Trennflächen

Natürliche Trennflächen wurden auf ihren Mineralgehalt hin untersucht, um diesen mit den Ergebnissen der Laborversuche zu vergleichen und entscheidende Parameter für die geochemisch-mineralogischen Alterationsvorgänge eingrenzen zu können (Anlage 2). Hierfür wurde Kluftmaterial aus Bohrkernen der Soultz-sous-Forêts-Geothermieanlage untersucht. Es

konnten Kerne aus dem Buntsandstein als auch aus dem granitischen Reservoir analysiert werden. Des Weiteren wurden Proben aus Störungszonen vom Bergwerk Teufelsgrund im Südschwarzwald untersucht. Diese liegen in kristallinem Rahmengestein, wie er auch in Reservoirtiefen des ORG vorkommt.

Bohrkerne Saultz-sous-Fôrets

Mehrere Bohrkerne aus dem Saultz-sous-Forêts-Reservoir im Buntsandstein (Abb. 11a) und kristallinem Grundgebirge (Abb. 11b) wurden untersucht.

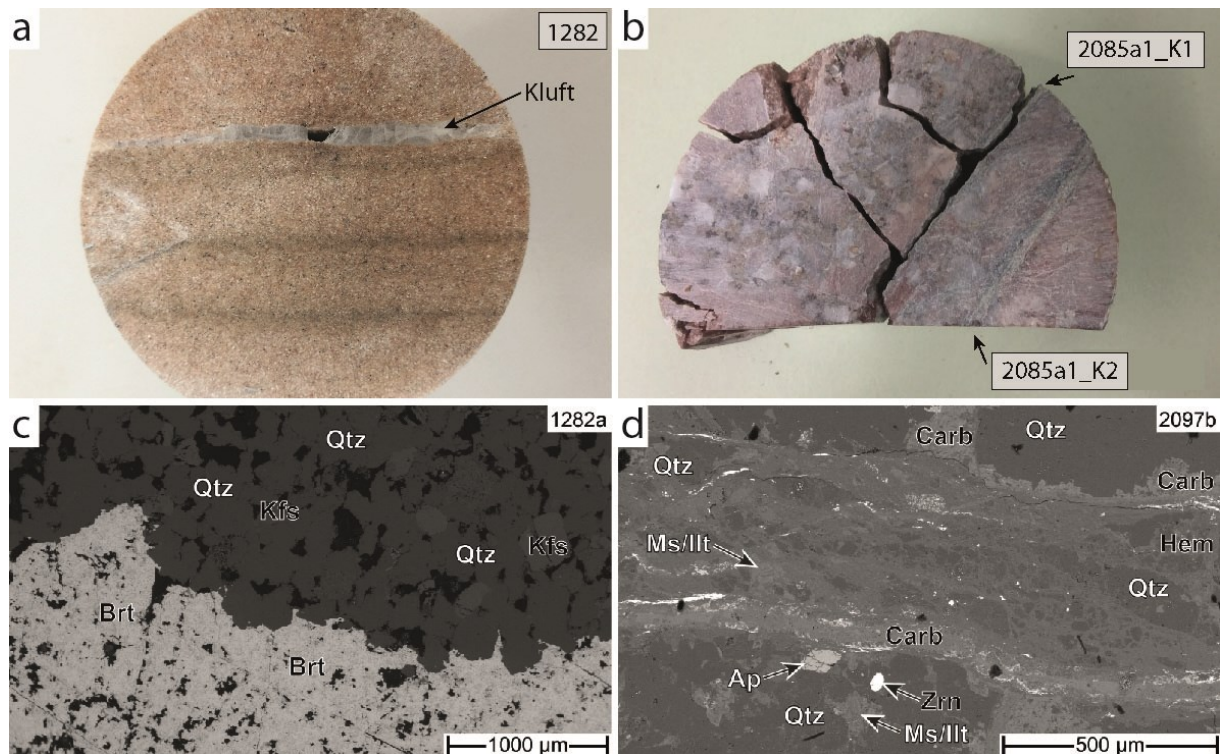


Abb. 11: Bohrkerne der Saultz-sous-Forêts Reservoir: (a) Bohrkern mit Kluft im Buntsandstein. (b) Bohrkern mit Klüften im Granit. (c) Dünnschliff einer Kluft aus einem Buntsandsteinkern. (d) Dünnschliff einer Kluft aus dem Granit.

Die Kluffüllungen im Sandstein sind zum einen geprägt von Schichtsilikaten wie Illit. Diese sind im Dünnschliff oftmals kaum vom Sandstein des Rahmengesteins zu unterscheiden. Zum anderen gibt es Klüfte, die ausschließlich aus Baryt bestehen. Sie sind klar vom Rahmengestein abgetrennt (Abb. 11c).

Im Granit kommen Muscovit/Illit zusammen mit Chlorit in den Kluffüllungen vor. Daneben ist in einigen Klüften Baryt vorhanden. Ein weiterer wichtiger Bestandteil in vielen Klüften sind Karbonate (Abb. 11d). So kommt vor allem Dolomit, aber auch Calcit und stellenweise Siderit als Kluffmineral im Granit vor.

Bergwerk Teufelsgrund

Der mineralogische Aufbau der untersuchten Störungszonen 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 Porphyry kommt vor allem Kaolinit vor. Dagegen herrscht in den Störungszonen im Gneis Chlorit als Schichtsilikat vor. In allen zentralen Bereichen der Störungszonen ist Gips vorhanden. Zusätzlich sind die Störungsfüllungen im Rahmengestein Gneis geprägt von karbonatischen Mineralphasen. Es wurden sowohl Calcit als auch Dolomit und Siderit angetroffen. Auf Grund der begrenzten Anzahl von Proben kann ein belastbarer Zusammenhang zwischen Typ des Rahmengesteins und den vorkommenden Mineralphasen innerhalb der Störungszone nicht gestellt werden. Zusätzlich zu den genannten Hauptgemengteilen der Störungsfüllungen kommen in einzelnen Proben Apatit und Chalkopyrit vor.

6.2.3 Vergleiche der Experimente mit den natürlichen Trennflächen

Bei den Alterationsversuchen im Labor sind, vor allem abhängig von den eingesetzten Gesteinsproben, unterschiedliche geochemisch-mineralogische Reaktionen abgelaufen, mit verschiedenen Mineralphasen bzw. Mineralklassen als Alterationsprodukt. So ist bei der Granitalteration vor allem die Entstehung von Chlorit zu beobachten. Bei den Sandsteinexperimenten sind, bei ähnlicher mineralogischer Zusammensetzung des Sandsteins, vor allem Zeolithe entstanden. Dagegen sind die natürlichen Klüfte, neben Chlorit, vor allem durch das Auftreten von Karbonaten und Sulfaten geprägt. Dies in den relativ oberflächennahen Störungszonen des Teufelsgrund Bergwerkes und ebenso in Reservoirtiefe der Soutz-sous-Forêts Bohrungen.

Die natürlichen Klüfffüllungen stellen natürlich Alterationsprodukte aus einem wesentlich größeren Zeitraum dar als in den Laborexperimenten betrachtet werden konnte. So ähneln sich die Lösungsreaktionen und auch die Chloritisierungsprozesse der Laborexperimente durchaus der natürlichen Vorgänge in frühen Phasen der Trennflächenalteration. Dagegen stellen der Großteil der Alterationsprodukte in natürlichen Klüften und Störungszonen Mineralphasen dar, die Hauptbestandteile aus (gelösten) Gasphasen beinhalten. Insbesondere die weite Verbreitung von Karbonaten zeigen einen hohen Eintrag von $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$ in den Alterationsprozess. Des Weiteren zeigen die als Klüfffüllung weit verbreiteten Sulfate Anhydrid, Gips und Baryt den großen Einfluss von schwefelhaltigen Bestandteilen der Reservoirfluide ($\text{S}/\text{H}_2\text{S}/\text{SO}_4^{2-}$) bei der Bildung von sekundären Alterationsmineralen.

Daneben lässt die Entstehung der Zeolithe in den Experimenten und ihre Abwesenheit in den natürlichen Reservoirn auf den großen Einfluss des gesamtgelösten inorganischen Kohlenstoffs ($\text{CO}_{2(\text{g})}$, $\text{CO}_{2(\text{aq})}$, HCO_3^-) für die Stabilität möglicher Alterationsprodukte schließen.

Abschließend zeigt sich also, dass das Vorhandensein von Gasen und ihre Zusammensetzung eine entscheidende Rolle bei den Alterationsvorgängen in Reservoiren spielen. Abhängig von einer Gasphase und der dadurch begünstigten Alterationsreaktionen ergeben sich somit große Unterschiede bei der Auswirkung von Alterationsprozessen auf die Durchlässigkeit von Trennflächen in einem Geothermiekreislauf.

6.3 Thermo-hydro-(geo-)mechanisch-gekoppelte Modellierungen

6.3.1 Hydraulisch-geomechanische Modellierung der Triaxialversuche

Kleinskalige Laborexperimente an Analogproben ermöglichen die Beobachtung und Erforschung von Prozessen, die im Reservoir in großen Tiefen zu erwarten sind und deren Einfluss auf geothermisch-relevante Parameter zu quantifizieren. Druck- und temperaturabhängige Triaxialexperimente erlauben dabei die Quantifizierung von Spannungen, welche zum Versagen des Gesteins führen können (Jaeger et al. 2007), während Durchflussversuche Rückschlüsse auf die zu erwartende Porosität und Permeabilität geben. Nachteil an Letzterem ist, dass diese Daten nur für Oberflächenbedingung gültig sind, während beide Gesteinsparameter eine Tiefen- bzw. Spannungsabhängigkeit aufweisen (Baud et al. 2004). Die Kopplung beider Experimenttypen sowie der Übertrag in numerische Modelle, erlaubt dennoch die Quantifizierung der hydraulisch relevanten Parameter mit zunehmender Reservoirtiefe (Egert et al. 2018).

Beschreibung der Proben

Ausgehend von den Laboruntersuchungen des Projekts „StörTief“ wurden die hieraus gewonnenen mechanischen Gesteinsparameter der beiden Oberrheingraben Buntsandstein-Analoga Pfinztäler (PfSst) und Tennenbacher (TenSst) Sandstein anhand relevanter Parameter neu evaluiert und numerische hydraulisch-mechanisch-gekoppelte Simulationen durchgeführt, um die Gültigkeit verschiedener Rheologien und Versagenskriterien zu überprüfen und Vorhersagen über mögliche Deformation und Spannungsmagnituden sowie Permeabilitäten treffen zu können. Die beiden Buntsandstein-Derivate (Abb. 12) wurden gewählt, da diese die größtmögliche Relevanz für ein geothermisches Reservoir darstellen und deren Mineralzusammensetzung homogen und repräsentativ für die Reservoir-Formation ist. Der Pfinztäler Sandstein ist ein rötlicher, gut sortiert und geschichteter Sandstein mit einer Porosität von 8 % und einer Permeabilität $3 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$. Der Tennenbacher Sandstein ist ungeschichtet und weist eine gröbere Körnung auf. Die Porosität beträgt 9 % und die Permeabilität $4 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ (Egert et al. 2018). Eine ausführliche Beschreibung sowie Dünnschliffaufnahmen sind in Abb. 5 dargestellt. Um die Reservoirbedingungen des ORG abbilden zu können, müssen Spannungen von mindestens 75 MPa experimentell sowie numerisch erreicht werden und Temperaturen von mindestens 80 °C (Cornet et al. 2007).



Abb. 12: Probenkörper der Triaxialexperimente. A) Pfintztaler Sandstein; B) Tennenbacher Sandstein

Triaxialexperimente

Für den Übertrag in die numerischen Modelle wurden die im Projekt StörTief durchgeführten Triaxialexperimente bezüglich mechanischen Gesteinsparameter neu evaluiert. Hierbei wurden Ringspannungen zwischen 0 und 90 MPa angelegt und die Probe axial deformiert, bis ein Versagen zu beobachten ist. Das E-Modul wird im linear elastischen Bereich einer Deformationskurve bestimmt und beträgt für den Pfintztaler Sandstein 15,71 GPa (ohne Berücksichtigung der Uniaxialversuche: 13,38 GPa) und die Poissonzahl 0,24. Das E-Modul des Tennenbacher Sandsteins beträgt 10,94 GPa (Abb. 13) und die Poissonzahl 0,14. Eine Tiefenabhängigkeit oder/und Temperatureffekte sind nicht sichtbar und für den Temperaturbereich auch nicht zu erwarten (Wu et al. 2013).

Ein Versagen der Probe erfolgt, wenn sowohl der linear-elastische als auch der plastische Bereich der Deformation überschritten wird und der Probenkörper abscheret oder kompaktiert wird. Die maximale Bruchspannung steigt mit zunehmender Ringspannung an, womit diese eine Tiefenabhängigkeit aufweist (Zoback 2011). Üblicherweise wird hierbei die maximale Differentialspannung ($\sigma_1 - \sigma_3$) gegen die mittlere Spannung (mean stress) zum Zeitpunkt des Versagens betrachtet, wobei das Verhältnis dieser Spannungen zueinander eine gesteinspezifische Eigenschaft ist. Je nach Lithologie gibt es eine Vielzahl von empirischen Gesetzen, welche das Verhältnis zueinander beschreiben. Oftmals sind diese allerdings nur für Scherbrüche definiert und linear, wie das zweidimensionale Mohr-Coulomb-Kriterium angesetzt (Jaeger et al. 2007).

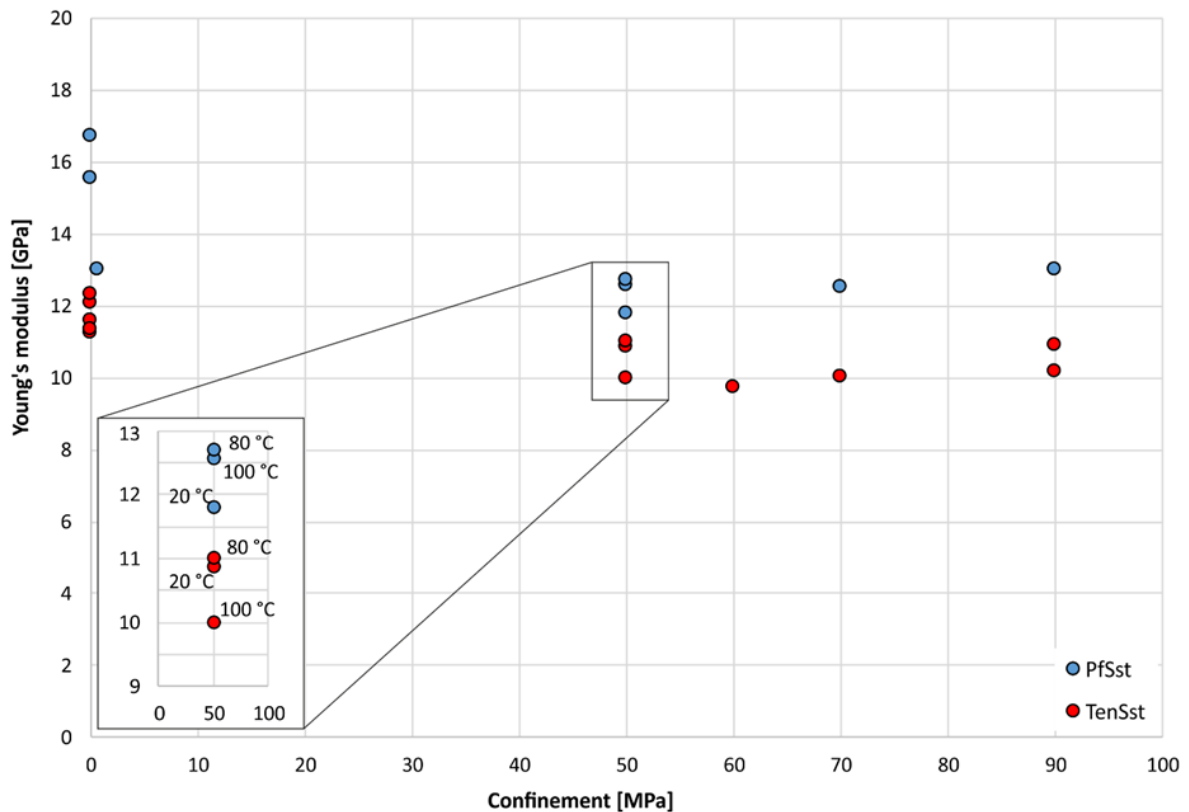


Abb. 13: E-Modul (Young's modulus) beider Sandsteinderivate gegen die Ringspannung (Confinement). Die Uniaxialversuche (ohne angelegte Ringspannung) weisen eine deutliche Streuung auf.

Eine Erweiterung stellt das Kriterium nach Drucker und Prager (1952) dar, welches auch die mittlere Spannung berücksichtigt (Hackston und Rutter 2016). Ein Gesetz, empirisch für Sandsteinproben ermittelt, stellt das Gesetz nach Khan et al. (1991) dar, welches für das Scherversagen bei hohen Spannungsmagnituden eine nonlineare Hüllkurve annimmt. Abb. 14 zeigt einen Vergleich der Versagenskriterien nach Drucker und Prager (1952) und Khan et al. (1991) für die untersuchten Buntsandsteinanaloge sowie für den deutlich weicheren Vogesen-Sandstein aus dem westlichen Oberrheingraben (Bésuelle 2001).

Für die untersuchten Pfnztäler und Tennenbacher Sandstein zeigen beide Kriterien eine hohe Übereinstimmung für mittlere Reservoir-Spannungen im Bereich von 70 MPa bis 120 MPa. Lediglich der deutlich weichere Vogesen-Sandstein zeigt nonlineare Effekte. Für die Analoge des östlichen Oberrheingrabens kann somit das Gesetz nach Drucker und Prager (1952) für die numerischen Simulationen genutzt werden.

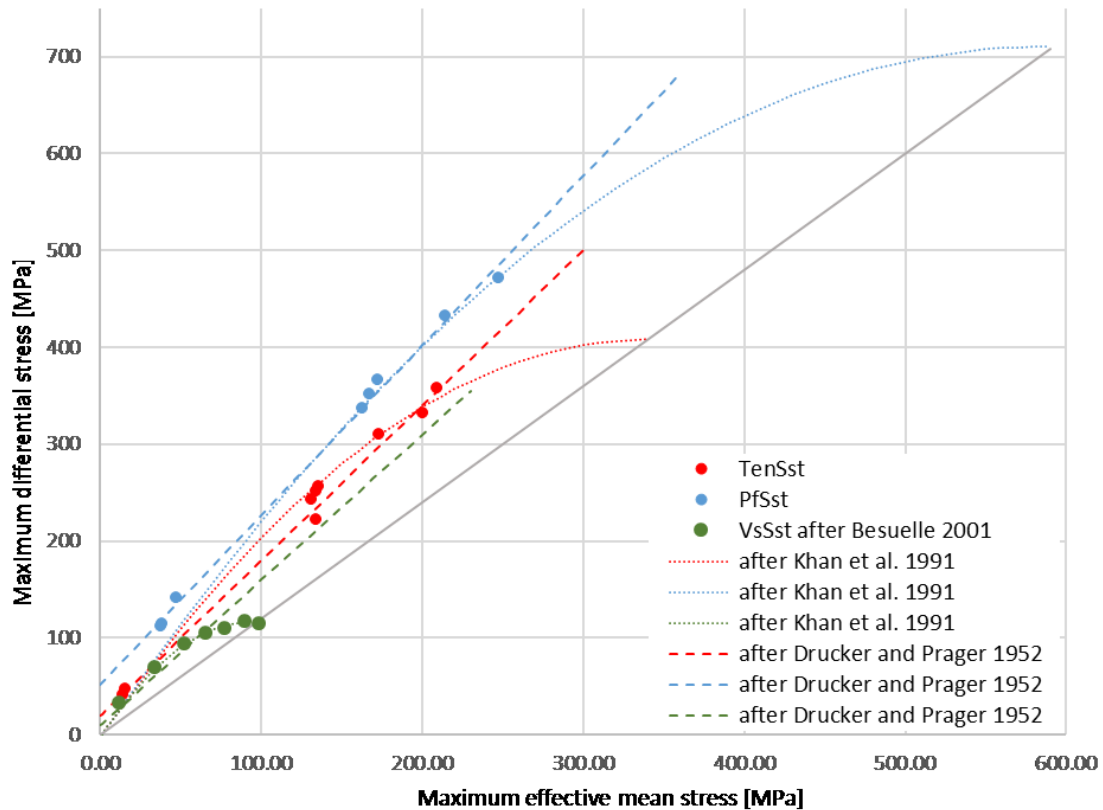


Abb. 14: Vergleich der Bruchkriterien nach Drucker und Prager 1952 und Khan et al. 1991 für die Buntsandsteinanaloge PfSst, TenSst und VsSst

Hydraulisch-Mechanisch-gekoppelte Simulationen

Analog der Laborexperimente, wird in der gekoppelten Simulation ein Probenkörper mit einer konstanten Versatzrate entlang der vertikalen Achse belastet und die Spannungsmagnituden und Versatzbeträge innerhalb des Modells bestimmt. Die Ringspannung wird als konstanter Wert, in Abhängigkeit des jeweiligen Versuchsaufbaus, auf die Mantelfläche aufgebracht. Wie auch in den Experimenten ermittelt, kann sowohl die maximale Bruchspannung zur Bildung von Trennflächen als auch das erste Einsetzen plastischer Deformation mittels des Drucker-Prager-Gesetzes beschrieben werden. Durch die Simulationen kann gezeigt werden, dass sich die Spannungen innerhalb der Probe entlang der Diagonalen einer Sanduhrstruktur lokalisieren und dort die Scherung und Trennflächenbildung innerhalb der Probe zu erwarten ist.

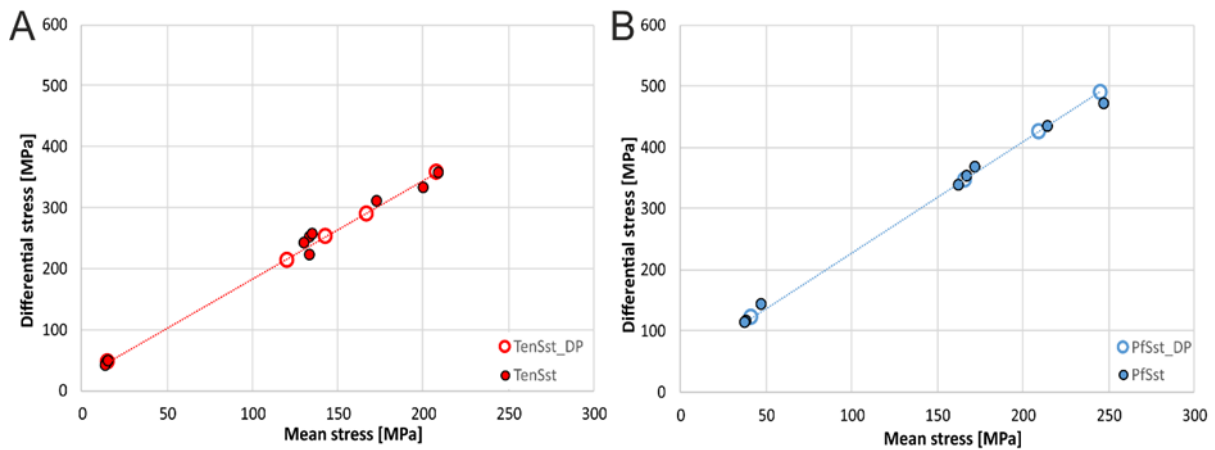


Abb. 15: Differentialspannungen der beiden Sandsteinderivate im Vergleich zwischen Experiment (Punkt) und Modellierung (offener Kreis); A) Tennenbacher Sandstein und B) Pfinztaler Sandstein

Abb. 15 zeigt hierbei den Vergleich der Experimente mit den Simulationen für beide Sandsteinarten. Die Modelle folgen dem linearen Trend, lediglich bei sehr hohen Ringspannungen (von 90 MPa) sind erste Abweichungen zu erwarten, welche im Oberrheingraben allerdings nicht erreicht werden.

Eine hydraulisch-mechanische-gekoppelte Betrachtung der Volumenreduktion durch Auflast ermöglicht die Ermittlung der Porositätsänderungen. Hierfür wurde der linear-elastische Bereich der Deformation betrachtet und die Porenraumänderung (volumetrische Deformation) mit steigender Ringspannung evaluiert. Die Porosität des Tennenbacher Sandstein nimmt ab von initialen 9 % auf ca. 7,8 % (bei 90 MPa Ringspannung) und beim Pfinztaler Sandstein von 8 % auf ca. 6,6 % ab. Neben der Porosität ist die Permeabilität ein wichtiger Faktor, der den Transport von Fluiden und Energie durch das Medium beschreibt. Mit Hilfe des Gesetzes nach Carman (1956) können Volumen- mit Permeabilitätsänderungen korreliert werden. Wie in Abb. 16 dargestellt, verringern sich die Permeabilitäten beider Sandsteintypen um ca. $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$.

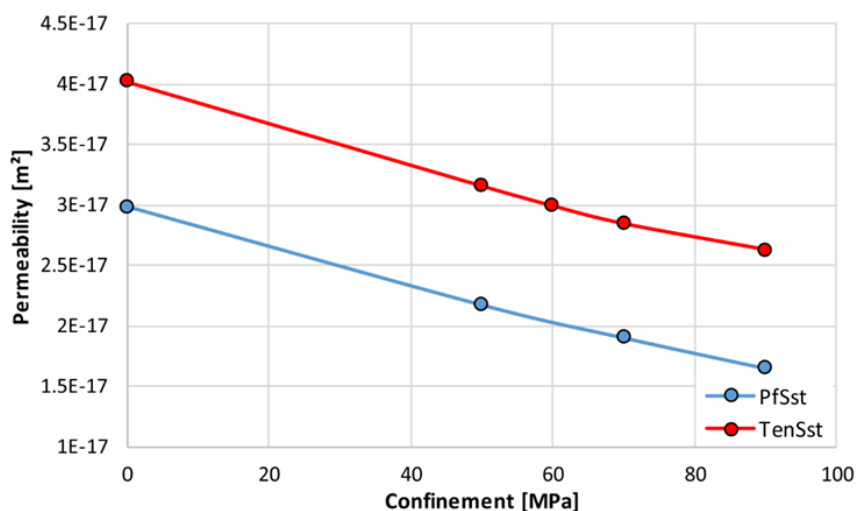


Abb. 16: Permeabilitätsänderungen beider Buntsandsteinanaloge mit zunehmender Ringspannung

Zusammenfassend kann somit gezeigt werden, welche Deformation Oberflächenanaloge des Buntsandsteins erfahren, wenn diese mit Reservoirspannungen oder darüber hinaus belastet werden. Das Erreichen der kritischen Bruchspannung und die Bildung von Trennflächen ist dabei stark abhängig vom Verhältnis der Spannungen ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) zueinander und nimmt mit steigendem horizontalem Druck zu. Mit Hilfe des Ansatzes nach Drucker und Prager (1952) lassen sich die kritischen Spannungen im Reservoir mit hoher Genauigkeit vorhersagen. Für sehr große Spannungsmagnituden nimmt die Unsicherheit zu, die zu einer Überschätzung der Bruchspannung führen können. Hydraulisch konnte gezeigt werden, dass die Kennwerte für die Porosität und Permeabilität in der Größenordnung von 10^{-17} m² sehr gering und tendenziell unterdurchlässig sind und innerhalb des Reservoir, bei vorhandener Spannung, noch weiter abnehmen. Eine ausführliche Beschreibung der Ergebnisse ist in Anlage 5 dargestellt.

6.3.2 Spezialauswertung hydraulischer Testdaten

Für das Arbeitspaket der Spezialauswertung hydraulischer Testdaten wurde auf Daten des Forschungsprojektes Soutz-sous-Forêts zurückgegriffen, da diese Lokation exemplarisch für tiefliegende Reservoirs im Oberrheingraben ist und die wissenschaftliche Datenbasis eine sehr gute Quantifizierung und Separierung einzelner Prozesse im Reservoir und speziell an den Trennflächen ermöglicht. Im Rahmen des Projektes wurden hierzu Zirkulations-, Flowmeter- und Markierungsversuche evaluiert und deren Ergebnisse mit Hilfe weiterer geophysikalischer Daten räumlich innerhalb des Reservoir lokalisiert, um ein detailliertes hydraulisches Modell des geothermischen Reservoirs von Soutz-sous-Forêts zu erstellen (Egert et al. 2020).

Eingangsdaten

Grundlage für das gesamte Modelle ist die seismische Auswertung von Sausse et al. (2010), welche die einzelnen Trennflächen innerhalb des Reservoirs identifizierten. Ausgehend davon wurde durch Held et al. (2014) ein dreidimensionales Strukturmodell erstellt, welches das Kluft- und Störungsnetzwerk auf hydraulisch aktive Elemente reduziert. Auf Grundlage dieses Modells wurde ein erweitertes numerisches diskretes Bruchnetzwerk (DFN) mit der Matrix des kristallinen Grundgebirges und Buntsandsteins angelegt, welches durch eine detaillierte hydraulische Auswertung von Flowmetertests der vier Bohrungen GPK1 bis GPK4, um weitere aktive Trennflächen ergänzt wurde (Abb. 17). Grundlegende Limitierung dieses Ansatzes ist allerdings, dass nur Trennflächen, welche eine höhere Permeabilität als die umgebende Matrix aufweisen, identifiziert werden können. Die Hydraulik der Trennflächen sowie der Matrix wurde anhand zweier Langzeit-Zirkulationsexperimente evaluiert, ein Versuch in 2011 (Genter et al. 2011) zwischen den Bohrungen GPK1, GPK2 und GPK3 sowie ein Versuch an der Bohrung GPK4 in 2009 (Schindler 2009). Die Konnektivität der einzelnen Trennflächen untereinander und die Anbindung des Reservoirs an die großräumigen Störungszonen sowie der Bohrungen

konnte mittels eines Markierungsversuchs von 2005 beschrieben werden (Sanjuan et al. 2006).

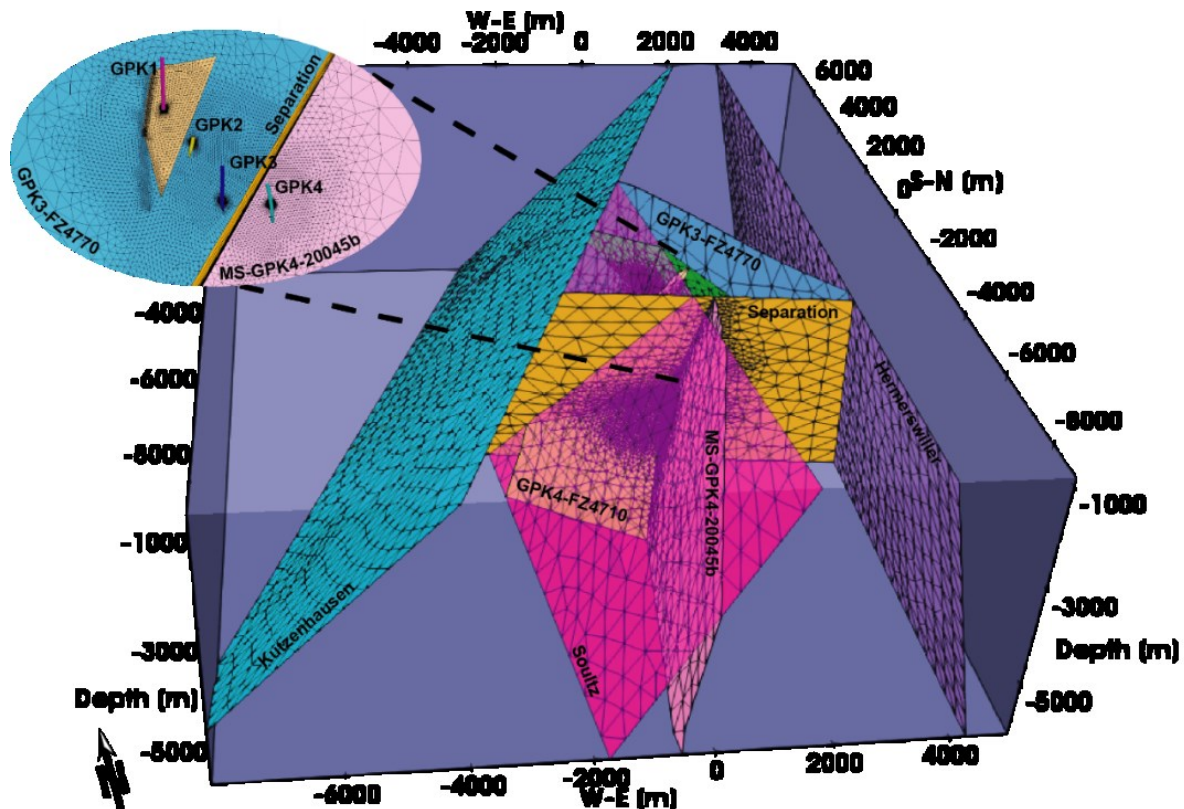


Abb. 17: Trennflächen-Netzwerk und Matrix des geothermischen Reservoirs Soultz-sous-Forêts sowie eine detaillierte Ansicht der einzelnen Bohrungen entlang der Trennfläche GPK3-FZ4770.

Pumpversuche

Zur Auswertung der Pumpversuche wurde das in Abb. 17 dargestellt Modell genutzt und die Produktions- und Injektionsraten in Abhängigkeit der Zeit als Massenquelle genutzt. Mittels Inversion der hydraulisch relevanten Parameter konnte das Modell angepasst werden. Durch eine genaue Anpassung der Fließraten mit der Zeit, kann hierbei ein hochaufgelöstes Ergebnis erzielt werden, dass die Druckänderungen innerhalb der Bohrungen mit hoher Genauigkeit widerspiegeln (Abb. 18).

Die aus den Pumpversuchen ermittelten sind in Tabelle 2 dargestellt. Die hydraulischen Eigenschaften der Trennflächen wurden als Transmissibilitäten angegeben, um eine Gesteinseigenschaft auszudrücken, welche unabhängig von sich ändernden Fluideigenschaften (Bspw. Temperatur und Druck) ist. Die Matrix beschreibt hierbei eine Mischung des tieferen Buntsandsteins und des kristallinen Grundgebirges.

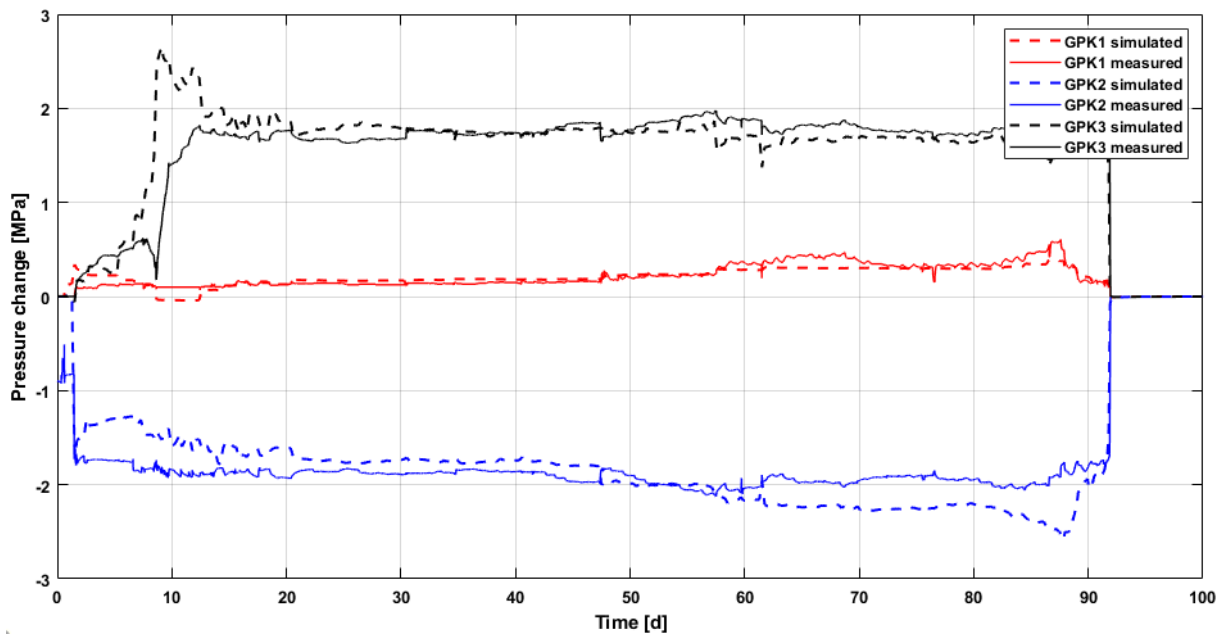


Abb. 18: Druckänderungen während des Pumpversuchs an den Bohrungen GPK1, GPK2 und GPK3 gemessen am Kopf der Bohrung

Tabelle 2: Transmissibilität der Störungen in Soultz Reservoir

Name	Transmissibilität [m^3]
GPK3-FZ4770	1.13E-12
GPK1-FZ2856	1.18E-12
GPK1-FZ-2120	8.95E-12
GPK3-FZ5020	3.96E-13
GPK4-FZ4710	8.91E-13
Soultz Störung	1.60E-12
Kutzenhausen Störung	1.60E-11
MS-GPK2-2000a	1.19E-12
MS-GPK3-2003a	9.18E-12
MS-GPK4-20045b	7.50E-13
Hermerswiller Störung	1.60E-12
PS3-Int (VSP)	2.50E-11
Separation	1.60E-12
GPK3-FZ4770-GPK2	1.32E-12
GPK3-FZ4770-GPK3	6.92E-13
Matrix	1.34E-16
	3.30E-16
	1.65E-16

Tracerexperiment

Während die Ergebnisse des Pumpversuchs, speziell im Bereich der Bohrungen eine gute Genauigkeit aufweisen, fehlen jegliche Informationen über das hydraulische Feld der Trennflächen und Verknüpfungen innerhalb des Reservoirs sowie die Verbindung der

Bohrungen miteinander. Um diese Lücke zu schließen, wurde aufbauend auf den vorherigen Resultaten ein Markierungsversuch ausgewertet, welcher an den drei tiefen Bohrungen des Sultz Reservoirs durchgeführt wurde. Ziel ist dabei eine räumliche Identifikation tieferreichender Trennflächen innerhalb des Reservoirs. Im Rahmen eines Markierungsversuchs wurde 2005 über einen Tag ein temperaturstabiler Fluoreszin-Tracer in die Bohrung GPK3 injiziert und die Konzentrationen an der Injektion sowie an den Bohrungen GPK2 und GPK4 gemessen. In die Bohrung GPK3 wurden 150 kg über 24 h bei einer Fließrate von 15 l/s injiziert, während zeitgleich Fluid aus den Bohrungen GPK2 (11.9 l/s) und GPK4 (3.1 l/s) extrahiert wurde (Sanjuan et al. 2006). Es erfolgte eine kontinuierliche Reinjektion des zuvor geförderten Tracers.

Die maximalen Konzentrationen konnten an der Bohrung GPK2 zwischen 9 und 16 Tagen gemessen werden, während der Peak an GPK4 auch nach 145 Tagen nicht erreicht wurde. Ein Prognose-Modell erwartet diesen nach ca. 1,5 Jahren. Die Abb. 19 und Abb. 21 zeigen den Vergleich zwischen den Messungen und der Modellierung an den Bohrungen GPK2 und GPK4. Die Ergebnisse sind mit Hilfe der initialen Injektionskonzentration normalisiert. Die leichten Abweichungen an der Bohrung GPK2 zum Ende des Experiments hin, können verschiedene Ursachen haben, wie beispielsweise die Vernachlässigung von Matrixdiffusion oder ein schwacher thermischer Zerfall des Fluoreszins mit zunehmender Experimentdauer Adams und Davis (1991).

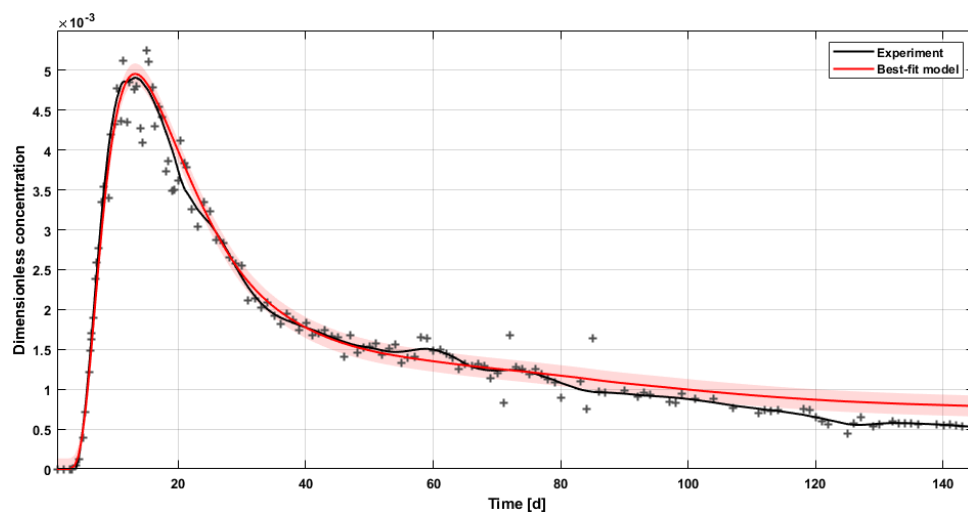


Abb. 19: Vergleich der Fluoreszin-Konzentrationen zwischen dem numerischen Modell und dem Experiment an der Bohrung GPK2 mit zunehmender Zeitdauer

Die Ergebnisse zeigen eine sehr gute hydraulische Verbindung der Bohrungen GPK3 und GPK2. Diese wird über mindestens zwei verschiedene Störungen realisiert und haben eine Ankunftszeit der Konzentrationsfront von 13 und 90 Tagen (Abb. 19). Eine weitere Verbindung ist im hydraulischen Modell sichtbar, allerdings auf Grund sehr starker Durchmischung nicht in den Kurven messbar (weiße Linien in Abb. 20). Die hier dargestellten Trennflächen sind

entlang der Hauptstörungsfeldes orientiert, weshalb diese eine erwartbare hohe Durchlässigkeit aufweisen, welche durch die Modelle bestätigt werden konnte.

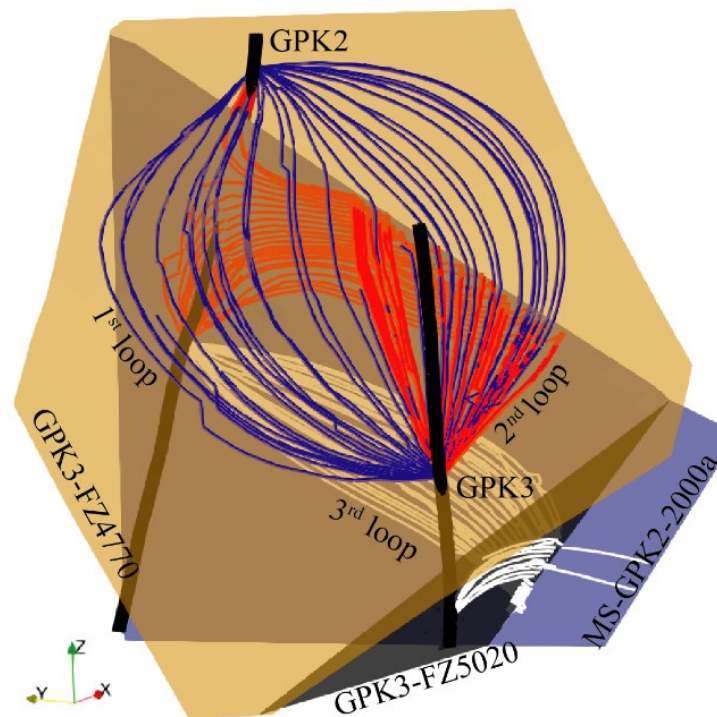


Abb. 20: Die aus dem Markierungsversuch ermittelten präferenziellen Fließwegsamkeiten an Trennflächen innerhalb des Soutz Reservoirs

Dagegen sind die Konzentrationen an GPK4 (Abb. 21) sehr gering und zudem von geringer Ausbreitungsgeschwindigkeit entlang der Trennflächen. Dies spricht für eine schlechte hydraulische Verbindung der Bohrungen miteinander. Auf Grund der geringen Konzentration ist davon auszugehen, dass eine weitere Durchmischung stattfindet. Diese wird durch eine große Störungszone realisiert, welche senkrecht auf dem heutigen Spannungsfeld steht und das Reservoir mit dem großräumigen Strömungsfeld des Oberrheingrabens verbindet. Diese Störungszone wurde bereits auf Grund von seismischen Daten vermutet (Kohl et al. 2006), konnte bisher allerdings nicht erbohrt oder anderweitig nachgewiesen werden.

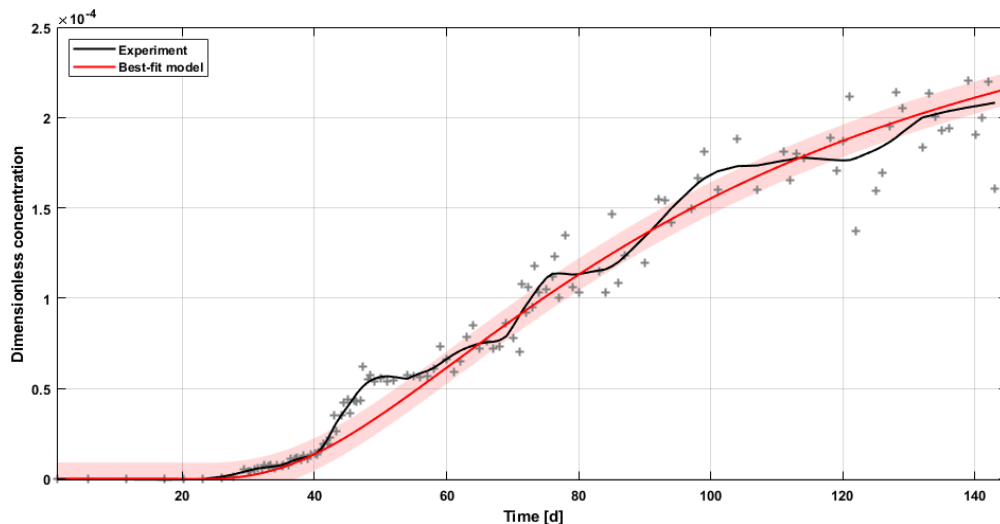


Abb. 21: Vergleich der Fluoreszin-Konzentrationen zwischen dem numerischen Modell und dem Experiment an der Bohrung GPK4 mit zunehmender Zeitdauer

Somit lässt sich insgesamt schlussfolgern, dass das Trennflächen-Netzwerk in Soultz sehr heterogen aufgebaut ist. Trennflächen parallel zum rezenten Spannungsfeld sind tendenziell gut durchlässig, allerdings können auch senkrecht dazu angeordnete Trennflächen eine hydraulische Durchlässigkeit, beispielsweise durch rezente Reaktivierung, aufweisen und müssen nicht zwangsläufig impermeabel sein. Die hier genauer untersuchte Trennfläche trennt dabei das geothermische Reservoir in einen hochproduktiven nördlichen Teil (GPK1 bis GPK3) sowie in einen schlechter nutzbaren südlichen Teil (der Bereich um GPK4). Eine ausführliche Beschreibung aller evaluierten Experimente sowie ein Ausblick der Folgen dieses hydraulischen Trennflächen-Modells für den Kraftwerksbetrieb findet sich in Anlage 6.

6.3.3 Numerische Simulation einer Trennflächenzone am Beispiel Neuried

Aufbauend auf den vorausgegangenen Untersuchungen zur Entstehung von Trennflächen sowie zu deren hydraulischer Durchlässigkeit, wurde ein vollständig thermo-hydro-mechanisch-gekoppeltes 3D-Modell des tiefliegenden Reservoirs des Oberrheingrabens erstellt. Anhand dieses wurde ein geothermischer Kraftwerksbetrieb im Bereich der Trennfläche simuliert und die Folgen der einzelnen, allerdings gekoppelten Prozesse quantifiziert. Eine Sensitivität berücksichtigt hierbei auch die große Unsicherheit in den geologischen Eingangsparametern des Reservoirs und speziell im Bereich der Zerrüttungszone. Eine Besonderheit stellt hierbei der Aufbau der Trennfläche dar, welche die Limitierungen nach Kapitel 6.3.2 berücksichtigt und daher einen dreidimensionalen Aufbau nach Agemar et al. (2017) aufweist.

Eingangsdaten

Aufbauend auf der bereits im Projekt StörTief statisch betrachteten 3D seismischen Inversion, wurde ein finite Elemente Modell der wichtigsten Störungszonen sowie Reservoir Horizonte erstellt. Abb. 22 zeigt das erstellte Modell ohne die oberen Einheiten des Muschelkalks sowie

Tertiärs. Dargestellt ist die Formation des Buntsandsteins (rot) sowie Teile des kristallinen Grundgebirges (grün). Als farbige Flächen sind zudem die Trennflächen dargestellt, welche Versatzbeträge innerhalb des Reservoirs aufweisen. Die geologische Struktur entspricht einer Mulde, welche durch Abschiebungen (braun sowie lila) im Westen und Osten des Modells begrenzt ist, welche vertikale Versatzbeträge von mehreren Hundert Metern aufweisen. Auch eine senkrecht zum Spannungsfeld orientierte Trennfläche (dunkelblau) zeigt eine deutliche Abschiebungskomponente. Der Buntsandstein im zentralen Modellgebiet weist eine Tiefe von 3000 m auf. Das Gesamtmodell hat eine Extension von 6x5x3 km.

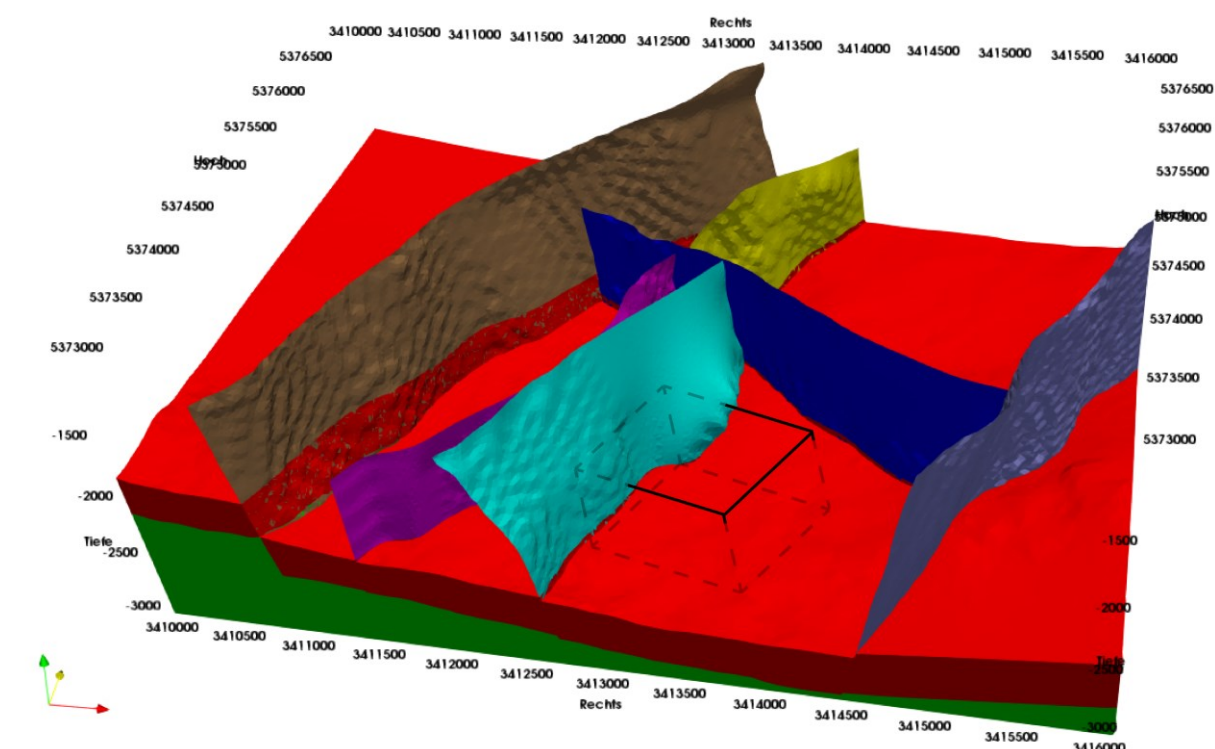


Abb. 22: Dreidimensionales Untergrundmodell einer Trennflächenzone des Oberrheingrabens am Beispiel der Kehler Mulde

Das in Abb. 22 dargestellte Modell wurde für die weiteren Untersuchungen verfeinert und auf den wesentlichen Teil verkleinert. Grund hierfür ist der Fokus auf die Prozesse, welche innerhalb einer Trennflächen stattfinden können. Diese bedingen eine vollständige Repräsentation einer Störungszone mittels dreidimensionaler, feinaufgelöster Elemente, um auch den internen Aufbau bestehend aus Zerrüttungszone sowie Kern berücksichtigen zu können (Abb. 23). Nur mittels eines dreidimensionalen Aufbaus ist es möglich, einen hydraulisch dichten Kern mit gut durchlässiger Zerrüttungszone zu simulieren, wie er im Oberrheingraben zu erwarten ist (Agemar et al. 2017). Die so entstehenden Fluidwegsamkeiten parallel des Kerns führen zu einer stark veränderten Druck- und Spannungsausbreitung.

Die Parametrisierung der in Abb. 23 gezeigten Materialien erfolgt anhand der zu erwartenden Reservoir Eigenschaften des Buntsandsteins (Egert et al. 2018; Egert et al. 2020; Lama und Vutukuri 1978; Stober und Bucher 2015). Mechanisch wird die Störungszone als insgesamt weniger stabil als die umgebende Matrix angenommen (Jeanne et al. 2014). Die hydraulischen Randbedingungen folgen dem hydrostatischen Druck und thermisch wird eine Temperatur von 140 °C (Stober und Bucher 2015) für das Reservoir angenommen. Das regionale Spannungsfeld beschreibt ein Abschiebungsregime mit einer Blattverschiebungskomponente und wurde durch Cornet et al. (2007), Evans et al. (1997) sowie Meixner et al. (2014) evaluiert und in das Modell als Hintergrundspannung in Abhängigkeit der Gesteinsdichte implementiert.

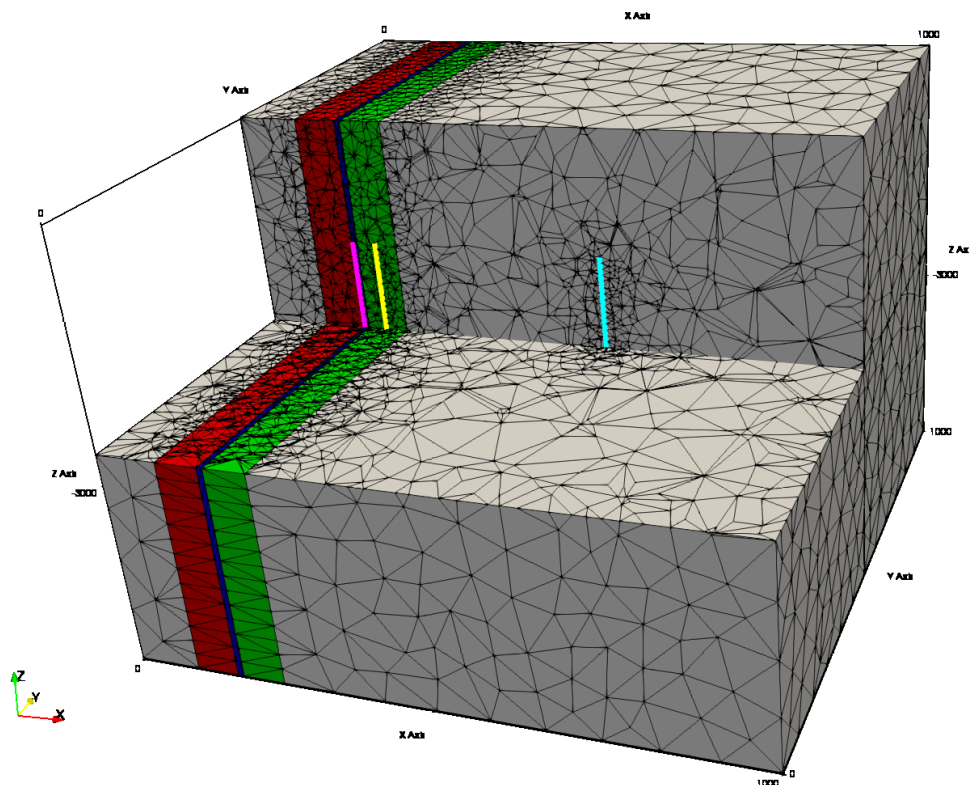


Abb. 23: Feinaufgelöstes Modell einer Störungszone des Oberrheingrabens mit den Zerrüttungszonen (rot und grün), dem Störungskern (dunkelblau) sowie möglichen Bohrlokalationen. Auf Grund der abgenommenen schlechten Permeabilität des Kerns (dunkelblau), konnte auf eine Simulation des westlichen Teils verzichtet werden.

Für das Szenario wurde eine konstante Produktionsrate von 20 l/s angenommen. Ausgehend von einem idealen Basisfall wurden die hydraulischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften der Zerrüttungszone im Rahmen zu erwartender Werte variiert und die thermoelastischen Folgen nach 5 Jahren quantifiziert. Zusätzlich erfolgte eine Quantifizierung des oftmals vernachlässigten thermischen Einflusses durch die Injektion abgekühlten Fluids.

Ergebnisse

Die detaillierten Ergebnisse sind in Anlage 7 dargestellt. Insgesamt zeigt sich, dass sowohl thermisch als auch hydraulisch induzierte Spannungen und deren Einflussbereich genauer betrachtet werden müssen. Hydraulisch induzierte Änderungen weisen oftmals eine schnelle

und großflächige Ausbreitung entlang einer Störungs- oder Zerrüttungszone auf (blaue Fläche in Abb. 24), während sich thermisch induzierte Änderungen langsam und vornehmlich radial um das Bohrloch ausbreiten (rote Fläche in Abb. 24). Der zeitliche Effekt ist gegenüber der Hydraulik deutlich verzögert, so dass auch nach 5 Jahren noch eine weitere Ausbreitung zu erwarten ist, während hydraulisch das Gleichgewicht bereits nach wenigen Tagen erreicht ist. Abb. 24 zeigt hierbei die Ausdehnung beider Veränderungen im definierten Basisfall nach 5 Jahren kontinuierlicher Injektion.

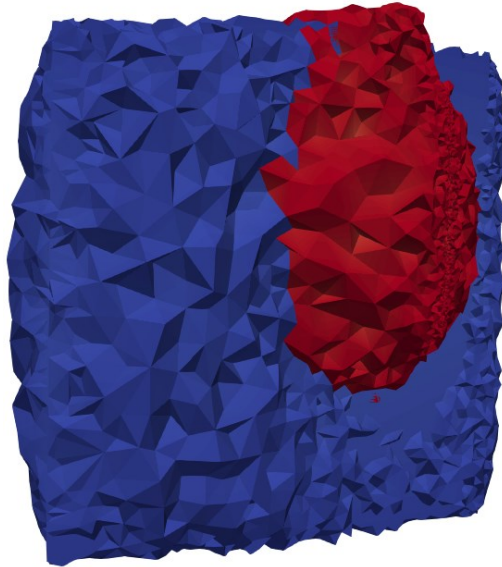


Abb. 24: Vergleich der Porendruckänderungen (blau) mit der Temperaturänderung (rot) nach 5 Jahren Kaltwasserinjektion in eine Zerrüttungszone im Basisfall

Neben den Einflussbereichen der einzelnen thermischen und hydraulischen Prozesse, kann auch deren Auswirkungen auf Spannungs- oder Porositätsänderungen, voneinander entkoppelt betrachtet werden. Hierzu wird das Modell mit und ohne verringerter Injektionstemperatur simuliert und die Ergebnisse einander gegenübergestellt. Abb. 25 zeigt die hieraus entstehenden Spannungsmagnituden exemplarisch für die kleinste Hauptnormalspannung S_{hmin} als Folge der thermischen bzw. thermo-hydraulischen Effekte im Reservoir. Hydraulisch erfolgt eine Ausbreitung der S_{hmin} -Magnituden entlang der Trennfläche, es sind für den Basisfall lediglich kleinere Änderungen von unter 5 MPa zu erwarten. Thermo-hydraulisch erfolgen die Spannungsänderungen vorzugsweise radial um die Bohrung als Folge der Abkühlung des Gesteins. Spannungsänderungen von bis zu 15 MPa treten im Nahbereich der Bohrung auf, in Entfernung zur Bohrung und im Bereich der Produktion entsprechen die Magnituden dem hydraulischen Basisfall.

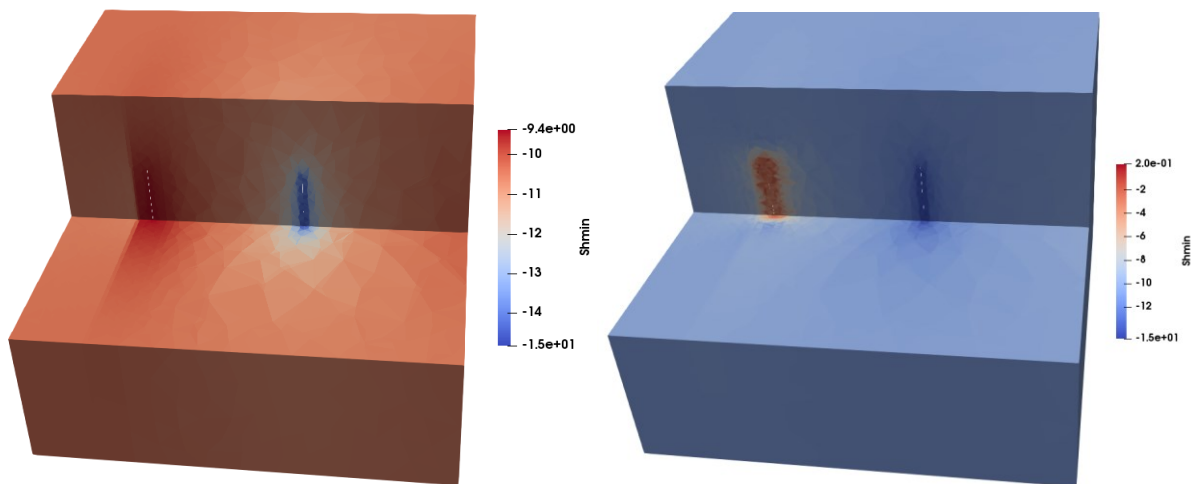


Abb. 25: Magnituden von S_{hmin} als Folge hydraulischer (links) bzw. thermo-hydraulischer Effekte (rechts)

Betrachtet man nun die Folge dieser Spannungsänderungen und der daraus resultierenden Deformation, sorgen (thermo-)poroelastische Effekte für eine Veränderung der Porosität. Mittels dieser Änderung kann nach dem Gesetz von Carman (1956) die resultierende Permeabilitätsänderung bestimmt werden, welche für reine Injektion (links) und Kaltwasserinjektion (rechts) in Abb. 26 dargestellt ist. Im dargestellten Basisfall erhöht sich die Permeabilität in der Zerrüttungszone um bis zu 0,4 %. Eine weitere Erhöhung könnte durch die Entstehung neuer Klüftigkeit hervorgerufen werden, welche hier allerdings nicht betrachtet wurde.

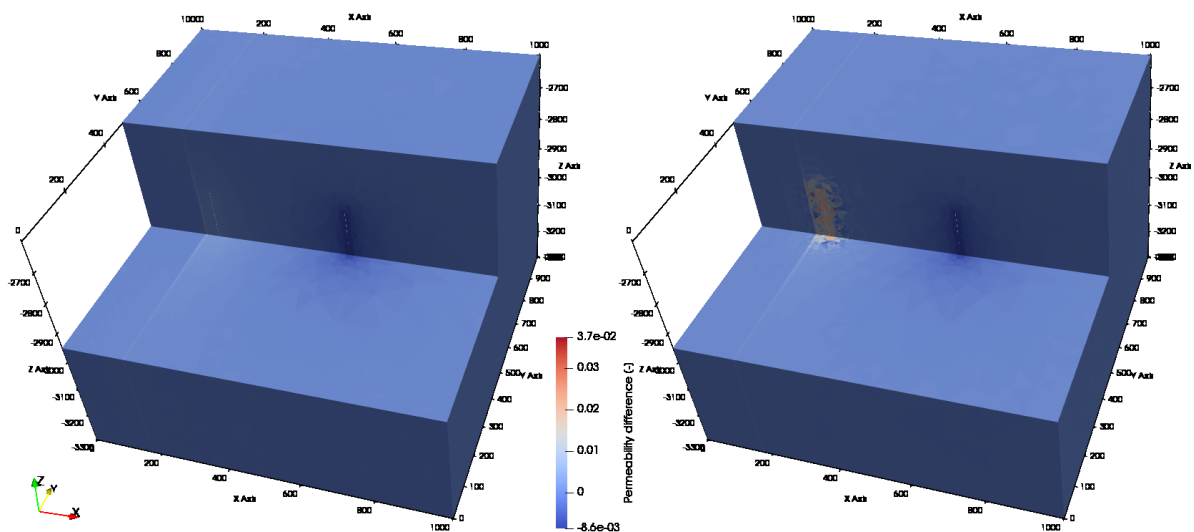


Abb. 26: Relative Permeabilitätsänderung auf Grund rein hydraulischer (links) und thermo-hydraulischer (rechts) Prozesse

Ausgehend von dem dargestellten Basisfall wurden die Materialeigenschaften innerhalb der Zerrüttungszone im Rahmen von Sensitivitätsuntersuchungen variiert, um deren sehr heterogenen und im Detail unbekanntem Aufbau berücksichtigen zu können. Ziel ist es, Randbedingungen für den wirtschaftlichen, nachhaltigen und sicheren Betrieb des geothermischen Reservoirs darzustellen und kritische Parameter zu identifizieren. Für die

Darstellung aller Ergebnisse sei auf Anlage 6 verwiesen, Abb. 27 zeigt exemplarisch die Porendruckänderung als Folge einer veränderten Porosität und Permeabilität.

Diese Scope-Simulationen zeigen, dass eine rein poroelastische Betrachtung nicht ausreicht, um die Prozesse im Reservoir und speziell entlang kritisch gespannter Trennflächen zu quantifizieren und stattdessen eine thermo-poroelastisch Betrachtung gewählt werden muss. Der Einfluss und auch die Spannweite einzelner Gesteinsparameter auf die Prozesse variiert deutlich. Die untersuchten mechanischen Parameter, Elastizitätsmodul sowie Querdehnungszahl, haben nur einen geringen Einfluss auf die Spannungs- und Porositätsänderungen im Bereich der Trennflächen.

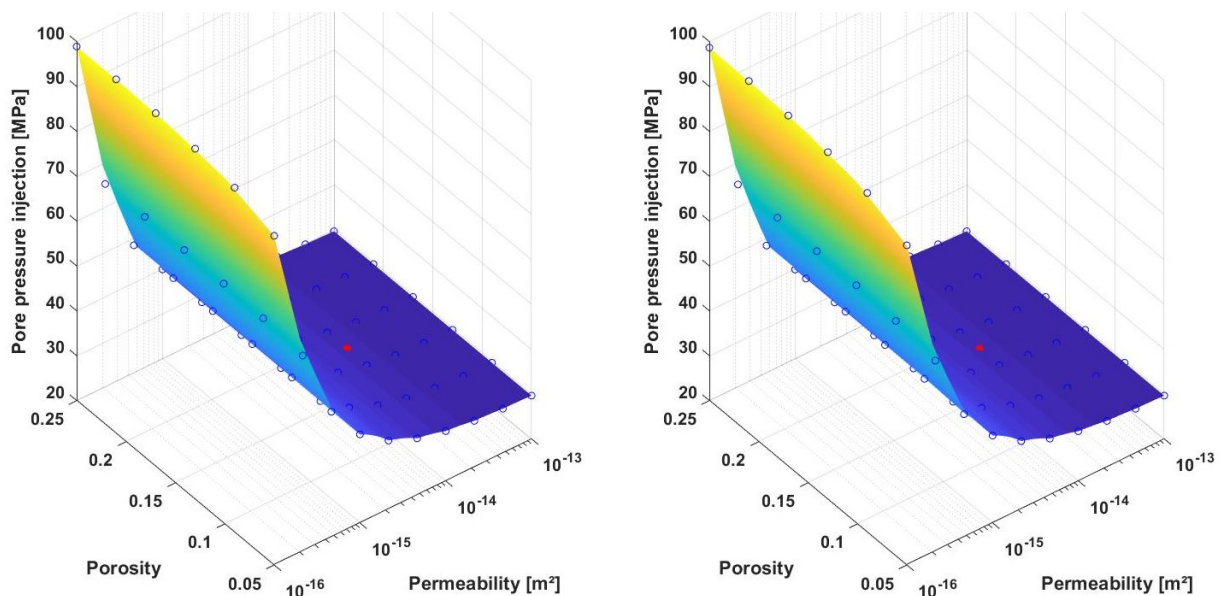


Abb. 27: Injektionsdruck als Folge einer veränderten Porosität und Permeabilität in der Zerrüttungszone der Trennfläche. Links bei konstanter Temperatur, Rechts bei Kaltwasserinjektion. Der rote Punkt stellt den Basisfall dar.

Für Spannungszustand und –orientierung ist viel mehr das Verhältnis dieser Eigenschaften zwischen Reservoir und Trennfläche von Bedeutung (Zoback 2011). Dagegen hat die angenommene Permeabilität, bedingt durch die große mögliche Spannweite in logarithmischer Darstellung, einen entscheidenden Einfluss auf Produktivität und Spannungsänderungen innerhalb der Trennfläche (vgl. Abb. 27). Für den Buntsandstein im Oberrheingraben und auch für das kristalline Grundgebirge werden tendenziell eher geringe Durchlässigkeiten angenommen (Stober und Bucher 2015) und vorhandene Trennflächen sind oftmals mit Tonen oder Alterationsprodukten verfüllt und abgedichtet (Schmidt et al. 2017), weshalb in der Untersuchung auch geringe Permeabilitäten betrachtet wurden. Die hierausfolgende poroelastische Öffnung des Gesteins führt im Injektionsbereich lediglich zu einer Verbesserung von 2 %. Die Unsicherheit der thermischen Parameter, hier die volumetrische Expansion bzw. Kontraktion bei Injektion von kühlen Fluiden, bedingt eine

Spannungsdifferenz von bis zu 3 MPa. Zu beachten ist hierbei auch, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Temperaturabnahme sehr gering ist, wodurch auch nach Jahren noch Veränderungen des Spannungszustandes entlang der Trennfläche auftreten können.

7 Verwertbarkeit

In der BMU-Leitstudie 2010 (Nitsch et al. 2010) wird die Geothermie als eine Technologie für die Nutzung erneuerbarer Energien der Zukunft angeführt. Während das Potential für die Erzeugung elektrischer Energie eher klein ist, spielt die Geothermie für die Wärmewende eine entscheidende Rolle (Agemar et al. 2018). Um den Anteil geothermischer Energie an der Energieerzeugung zu erhöhen, sind innerhalb der nächsten Jahre zahlreiche geothermische Kraftwerke zu errichten. Während derzeitige geothermische Heizkraftwerke weitestgehend hydrothermale Aquifere nutzen, stellen diese lediglich 1 % des geothermischen Strompotentials dar (Paschen et al. 2003). Trennflächen und Kluftaquifere weisen dagegen ein deutlich höheres Potential auf.

Im Rahmen des Projektes GeoFaces-SD konnte der Kenntnisstand über die Entstehung und Charakterisierung von Trennflächen wesentlich erweitert werden. Die gewonnenen Resultate und Daten können genutzt werden, um die Planung und Exploration zukünftiger Geothermieprojekte, speziell im Bereich kluftdominierter Reservoirs, einfacher durchzuführen. Im Gegensatz zur vereinfachten Annahme, zweier paralleler Platten konstanten Abstands, ist der interne Aufbau deutlich komplexer und muss bei der Evaluierung betrachtet werden. In Abhängigkeit der thermo-hydro-mechanisch-chemischen Eigenschaften und Rahmenbedingungen kann der Fluidfluss entlang der Trennflächenzone oder durch diese hindurch begünstigt oder verhindert sein. Die potentiellen Reservoirgesteine zeigen eine starke Sensitivität bezüglich der lithostatischen und hydrostatischen Auflast, welche bei der Entstehung und Vorhersage von Trennflächen zu berücksichtigen ist. Der Fluidfluss innerhalb dieser Zone ist deutlich komplexer und kann nicht einfach anhand der Orientierung der Reservoirspannungen bestimmt werden, sondern muss vielmehr auch weitere Rahmenbedingungen sowie die tektonische Historie im Detail berücksichtigen. Je nach hydrochemischer Eigenschaften und Zusammensetzung der Reservoirfluide sowie der Rahmengesteine kann eine Alteration der Kluftoberflächen erfolgen und Minerallösung und –bildung zu Veränderungen der hydraulischen Leitfähigkeit führen. Es zeigen sich deutliche Unterschiede in der Untersuchung von Sandsteinen, sowie Granit und Kalkstein.

Es ist somit von entscheidender Bedeutung, sowohl die potentiellen Reservoirgesteine und Trennflächen als auch die hydraulischen Rahmenbedingungen innerhalb des tiefreichenden Reservoirs charakterisieren zu können. Nur dann lassen sich die thermo-hydro-

mechanischen-chemischen Prozesse und Eigenschaften abschätzen und Modelle zur Fündigkeit von erhöhten Temperaturen und Fluidwegsamkeiten treffen. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden Methoden, Verfahren und Entscheidungshilfen für die Exploration von tiefreichenden Trennflächen im Hinblick auf die geothermische Nutzung entwickelt bzw. weiterentwickelt.

Die Daten, Informationen und neuen Erkenntnisse werden über das Geothermische Informationssystem (GeotIS) 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 somit dazu bei, die geothermische Nutzung von trennflächendominierten Reservoirs, speziell im Oberrheingraben, aber auch im Allgemeinen, voranzubringen. Ein Übertrag der Ergebnisse auf andere Regionen mit ähnlichen geothermischen Rahmenbedingungen ist möglich. Durch die Nutzung des zuvor entwickelten Kriterienkatalogs und die Anwendung auf geothermische Reservoirs, konnten allgemeine Gesetzmäßigkeiten und minimale Voraussetzungen für die erfolgreiche Entwicklung geothermischer Projekte getroffen werden. Die Ergebnisse stellen somit eine Grundlage für die wirtschaftliche Nutzung von trennflächendominierten Reservoirs dar und können als Entscheidungshilfe für die weitere Entwicklung geothermischer Reservoirs herangezogen werden. Die Ergebnisse erlauben somit eine erste Evaluierung des geothermischen Potentials eines Reservoirs vor dem Abteufen einer Bohrung. Diese Arbeit bietet somit auch Grundlage für eine Optimierung zukünftiger Untersuchungen von Tiefenstrukturen im Oberrheingraben und erhöhte die internationale Sichtbarkeit der Geothermieforschung in Deutschland.

8 Fortschritt Anderer

Im südlichen Oberrheingraben wurde im Rahmen einer Machbarkeitsstudie das tiefengeothermische Potential für einen Energiespeicher im Buntsandstein untersucht (Fkz.: L75 16003 – 16004). Im Rahmen des Projektes TG-Charming wurde das tiefengeothermische Potential im zentralen Oberrheingraben evaluiert und die Deformationsgeschichte des Oberrheingrabens und angrenzender Gebirge genauer bestimmt. Vergleichbare Untersuchungen erfolgten nach unserem Kenntnisstand derzeit jedoch nicht.

9 Publikationen und Vorträge

- Agemar, T., Hese, F., Moeck, I. & Stober, I. (2017): Kriterienkatalog für die Erfassung tieferreichender Störungen und ihrer geothermischen Nutzbarkeit in Deutschland. – in: Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 168 (2), S. 285–300. – doi: 10.1127/zdgg/2017/0084.
- Barth, F., Görner, T., Schmidt, R. B., Drüppel, K., Grimmer, J. C. & Stober, I. (2017): Experimental investigation of the hydrothermal alteration of granite and monzonite from the Black Forest, Germany. – Poster Präsentation. – 5th European Geothermal Workshop, Karlsruhe.
- Egert, R., Gholami Korzani, M., Held, S. & Kohl, T. (2020): Implications on large-scale flow of the fractured EGS reservoir Soultz inferred from hydraulic data and tracer experiments. – in: *Geothermics* 84.– doi: 10.1016/j.geothermics.2019.101749.
- Egert, R., Gholami Korzani, M., Held, S., Kohl, T. & Stober, I. (2018a): Hydro-thermal modeling of a deep fault-related fracture system in the Upper Rhine Graben (URG). – Poster Präsentation. – The Geological Society of America 130th Annual Meeting, Indianapolis.
- Egert, R., Gholami Korzani, M., Held, S., Stober, I. & Kohl, T. (2018b): Thermo-hydraulic modeling of a deep fault-related fracture system in the Upper Rhine Graben using MOOSE/TIGER. – Poster Präsentation. – 6th European Geothermal Workshop, Strasbourg.
- Egert, R., Seithel, R., Kohl, T. & Stober, I. (2018c): Triaxial testing and hydraulic–mechanical modeling of sandstone reservoir rock in the Upper Rhine Graben. – in: *Geothermal Energy* 6 (1), S. 49. – doi: 10.1186/s40517-018-0109-0.
- Egert, R., Seithel, R., Peters, M. & Stober, I. (2017a): Numerical simulation and evaluation of triaxial tests of reservoir rocks of the Upper Rhine Graben. – Poster Präsentation. – 5th European Geothermal Workshop, Karlsruhe.
- Egert, R., Seithel, R., Peters, M. & Stober, I. (2017b): Numerische Simulation von Triaxialversuchen an Reservoirgesteinen des Oberrheingrabens. – Poster Präsentation. – Der Geothermiekongress, München.
- Fleuchaus, P., Godschalk, B., Stober, I. & Blum, P. (2018): Weltweite Entwicklung von Aquiferspeichern – Risiken und Chancen. – in: *Grundwasser im Umfeld von Bergbau, Energie und urbanen Räumen*. – 26. Fachtagung der FH-DGGV, Bochum, 21.-24. März 2018. – hrsg. von A. Banning, S. Frank, R. Kaufmann-Knoke, A. Niedermayr, F. Wisotzky & S. Wohnlich.

-
- Schmidt, R. B., Bucher, K., Drüppel, K. & Stober, I. (2017a): Experimental interaction of hydrothermal Na-Cl solution with fracture surfaces of geothermal reservoir sandstone of the Upper Rhine Graben. – in: *Applied Geochemistry* 81, S. 36–52. – doi: 10.1016/j.apgeochem.2017.03.010.
- Schmidt, R. B., Bucher, K. & Stober, I. (2017b): Alteration products of reservoir rocks from the Upper Rhine Graben under geothermal conditions. – Poster Präsentation. – GeoTHERM Messe & Kongress Offenburg.
- Schmidt, R. B., Bucher, K. & Stober, I. (2018a): Experiments on granite alteration under geothermal reservoir conditions and the initiation of fracture evolution. – in: *European Journal of Mineralogy* 30 (5), S. 899–916. – doi: 10.1127/ejm/2018/0030-2771.
- Schmidt, R. B., Göttlicher, J. & Stober, I. (2019): Experiments on sandstone alteration under geothermal reservoir conditions and the formation of zeolites. – in: *European Journal of Mineralogy* 31(5), S. 929-944. – doi: 10.1127/ejm/2019/0031-2870.
- Schmidt, R. B., Göttlicher, J. & Stober, I. (2018b): Formation of zeolites in sandstone-brine interaction experiments under geothermal conditions. – Oral presentation. – Goldschmidt Boston.
- Schmidt, R. B., Göttlicher, J. & Stober, I. (2018c): Sandstone-brine interaction and the formation of zeolites in experiments under geothermal conditions. – Oral presentation. – GeoBonn.
- Schmidt, R. B. & Stober, I. (2017): Experiments on sandstone-brine interaction with various solutions under geothermal conditions. – Poster Präsentation. – Goldschmidt Conference 2017, Paris.
- Schmidt, R. B. & Stober, I. (2018): Sandstone-brine interaction with various solutions under Upper Rhine Graben conditions. – Poster Präsentation. – GeoTHERM Messe & Kongress Offenburg.
- Stober, I. (2017): Störungszonen und heiße Quellen. – Vortrag. – GeoTHERM Messe & Kongress Offenburg.
- Stober, I., Bracke, R. & Fischer, S. (2018): Tiefengeothermie und Tiefengrundwasser. – Session-Leitung. – 26. Tagung der FH-DGGV, Bochum, 21.-24. März 2018.
- Stober, I., Zhong, J., Zhang, L. & Bucher, K. (2017): Fault zones and hot springs. – Vortrag. – Goldschmidt Conference 2017, Paris.

10 Im Endbericht zitierte Literatur

- Adams, Michael C.; Davis, Jon: Kinetics of fluorescein decay and its application as a geothermal tracer, *Geothermics* 20 (1-2), (1991), 53–66. DOI: 10.1016/0375-6505(91)90005-G.
- Agemar, Thorsten; Brunken, Jörn; Jodocy, Marco; Schellschmidt, Rüdiger; Schulz, Rüdiger; Stober, Ingrid: Untergrundtemperaturen in Baden-Württemberg, *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 164 (1), (2013), 49–62. DOI: 10.1127/1860-1804/2013/0010.
- Agemar, Thorsten; Hese, Fabian; Moeck, Inga; Stober, Ingrid: Kriterienkatalog für die Erfassung tiefreichender Störungen und ihrer geothermischen Nutzbarkeit in Deutschland, *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, (2017). DOI: 10.1127/zdgg/2017/0084.
- Agemar, Thorsten; Schellschmidt, Rüdiger; Schulz, Rüdiger: Subsurface temperature distribution in Germany, *Geothermics* 44, (2012), 65–77. DOI: 10.1016/j.geothermics.2012.07.002.
- Agemar, Thorsten; Suchi, Evelyn; Moeck, Inga: Die Rolle der tiefen Geothermie bei der Wärmewende, (2018).
- Aquilina, L.; Pauwels, H.; Genter, A.; Fouillac, C.: Water-rock interaction processes in the Triassic sandstone and the granitic basement of the Rhine Graben: Geochemical investigation of a geothermal reservoir, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61 (20), (1997), 4281–4295. DOI: 10.1016/S0016-7037(97)00243-3.
- Bartier, Danièle Ledésert; Meunier, Alain; Liewig, Nicole; Morvan, Gilles; Addad, Ahmed: Hydrothermal alteration of the Soultz-sous-Forets granite (Hot Fractured Rock geothermal exchanger) into a tosudite and illite assemblage, *ejm* 20 (1), (2008), 131–142. DOI: 10.1127/0935-1221/2008/0020-1787.
- Baud, Patrick; Klein, Emmanuelle; Wong, Teng-fong: Compaction localization in porous sandstones: spatial evolution of damage and acoustic emission activity, *Journal of Structural Geology* 26 (4), (2004), 603–624. DOI: 10.1016/j.jsg.2003.09.002.
- Bertleff, B.: Das Strömungssystem der Grundwässer im Malm-Karst des West-Teils des süddeutschen Molassebeckens., *Abhandlungen des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg* 12, (1986).

-
- Bertleff, B.; Joachim, H.; Kozirowski, G.; Leiber, J.; Ohmert, W.; Prestel, R. et al.:
Ergebnisse der Hydrogeothermiebohrungen in Baden- Wuerttemberg., *Jahreshefte des
Geologischen Landesamtes in BadenWuerttemberg* 30, (1988), 27–116.
- Bertleff, B.; Ondreka, J.; Plum, H.; Storz, R.; Schloz, W.: Bereitstellung hydrogeologischer
und geothermischer Grundlagen zur Nutzung der tiefen Geothermie/Hydrogeothermie in
der Region Bodensee-Oberschwaben., (2005).
- Bésuelle, P.: Evolution of strain localisation with stress in a sandstone. Brittle and semi-brittle
regimes, *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy* 26 (1-2),
(2001), 101–106. DOI: 10.1016/S1464-1895(01)00032-1.
- Bethke, C. M.; Yeakel, S.: *GWB essentials guide: Aqueous Solutions*, (2015).
- Brockert, M.; Koch, E.; Kuckelkorn, K.; Müller, M.; Paulus, B.; Schwarzenhölzer, W.: Bei der
Erforschung der Kohlenwasserstoff-Potentiale Süddeutschlands gewonnene
Erkenntnisse über den tieferen Untergrund. Hannover, (2007).
- Byrappa, Kullaiah; Yoshimura, Masahiro: *Handbook of hydrothermal technology*. 2. ed.
Amsterdam: Elsevier/Andrews, (2013).
- Carman, P.: *Flow of gases through porous media*. London: Butterworths Scientific
Publications, (1956).
- Chipera, S. J.; Apps, J. A.: Geochemical Stability of Natural Zeolites, *Reviews in Mineralogy
and Geochemistry* 45 (1), (2001), 117–161. DOI: 10.2138/rmg.2001.45.3.
- Coombs, D.: Sedimentary analcime rocks and sodium-rich gneisses, *Mineral. mag. j.
Mineral. Soc.* 34 (268), (1965), 144–158. DOI: 10.1180/minmag.1965.034.268.12.
- Coombs, D.; Whetten, T.: Composition of Analcime from Sedimentary and Burial
Metamorphic Rocks¹, *Geol Soc America Bull* 78 (2), (1967), 269. DOI: 10.1130/0016-
7606(1967)78[269:COAFSA]2.0.CO;2.
- Cornet, F. H.; Bérard, Th.; Bourouis, S.: How close to failure is a granite rock mass at a 5km
depth?, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 44 (1), (2007),
47–66. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.04.008.
- Dezayes, Chrystel; Thinon, I.; Genter, Albert; Courrioux, G.: Clastic reservoirs in the Rhine
graben: geothermal potential of the Triassic sandstones based on seismic profiles and
deep boreholes. Proceedings European Geothermal Congress. Unterhaching, (2007).
- Drucker, D. C.; Prager, W.: Soil mechanics and plastic analysis or limit design, *Quart. Appl.
Math.* 10 (2), (1952), 157–165. DOI: 10.1090/qam/48291.

-
- Egert, Robert; Gholami Korzani, Maziar; Held, Sebastian; Kohl, Thomas: Implications on large-scale flow of the fractured EGS reservoir Soultz inferred from hydraulic data and tracer experiments, *Geothermics* 84, (2020), 101749. DOI: 10.1016/j.geothermics.2019.101749.
- Egert, Robert; Seithel, Robin; Kohl, Thomas; Stober, Ingrid: Triaxial testing and hydraulic–mechanical modeling of sandstone reservoir rock in the Upper Rhine Graben, *Geotherm Energy* 6 (1), (2018), 49. DOI: 10.1186/s40517-018-0109-0.
- English, P. M.: Formation of analcime and moganite at Lake Lewis, central Australia: significance of groundwater evolution in diagenesis, *Sedimentary Geology* 143 (3-4), (2001), 219–244. DOI: 10.1016/S0037-0738(01)00063-X.
- Europäische Gemeinschaft & Schweizer Eidgenossenschaft: Grenzüberschreitende Bewirtschaftung des Grundwassers im Raum Hegau - Schaffhausen: INTERREG IIIA - Alpenrhein Bodensee Hochrhein, Abschlussbericht, (2007).
- Evans, James P.; Forster, Craig B.; Goddard, James V.: Permeability of fault-related rocks, and implications for hydraulic structure of fault zones, *Journal of Structural Geology* 19 (11), (1997), 1393–1404. DOI: 10.1016/S0191-8141(97)00057-6.
- Förster, Andrea; Norden, Ben; Zinck-Jørgensen, Kim; Frykman, Peter; Kulenkampff, Johannes; Spangenberg, Erik et al.: Baseline characterization of the CO2SINK geological storage site at Ketzin, Germany, *Environ. Geosci.* 13 (3), (2006), 145–161. DOI: 10.1306/eg.02080605016.
- Genske, Dieter D.: Ingenieurgeologie. Grundlagen und Anwendung. 2., neu bearb. und aktualisierte Aufl. 2014. Berlin: Springer Spektrum, (2014).
- Genter, Albert; Cuenot, Nicolas; Goerke, X.; Moeckes, W.; Scheiber, J., (2011): Scientific and technical activity of the Soultz geothermal power plant, Progress report from December 2010 to June 2011. GEIE report RA05 002.
- Geologisches Landesamt Baden-Württemberg & Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft: Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt des Malmkarstes im süddeutschen Molassebecken: Abschlussbericht des Verbundprojektes des BMBF., (1989).
- Hackston, Abigail; Rutter, Ernest: The Mohr–Coulomb criterion for intact rock strength and friction – a re-evaluation and consideration of failure under polyaxial stresses, *Solid Earth* 7 (2), (2016), 493–508. DOI: 10.5194/se-7-493-2016.

-
- Haenel, R.; Staroste, E.: Atlas of geothermal resources in the European Community, Hannover, (1988).
- Held, Sebastian; Genter, Albert; Kohl, Thomas; Kölbl, Thomas; Sausse, Judith; Schoenball, Martin: Economic evaluation of geothermal reservoir performance through modeling the complexity of the operating EGS in Soultz-sous-Forêts, *Geothermics* 51, (2014), 270–280. DOI: 10.1016/j.geothermics.2014.01.016.
- Hergert, T.; Heidbach, O.; Reiter, K.; Giger, S. B.; Marschall, P.: Stress field sensitivity analysis in a sedimentary sequence of the Alpine foreland, northern Switzerland, *Solid Earth* 6 (2), (2015), 533–552. DOI: 10.5194/se-6-533-2015.
- Higgs, K. E.; Haese, R. R.; Golding, S. D.; Schacht, U.; Watson, M. N.: The Pretty Hill Formation as a natural analogue for CO₂ storage: An investigation of mineralogical and isotopic changes associated with sandstones exposed to low, intermediate and high CO₂ concentrations over geological time, *Chemical Geology* 399, (2015), 36–64. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2014.10.019.
- Hölting, Bernward; Coldewey, Wilhelm Georg: Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 8. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, (2013). Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1206341>.
- Isherwood, D.; Street, A.: Biotite-induced grossification of the Boulder Creek Granodiorite, Boulder County, Colorado, *Geol Soc America Bull* 87 (3), (1976), 366. DOI: 10.1130/0016-7606(1976)87<366:BGOTBC>2.0.CO;2.
- Jaeger, John C.; Cook, Neville G. W.; Zimmerman, Robert W.: Fundamentals of rock mechanics. 4. ed. Malden Mass. u.a.: Blackwell Publ, (2007).
- Jeanne, Pierre; Guglielmi, Yves; Cappa, Frédéric; Rinaldi, Antonio P.; Rutqvist, Jonny: The effects of lateral property variations on fault-zone reactivation by fluid pressurization: Application to CO₂ pressurization effects within major and undetected fault zones, *Journal of Structural Geology* 62, (2014), 97–108. DOI: 10.1016/j.jsg.2014.01.017.
- Jodocy, M.; Stober, I.: Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland - Landesteil Baden-Württemberg., *Erdöl Erdgas Kohle* 124 (10), (2008), 386–393.
- Jodocy, M.; Stober, I.: Porositäten und Permeabilitäten im Oberrheingraben und Südwestdeutschen Molassebecken, *Erdöl Erdgas Kohle* 127 (1), (2011).

-
- Jodocy, M.; Stober, I.: Entwicklung eines Prognosetools zur Unterstützung standortbezogener Aussagen zur Fündigkeit hydrogeothermischer Projekte in Baden-Württemberg (GeoTool). Endbericht, (2013).
- Jung, R.; Röhling, S.; Ochsmann, N.; Rogge, S.; Schellschmidt, R.; Schulz, R.; Thielemann, T.: 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, (2002).
- Khan, Akhtar S.; Xiang, Ying; Huang, Sujian: Behavior of Berea sandstone under confining pressure part I. Yield and failure surfaces, and nonlinear elastic response, *International Journal of Plasticity* 7 (6), (1991), 607–624. DOI: 10.1016/0749-6419(91)90046-2.
- Kohl, Thomas; Baujard, C.; Mégel, T.: Conditions for mechanical re-stimulation of GPK4. Paper presented at EHDRA Scientific Conference, 15-16 June 2006, (2006).
- Kühne, K.; Gorling, L., (2009): Neues im und um das Fachinformationssystem Geophysik. In: R. V.D. Boogaart und H. Schaeben (Hg.): GIS - Geowissenschaftliche Anwendungen und Entwicklungen, 8. GIS-Kolloquium 18.06.2009, Wiss. Mitteilungen des Instituts für Geologie, Bd. 40. Freiberg, 19–26.
- Lama, R. D.; Vutukuri, V. S.: Handbook on mechanical properties of rocks. Testing techniques and results. 1. print. Clausthal: Trans Tech Publications, (1978) (Vol. 3, No. 1).
- Ledésert, B.; Berger, G.; Meunier, A.; Genter, A.; Bouchet, A.: Diagenetic-type reactions related to hydrothermal alteration in the Soultz-sous-Forets Granite, France, *European Journal of Mineralogy* 11 (4), (1999).
- Ledésert, Béatrice; Hebert, Ronan; Genter, Albert; Bartier, Danièle; Clauer, Norbert; Grall, Céline: Fractures, hydrothermal alterations and permeability in the Soultz Enhanced Geothermal System, *Comptes Rendus Geoscience* 342 (7-8), (2010), 607–615. DOI: 10.1016/j.crte.2009.09.011.
- Meixner, Jörg; Schill, Eva; Gaucher, Emmanuel; Kohl, Thomas: Inferring the in situ stress regime in deep sediments. An example from the Bruchsal geothermal site, *Geotherm Energy* 2 (1), (2014), 233. DOI: 10.1186/s40517-014-0007-z.
- Meixner, Jörg; Schill, Eva; Grimmer, Jens C.; Gaucher, Emmanuel; Kohl, Thomas; Klingler, Philip: Structural control of geothermal reservoirs in extensional tectonic settings. An example from the Upper Rhine Graben, *Journal of Structural Geology* 82, (2016), 1–15. DOI: 10.1016/j.jsg.2015.11.003.

-
- Müller, C.; Reinhold, K.: Geologische Charakterisierung tiefliegender Speicher- und Barrierehorizonte in Deutschland - Speicher-Kataster Deutschland, *Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 74, (2011).
- Nitsch, J.; Pregger, T.; Scholz, Y.; Naegler, T.; Sterner, M.; Gerhardt, N. et al.: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global: Leitstudie 2010., (2010).
- Paschen, H.; Oertel, D.; Grünwald, R.: Möglichkeiten der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland., (2003).
- Pielow, H.-U.: Korrodierte Mineralgrenzflächen als Indikatoren für die Migration salinärer FLuide im Kristallin am Beispiel des KTB, *Göttinger Arbeiten zur Geologie und Paläontologie* (71).
- Prestel, R.: Untersuchungen zur Diagenese von Malm-Karbonatgestein und Entwicklung des Malm-Grundwassers im süddeutschen Molassebecken. – Dissertation.: Universität Stuttgart, (1990).
- Ross, C. S.: Sedimentary analcite., *American Mineralogist* (13), (1928), 195–197.
- Ross, C. S.: Sedimentary analcite, *American Mineralogist* (26), (1941), 627–629.
- Rossi, Ann M.; Graham, Robert C.: Weathering and Porosity Formation in Subsoil Granitic Clasts, Bishop Creek Moraines, California, *Soil Science Society of America Journal* 74 (1), (2010), 172. DOI: 10.2136/sssaj2009.0146.
- Sanjuan, B.; Millot, R.; Innocent, Ch.; Dezayes, Ch.; Scheiber, J.; Brach, M.: Major geochemical characteristics of geothermal brines from the Upper Rhine Graben granitic basement with constraints on temperature and circulation, *Chemical Geology* 428, (2016), 27–47. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2016.02.021.
- Sanjuan, Bernard; Pinault, Jean-Louis; Rose, Peter; Gérard, André; Brach, Michel; Braibant, Gilles et al.: Tracer testing of the geothermal heat exchanger at Soultz-sous-Forêts (France) between 2000 and 2005, *Geothermics* 35 (5-6), (2006), 622–653. DOI: 10.1016/j.geothermics.2006.09.007.
- Sausse, Judith; Dezayes, Chrystel; Dorbath, Louis; Genter, Albert; Place, Joachim: 3D model of fracture zones at Soultz-sous-Forêts based on geological data, image logs, induced microseismicity and vertical seismic profiles, *Comptes Rendus Geoscience* 342 (7-8), (2010), 531–545. DOI: 10.1016/j.crte.2010.01.011.

-
- Schellschmidt, R.; Stober, I.: *Untergrundtemperaturen in Baden-Württemberg. LGRB-Fachbericht 2: Regierungspräsidium Freiburg*, (2008).
- Schiffman, Peter; Bird, Dennis K.; Elders, Wilfred A.: Hydrothermal mineralogy of calcareous sandstones from the Colorado River delta in the Cerro Prieto geothermal system, Baja California, Mexico, *Mineral. mag.* 49 (352), (1985), 435–449. DOI: 10.1180/minmag.1985.049.352.14.
- Schindler, M., (2009): Hydraulic Data recorded during the three circulations with down-hole pumps at soultz, Rapport Public GEIE n° RAP 71 000 V00. GEIE, Soultz-sous-Forêts, France,
- Schmidt, Roman; Seithel, Robin; Stober, Ingrid: Verbundvorhaben „StörTief“ - Die Rolle von tiefreichenden Störungszonen bei der geothermischen Energienutzung - Teilprojekt C Südwestdeutschland, (2016).
- Schmidt, Roman B.; Bucher, Kurt; Drüppel, Kirsten; Stober, Ingrid: Experimental interaction of hydrothermal Na-Cl solution with fracture surfaces of geothermal reservoir sandstone of the Upper Rhine Graben, *Applied Geochemistry* 81, (2017), 36–52. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2017.03.010.
- Schulz, R.: *Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland - Endbericht.* Hannover, (2009).
- Schulz, R.; Agemar, Thorsten; Alten, J.-A.; Kühne, K.; Maul, A.-A.; Pester, S.; Wirth, W.: *Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland.*, *Erdöl Erdgas Kohle* 123 (2), (2007), 76–81.
- Stober, I.; Bucher, K.: Hydraulic and hydrochemical properties of deep sedimentary reservoirs of the Upper Rhine Graben, Europe, *Geofluids* 15 (3), (2015), 464–482. DOI: 10.1111/gfl.12122.
- Stober, I.; Villinger, E.: *Hydraulisches Potential und Durchlässigkeit des höheren Oberjuras und des Oberen Muschelkalks unter dem Baden-Württembergischen Molassebecken.*, *Jahreshefte des Geologischen Landesamtes in Baden-Wuerttemberg* 37, (1997), 7–24.
- Stober, Ingrid: Hydrochemical properties of deep carbonate aquifers in the SW German Molasse basin, *Geotherm Energy* 2 (1), (2014), 108. DOI: 10.1186/s40517-014-0013-1.
- Villinger, E.: *Bemerkungen zur Verkarstung des Malms unter dem westlichen süddeutschen Molassebecken.*, *Bulletin der Vereinigung Schweiz. Petroleum-Geologen und -Ingenieure* 54 (127), (1988), 41–59.

Wahrhaftig, C.: Stepped Topography of the Southern Sierra Nevada, California, *Geol Soc America Bull* 76 (10), (1965), 1165. DOI: 10.1130/0016-7606(1965)76[1165:STOTSS]2.0.CO;2.

Weisenberger, T.; Bucher, K.: Zeolites in fissures of granites and gneisses of the Central Alps, *Journal of Metamorphic Geology* 28 (8), (2010), 825–847. DOI: 10.1111/j.1525-1314.2010.00895.x.

Wu, G.; Wang, Y.; Swift, G.; Chen, J.: Laboratory Investigation of the Effects of Temperature on the Mechanical Properties of Sandstone, *Geotech Geol Eng* 31 (2), (2013), 809–816. DOI: 10.1007/s10706-013-9614-x.

Zitzmann, A.: Tektonische Karte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 1 000 000. Hannover, (1981).

Zoback, Mark D.: Reservoir geomechanics. 5. print. Cambridge: Cambridge Univ. Press, (2011).

Dank

Wir danken den Partnern des Verbundprojektes, LIAG und LUNG, für die vertrauensvolle und konstruktive Zusammenarbeit über den gesamten Projektzeitraum. Für die Unterstützung bei den Triaxialversuchen gebührt unser Dank Prof. Dr. Kenkmann (Universität Freiburg). 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). Herrn Dr. A. Genter von ÉS-Géothermie danken wir für die Bereitstellung von Bohrkernen der Bohrung Soultz GPK1, von Untersuchungsberichten sowie den diversen Experimentaldaten. Dem LGRB in Freiburg gebührt unser Dank für die Einsichtnahme in das Kernarchiv von Baden-Württemberg. Wir danken dem Bergwerk Teufelsgrund im Schwarzwald für die Unterstützung. Ein besonderer Dank gilt dem Projektträger Jülich (PTJ) sowie dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die Unterstützung und Förderung des Projektes GeoFaces.

Anlagen

- 1 Beschreibung von Trennflächen
- 2 Natürliche Trennflächen
- 3 Geochemische Experimente – Versuchsbeschreibung
- 4 Geochemische Experimente – Ergebnisse
- 5 THM-Modellierungen – Trennflächenentstehung
- 6 THM-Modellierungen – Spezialauswertung hydraulischer Tests
- 7 THM-Modellierungen – Trennflächenzone im Reservoir Neuried