

Verbundvorhaben
„StörTief“ Teilprojekt A

Die Rolle von tief-
reichenden Störungs-
zonen bei der
geothermischen
Energienutzung

– Endbericht –

GeotIS // StörTief

Berichtszeitraum
01.04.2013 – 31.05.2016

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik

Hannover

Verbundvorhaben „StörTief“

Die Rolle von tieferreichenden Störungzonen bei der geothermischen Energienutzung Teilprojekt A

– Endbericht –

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektleiter:	Lothar Gorling
Zuwendungsgeber:	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) Projektträger Jülich (PtJ-EEN)
Förderkennzeichen:	0325623A
Laufzeit des Vorhabens:	01.04.2013 – 31.05.2016
Berichtsdatum:	14.11.2016
Archivnummer:	zu 0134085 ohne vertraulichen Teil

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

Autoren**Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG):**

AGEMAR, T. (Kap. 3.4, 4.1.2, 6.1)

ALTEN, J.-A. (Kap. 6.2)

GORLING, L. (Herausgeber)

GRAMENZ, J. (Kap. 6.2)

KUDER, J. (Kap. 2, 3.3, 5)

SUCHI, E. (Kap. 3.1, 3.2, 4.1.1)

MOECK, I. (Kap. 3.4)

WEBER, J. (Kap. 6.3, 7)

V. HARTMANN, H. (Kap. 4.2)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT):

STOBER, I. (Kap. 3.4)

Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR):

HESE, F. (Kap. 3.4)

THOMSEN, C. (Kap. 3.4)

1 Inhalt

Zusammenfassung.....	5
2 Projektbeschreibung.....	7
2.1 Literatur.....	9
3 Charakterisierung von Störungssystemen.....	10
3.1 Attributierung von tiefreichenden Störungssystemen.....	10
3.2 Vorhandene geothermische Nutzung von Störungssystemen.....	13
3.2.1 Betrachtung von Bohrkernen mit Störungsmerkmalen.....	13
3.2.2 Geothermische Projekte, die Störungssysteme nutzen.....	17
3.2.3 Thermalwasseraustritte an Störungszonen.....	19
3.3 Geophysikalische Eigenschaften von Störungszonen.....	20
3.4 Kriterienkatalog für die Erfassung tiefreichender Störungen und ihrer geothermischen Nutzbarkeit in Deutschland.....	21
3.4.1 Einleitung.....	21
3.4.2 Definition und Klassifikation von Störungen.....	22
3.4.3 Aufbau von Störungen.....	22
3.4.4 Hydraulische Eigenschaften von Störungen.....	23
3.4.5 Nutzungspotential und Kriterien.....	26
3.4.6 Orientierung der Störung zum Spannungsfeld.....	27
3.4.7 Seismische Aktivität.....	29
3.4.8 Störungsgeometrie.....	30
3.4.9 Einfluss von Fluid- und Gesteinseigenschaften auf die Durchlässigkeit von Störungen.....	32
3.4.10 Thermische Anomalien.....	33
3.4.11 Chemische Anomalien.....	34
3.4.12 Vorgehen.....	35
3.5 Literatur.....	36
4 Erfassen von Störungssystemen.....	39
4.1 Weiterentwicklung der geothermischen 3D-Strukturmodelle des Norddeutschen Beckens unter besonderer Berücksichtigung von Störungen.....	39
4.1.1 3D-Modellierung tiefreichender Störzonen.....	39
4.1.2 Neue Fazieskarten.....	47
4.2 Stereoskopische 3D-Visualisierung seismischer Daten zur Detektion von tiefreichenden Störungen.....	47
4.2.1 Virtuelle Welten.....	47
4.2.2 SeisViz3D – Projektlauf.....	48
4.2.3 SeisViz3D – Technik.....	49
4.2.4 SeisViz3D – Handhabung.....	49
4.2.5 Daten.....	51

4.2.6	SeisViz3D – Arbeitsabläufe.....	51
4.2.7	Beispiele	54
4.2.8	Zusammenfassung / Ausblick	60
4.3	Literatur	61
5	Bewertung von Störungszonen	62
5.1	Neuberechnung des geothermischen Potenzials	62
5.1.1	Arithmetisches Modell.....	62
5.1.2	Numerisches Modell	65
	Literatur:.....	69
6	Erweiterung der Datengrundlage und der Dateninfrastruktur	70
6.1	Entwicklung neuer Visualisierungs-Algorithmen für geologische Profilschnitte in GeotIS.....	70
6.2	Erweiterung und Anpassung des GeotIS.....	73
6.2.1	Allgemeines	73
6.2.2	Webanwendung, Datenbankstruktur und Software-Werkzeuge: Erweiterungen und Anpassungen	75
6.2.3	Internet-Webanwendung, Infrastruktur.....	79
6.3	Aktualisierung der Betriebsdaten geothermischer Anlagen.....	80
6.4	Literatur	80
7	Informationszentrum für geothermische Energienutzung.....	81
7.1	Nationale und internationale Zusammenarbeit	81
7.2	Neuaufgabe der Broschüre „Tiefe Geothermie“	82
8	Publikationen und Vorträge	82
8.1	Publikationen.....	82
8.1.1	Zeitschriften	82
8.1.2	Broschüren.....	83
8.1.3	Bücher	84
8.2	Vorträge und Poster	84
8.2.1	Vortragsveröffentlichungen (Proceedings).....	84
8.2.2	Poster	85
8.2.3	Vorträge.....	85
8.3	Berichte	87
8.4	Öffentlichkeitsarbeit.....	88
8.4.1	Veranstaltungen.....	88
8.4.2	Pressemitteilungen und Internet	89
9	Anhang.....	89
9.1	Ergebnisse für die geothermische Potenzialabschätzung der Störungszonen in Deutschland	89

Zusammenfassung

Für den Aufbau einer geothermischen Stromnutzung in Deutschland schlug das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) 2003 u. a. die Erstellung eines Atlases der geothermischen Ressourcen vor. Daraufhin förderte das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) bis 2009 das Projekt „Aufbau eines Geothermischen Informationssystems für Deutschland“ (GeotIS), das sich auf die tiefen Grundwasserleiter (Heißwasseraquifere) im östlichen Teil des Norddeutschen Beckens, im Oberrheingraben und in Süddeutschland konzentrierte. In diesen Gebieten ist die energetische Nutzung der tiefen Grundwasserleiter kurzfristig am besten zu realisieren.

Im Rahmen des Folgeprojektes „Internet basiertes Informationszentrum für geothermische Energienutzung“, gefördert durch das BMU bis 2013, wurde das Geothermische Informationssystem weiter ausgebaut; Datenbestände für hydrothermale Ressourcen in Deutschland wurden teilweise neu erfasst, erweitert und mit neuen Datenbanken vernetzt. Die 3D-Strukturmodelle wurden u. a. in Norddeutschland, in dem Süddeutschen Molassebecken und dem südlichem Oberrheingraben erweitert und ergänzt. Für den nördlichen Oberrheingraben konnte ein 3D-Modell für die geothermischen Potenziale für Hessen übernommen werden.

Auf diese Vorarbeiten setzt das durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderte Verbundvorhaben „Die Rolle von tiefreichenden Störungszonen bei der geothermischen Energienutzung“ auf, um die bisher zusammengetragenen Informationen mit Daten über Störungszonen bzgl. der geothermischen Nutzung zu ergänzen. Störungszonen werden bisher in Deutschland nicht direkt für die Energiegewinnung genutzt. Allerdings wird bei der Erschließung von Heißwasseraquiferen, z. B. im Oberrheingraben und im Malm des Süddeutschen Molassebeckens, darauf geachtet, Störungszonen zu durchörtern, um höhere Fließraten zu erzielen. Als typisches Beispiel sei die Bohrung „Unterhaching Gt 2“ genannt.

Aus diesem Grund wurden die tiefen Störungszonen in Deutschland zur Charakterisierung mit Attributen und einer Literaturzitatensammlung versehen, die im GeotIS visuell durch einfaches Auswählen abfragbar sind. Es wird ein Überblick über die Geothermischen Projekte gegeben, welche Störungssysteme nutzten, sowie über Thermalwasseraustritte an Störungszonen und Bohrkernen mit Störungsmerkmalen. Zur Vereinheitlichung der Beschreibung der tiefreichenden Störungen und ihrer geothermischen Nutzbarkeit wurde ein Kriterienkatalog in Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und dem Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR) aufgestellt.

Zur räumlichen visuellen Erfassung von Störungssystemen ist ein geothermisches 3D-Strukturmodell des Norddeutschen Beckens unter besonderer Berücksichtigung von Störungen im Raum Oldenburg-Süd/ Ridderade erstellt worden. Des Weiteren ist ein Visualisierungssystem zur stereoskopischen 3D-Visualisierung seismischer Daten zur

Detektion von tieferreichenden Störungen (SeisViz3D) entwickelt worden. Dieses System unterstützt das Verständnis und das Erkennen von geologischen Strukturen durch die Erzeugung eines 3-dimensionalen räumlichen Eindrucks von seismischen Daten.

Das geothermische Potential der Störungszonen wurde arithmetisch mit dem Temperaturmodell von GeotIS neu berechnet und mit einer numerischen Modellierung verglichen. Für die numerische Modellierung wurde eine Vielzahl von Energiewerten für unterschiedliche geologische Gegebenheiten, repräsentiert durch Gestein- und Fluidparameter, berechnet. Die Werte können für die Abschätzungen des geothermischen Potenzials möglicher geothermischer Standorte mit ähnlichen geologischen Gegebenheiten genutzt werden.

GeotIS ist als dynamisches System angelegt. Das bedeutet, dass nach Eingang von neuen Informationen eine möglichst umgehende Aktualisierung stattfindet und der Öffentlichkeit über das Internet zur Verfügung gestellt wird. Aus diesem Grund wird die Datengrundlage, die Dateninfrastruktur sowie die Schnittstellen zwischen Mensch und System beständig erweitert und entwickelt. Ein Beispiel dazu ist die Integration der geologischen Fazieskarten aus dem Projekt¹ „Identifikation hydraulisch geeigneter Bereiche innerhalb der mesozoischen Sandsteinaquifere in Norddeutschland“, des 3D-Modellgebiets von Schleswig-Holstein aus dem INTERREG Projekt² „Geo-Power“ vom LLUR und der Literaturzitatdatenbank der Störungen sowie der Aktualisierung der Betriebsdaten geothermischer Anlagen in Deutschland.

Zur Verbesserung der Anwenderfreundlichkeit von GeotIS wurden die ursprünglich getrennten Bereiche „geothermische Standorte“ und „geothermische Potenziale“ in eine Benutzerschnittstelle zusammengefügt und auch an mobile Endgeräte (z. B. Tablets) angepasst. Damit einher ging eine umfangreiche Erweiterung der statistischen Abfragemöglichkeiten bezüglich der Energieerzeugung durch geothermische Anlagen.

Ende 2010 übernahm das LIAG die Funktion eines Operating Agent im Rahmen des IEA-Geothermal Implementing Agreement (IEA-GIA). Dabei handelt es sich um ein internationales Netzwerk unter dem Dach der Internationalen Energieagentur (IEA) mit dem Ziel, die Nutzung der geothermischen Energie weltweit zu fördern und Forschungsvorhaben zu unterstützen. Dazu gehört die Sammlung von Daten über die Nutzung geothermischer Energie in den Mitgliedsländern der IEA-GIA sowie einigen Nicht-Mitgliedsländern nach einheitlichen Kriterien und die Veröffentlichung der Daten in Form des jährlich erscheinenden „Trend Reports“. Im Projektzeitraum wurden drei „Trend Reports“ für die Berichtsjahre 2011, 2012 und 2013 fertiggestellt, der Report für das Jahr 2014 befindet sich in Vorbereitung. Ab Mai 2015 übernahm das LIAG zusätzlich als Operating Agent die Leitung des neu geschaffenen Annex XIII – „Emerging Geothermal Technologies“. Der Annex Leader wird ebenfalls aus dem Projekt „StörTief“ gestellt.

Das Hauptprodukt des Forschungsvorhabens steht als aktualisiertes und überarbeitetes „Geothermisches Informationssystem“ unter www.geotis.de allen Nutzern kosten-

¹ Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

² Gefördert durch die EU im Rahmen des EU INTERREG 4A Programms

frei zur Verfügung. Zusätzlich kann sich die Öffentlichkeit über die tiefe Geothermie mit Hilfe der LIAG-Broschüre „Tiefe Geothermie – Grundlagen und Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland“ in Deutsch (4. überarbeitete Auflage) und in Englisch (2. überarbeitete Auflage, Anfang 2017) informieren. Auch eine 1. spanische Auflage erscheint Anfang 2017.

2 Projektbeschreibung

Erneuerbare Energiequellen werden in Deutschland im Wärmemarkt vor allem im Mittel- und Niedertemperaturbereich (bis ca. 150 °C) eingesetzt. Unter den regenerativen Energiequellen nimmt die Erdwärme eine Sonderstellung ein, da sie ganzjährig und zu jeder Tageszeit zur Verfügung steht und daher im Grundlastbereich sowohl in der Wärme- wie in der Stromerzeugung eingesetzt werden kann. Moderne Wandlungstechniken, wie ORC-Verfahren und Kalina-Zyklus, ermöglichen die wirtschaftliche Stromerzeugung bei Temperaturen ab 100 °C. Damit wird die geothermische Stromerzeugung auch für normale geothermische Regionen wie Mitteleuropa interessant.

Für den Aufbau einer geothermischen Stromnutzung in Deutschland schlug das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) im TAB-Bericht 2003 die Erstellung eines Atlases der geothermischen Ressourcen vor (PASCHEN et al. 2003). Das dafür vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) bis 2009 geförderte Projekt „Aufbau eines Geothermischen Informationssystems“ (GeotIS) konzentrierte sich auf die tiefen Grundwasserleiter (Heißwasser-aquifere) im östlichen Teil des Norddeutschen Beckens, im Oberrheingraben und in Süddeutschland (SCHULZ 2009). In diesen Gebieten ist die wirtschaftliche Nutzung der tiefen Grundwasserleiter kurz- und mittelfristig am besten zu realisieren.

Das Folgeprojekt „Internet basiertes Informationszentrum für geothermische Energienutzung“, gefördert durch das BMU bis 2013, diente zur Qualitätsverbesserung bei der Projektierung geothermischer Anlagen und zur Abschätzung des Fündigkeitsrisikos geothermischer Projekte an wählbaren Lokalitäten. Dafür wurde das Geothermische Informationssystem weiter ausgebaut. Die Datenbestände für hydrothermale Ressourcen in Deutschland wurden teilweise neu erfasst, erweitert und mit neuen Datenbanken vernetzt. Die 3D-Strukturmodelle wurden u. a. in Norddeutschland, in dem Süddeutschen Molassebecken und dem südlichem Oberrheingraben erweitert und ergänzt. Für den nördlichen Oberrheingraben konnte ein 3D-Modell für die geothermischen Potenziale für Hessen übernommen werden.

In dem TAB-Bericht 2003 wurden auch die Störungssysteme in Deutschland als Quellen für die Gewinnung von geothermischer Energie angesehen. Diese Störungen können deutlich größere Durchlässigkeiten als das benachbarte Gestein aufweisen. Folglich werden Fluidbewegungen auf diese Störungsbahnen fokussiert. Entlang von Störungsbahnen aufsteigende Fluide sind heißer als das Nebengestein und transportieren Wärme aus größeren Tiefen in höher gelegene Bereiche. Diese Umstände machen Störungen für eine geothermische Nutzung interessant; hierbei sind vor allem die größeren, mindestens 7 km tief reichenden Tiefenstörungen bedeutsam (JUNG et al. 2002, PASCHEN et al. 2003).

Die Zielsetzung in diesem Verbundprojekt „Die Rolle von tiefreichenden Störungszonen bei der geothermischen Energienutzung“ ist es, die tiefreichenden Störungszonen genauer in ihrer Geometrie zu erfassen, ihre thermisch-hydraulischen Eigenschaften zu charakterisieren sowie ihr geothermisches Potenzial neu zu berechnen und zu bewerten. Die Ergebnisse sollen über das Geothermische Informationssystem (GeotIS) allgemein zugänglich gemacht werden.

Das Vorhaben wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Zeitraum vom 1. April 2013 bis zum 31. Mai 2016 unter dem Förderkennzeichen 0325623A gefördert und am Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und am Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR) durchgeführt.

Zwischen dem LIAG und den staatlichen geologischen Diensten besteht ein enger Kontakt und Informationsaustausch, der durch regelmäßige Projekttreffen unterstützt wurde (Tab. 2.1). Die Projekttreffen wurden wechselseitig vom LLUR, vom KIT und dem LIAG organisiert.

Nr.	Datum	Ort	Teilnehmende Organisationen
1	19.-20.11.2013	Hannover	KIT, LBEG, LfU, LIAG, LLUR, LUNG, PtJ
2	22.05.2014	Flintbek	KIT, LBEG, LIAG, LLUR, LUNG
3	27.11.2014	Karlsruhe	KIT, LBEG, LIAG, LLUR, PtJ
4	16.-17.06.2015	Hannover	KIT, LBEG, LIAG, LLUR
5	25.-26.11.2015	Flintbek	KIT, LBEG, LIAG, LLUR
6	15.-16.03.2016	Karlsruhe	KIT, LBEG, LIAG, LLUR

KIT: Karlsruher Institut für Technologie
 LBEG: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (Niedersachsen)
 LfU: Bayerisches Landesamt für Umwelt
 LIAG: Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
 LLUR: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (Schleswig-Holstein)
 LUNG: Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (Mecklenburg-Vorpommern)
 PtJ: Projektträger Jülich

Tab. 2.1: Auflistung der Projekttreffen und der teilnehmenden Organisationen.

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Meta-Literaturdatenbank für die Störungssysteme in Deutschland erstellt und mit einer Störungskarte in GeotIS verknüpft und veröffentlicht. Es wurden neue überarbeitete Auflagen der Broschüre „Tiefe Geothermie“ in Deutsch und Englisch mit Förderung des BMWi aufgelegt. Eine spanische Version steht kurz vor der Veröffentlichung.

Der vorliegende Endbericht fasst alle wichtigen Ergebnisse zusammen. In Kap. 3 wird eine Charakterisierung der Störungssysteme vorgenommen. Dafür werden tiefreichende Störungssysteme mit Eigenschaften versehen (attribuiert), die vorhandene geothermische Nutzung untersucht und Kriterien für die Klassifikation von tiefreichenden Störungen aufgestellt. Kap. 4 stellt die Ergebnisse bei der Erfassung von Störungssystemen vor. Dabei geht es um die Weiterentwicklung der geothermischen 3D-Strukturmodelle des Norddeutschen Beckens unter besonderer Berücksichtigung von Störungen, um die Erarbeitung eines geothermischen 3D-Strukturmodells für den Glückstadt-

graben in Schleswig-Holstein, die systematische Erfassung und Erkundung von tiefreichenden Störungen für die geothermische Energienutzung in SW-Deutschland sowie die stereoskopische 3D-Visualisierung seismischer Daten zur Detektion von tiefreichenden Störungen.

Auf die Neuberechnung des geothermischen Potenzials und die Bewertung von Störungen geht Kap. 5 ein. Die Erweiterung der Datengrundlage und der Dateninfrastruktur werden in Kap. 6 präsentiert. Die neu entwickelten Visualisierungs-Algorithmen für geologische Profilschnitte werden vorgestellt sowie die vielfältigen Erweiterungen und Anpassungen des Geothermischen Informationssystems (GeotIS). Kapitel 7 informiert über die nationale und internationale Zusammenarbeit des Informationszentrums für geothermische Energienutzung und über die Neuauflagen der Broschüre „Tiefe Geothermie“.

Ein umfangreiches Verzeichnis der im Rahmen des Projektes erstellten Schriften, der Vortragstätigkeit und Öffentlichkeitsarbeit schließt den Bericht. Das Geothermische Informationssystem steht unter Berücksichtigung von Eigentumsrechten an den Daten jedem Benutzer zur Verfügung (<http://www.geotis.de>).

2.1 Literatur

- JUNG, R., RÖHLING, S., OCHMANN, N., ROGGE, S., SCHELLSCHMIDT, R., SCHULZ, R. & THIELEMANN, T. (2002): Abschätzung des technischen Potenzials der geothermischen Stromerzeugung und der geothermischen Kraft-Wärmekopplung (KWK) in Deutschland. – Bericht für das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag; BGR/GGA, Archiv-Nr. 122 458; Hannover.
- PASCHEN, H., OERTEL, D. & GRÜNWARD, R. (2003): Möglichkeiten der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland. – Sachstandsbericht, Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, Arbeitsbericht **84**: 129 S.; Berlin (TAB).
- PESTER, S. & SCHULZ, R. (2009): Tiefe Geothermie - Das Geothermische Informationssystem für Deutschland ist online. – GMIT, 38: 19-20; Dez. 2009.

3 Charakterisierung von Störungssystemen

3.1 Attributierung von tiefreichenden Störungssystemen

Regionale und überregionale Störungssysteme sind für die Tiefe Geothermie von großer Bedeutung, da ihre hydraulischen Eigenschaften ein entscheidendes Kriterium bei der Standortauswahl darstellen können. Störungssysteme besitzen oft im Vergleich zum Nebengestein erhöhte Durchlässigkeiten und Porositäten, wodurch die Zirkulation von Grundwässern im Bereich der Störungszone möglich ist. Solche zirkulierenden Grundwässer können geothermisch genutzt werden. Andere Störungen können dagegen hydraulisch abdichtend wirken, so dass diese für den Fluidfluss eine Barriere darstellen. Typisch für gering durchlässige Störungen ist, dass entweder ein Tonpaket auf die Bewegungsbahn geschleppt wurde (sog. Tonverschmierung) oder es in großen Tiefen zu einer vollkommenen Zermahlung von Gestein gekommen ist. Auch innerhalb von Störungszonen haben kleinskalige Veränderungen der Lithologie und Deformation einen großen Einfluss auf die Durchlässigkeit. Die hydraulische Charakteristik einer Störungszone kann entlang ihres Verlaufes durch Änderungen der Geometrie, der lithologischen Ausprägung sowie aufgrund von Änderungen in den Versatzbeträgen stark variieren und so stellenweise für die Nutzung von Vor- oder Nachteil sein. Dieselbe Störung kann z. B. in harten, spröden Gesteinen eine hohe, in weichen, plastischen Gesteinen dagegen eine geringe Transmissibilität aufweisen und damit die geotechnische Nutzung von potenziellen Reservoirgesteinen für die Geothermie behindern.

Für Deutschland liegt eine Reihe von Kartenwerken vor, die in die Gesamtkarte der Tiefenstörungen von JUNG et al. (2002) eingeflossen sind und im Projekt „Geothermie-Atlas“ (FKZ 0325257A) (SCHULZ et al. 2013) überarbeitet wurden. Dabei handelt es sich u. a. um den Atlas geothermischer Ressourcen (HAENEL & STAROSTE 1988), in dem Informationen für den Oberrheingraben und das Süddeutsche Molassebecken enthalten sind. Eine hohe Informationsdichte zur Tektonik liefert das Kartenwerk von ZITZMANN (1981) für Westdeutschland und RÖLLIG et al. (1990) sowie SÖLLIG & RÖLLIG (1990) für Ostdeutschland. Neuere tektonische Daten für das norddeutsche Becken finden sich bei BRÜCKNER- RÖLLIG et al. (2002). Die jeweiligen Übersichtskartenwerke in Maßstäben von 1 : 1 000 000 bis 1 : 300 000 enthalten aber kaum Informationen über die Beschaffenheit und die Geometrie der Störungszonen. Zudem sind sie in verschiedenen Kartenwerken oder in benachbarten Bundesländern oft unterschiedlich erfasst worden. Einige Attribute wie die Orientierung der Störung zum heutigen Spannungsfeld lassen sich aus den Karten ableiten. Andere Eigenschaften und der interne Aufbau der Störungszonen können jedoch nur aus einer Vielzahl unterschiedlichster Publikationen entnommen werden. Ein weiteres Problem ergibt sich in der Kartendarstellung aus der fehlenden Gewichtung von Störungen auf das Gesamtstrukturbild einer Region z. B. nach ihren Versatzbeträgen oder ihrer zeitlichen Aktivität. Daher ist die geotechnische Bedeutung der Störungen nur schwer alleine aus den vorhandenen Kartenwerken zu interpretieren.

Insgesamt wurden im Projekt „Geothermie-Atlas“ 919 Störungsspuren generalisiert und als GIS-Shape-Datei erfasst, wobei zunächst ein Vergleich von verschiedenen

geologischen Kartenwerken derselben Region erfolgte. Regionale Störungen, die bis zu 5 km oder deren Störungsspuren in einzelnen Horizonten eines Tiefenkartenwerkes nebeneinander liegen (bei nicht senkrecht verlaufenden Störungen), wurden zu einer Störungszone zusammengefasst. Sind die Linien von Störungszone auf der Karte um weniger als 1 km horizontal versetzt, so wurden diese generalisiert d. h. ohne Versatz dargestellt. Horizontale Versätze mit Beträgen über 1 km blieben bei den Linien der Störungszone dagegen erhalten (Abb. 3.1).

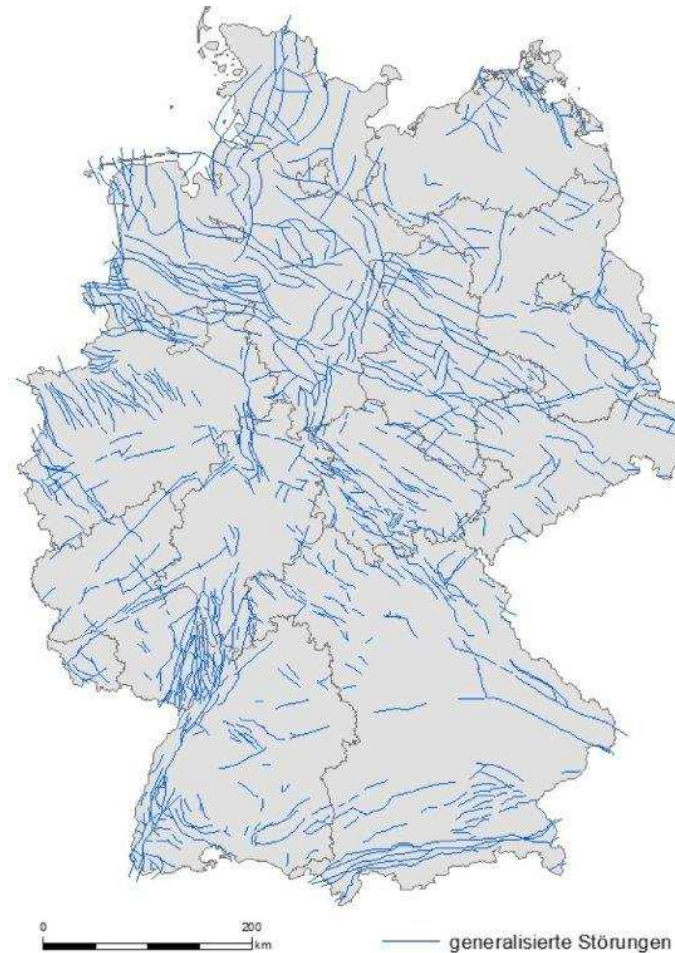


Abb. 3.1: Übersichtskarte der generalisierten bedeutenden Störungszone in Deutschland (aus SCHULZ et al. (2013), verändert).

Eigenschaften der Störungen, die aus den vorliegenden geologischen Karten und der Literatur entnommen werden konnten, wurden in die Attributtabelle der GIS-Shape-Datei übernommen. Bei den Attributen handelt es sich u. a. um die Felder „Orientierung“, „Azimut“, „Aktivität“, „Kategorie“ und „Länge“. Die Streichrichtung bildet die kürzeste Verbindung zwischen dem Anfang und Ende einer Störungslinie. Stark gekrümmte Störungslinien wurden in mindestens zwei verschiedene Störungssegmente unterteilt. Das Attributfeld „Horizont“ benennt gegebenenfalls den geologischen Horizont, für den die Lage der Störungszone dargestellt ist. Soweit bekannt, werden vertikale Versatzbeträge und die Aktivität der jeweiligen Störung genannt.

Ergänzt und erweitert wurden diese Angaben durch eine begleitende Literaturrecherche zur Störungsthematik, wobei die relevanten Zitate in einer bereits im Projekt „Geo-

thermie-Atlas“ begonnenen Literaturdatenbank (EndNote®) zusammengestellt und vorgehalten werden. Die übernommenen 500 Datensätze wurden im Verlauf des aktuellen Projekts um über 760 Zitate ergänzt; davon weisen allein ca. 200 Zitate Bezüge zu konkreten Störungen bzw. Störungssystemen auf. Es wurden darüber hinaus auch Studien zur Störungstektonik in die Zitatsammlung aufgenommen.

Durch diesen ersten Schritt für eine Bewertung von Störungszonen wurde der Mangel an Daten deutlich. Festzuhalten ist, dass Informationen über thermisch-hydraulische Eigenschaften tieferreichender Störungen nur in sehr begrenztem Umfang in der Literatur vorhanden sind.

Die Literaturzitatsammlung und die dazugehörigen räumlichen Daten von tiefgreifenden Störungszonen sind in eine relationale Datenbank überführt worden und durch räumliche Abfragen in GeotIS nutzbar. Aus urheberrechtlichen Gründen können digitalübertragbare vorhandene Veröffentlichungen nicht weitergegeben werden. Nach Auswahl einer oder mehrerer Störungen werden beim Aufruf des entsprechenden Datenblattes die verfügbaren Informationen angezeigt, z. B. die die Störung enthaltenden TK Blätter, Produktart (Zeitschriftenartikel, Buch, Karte etc.), die Störung beschreibenden Attribute sowie Literaturhinweise (Abb. 3.2).



Information zum Störungssystem:
Steinachtalverwerfung

© LIAG 2015
ATKIS® DLM250/1000, GN250/1000, VG250 © BKG 2006

Lage

betroffene TK25 Blätter

- 6318 Lindenfels
- 6319 Erbach
- 6418 Weinheim
- 6518 Heidelberg (Nord)

betroffene TK200 Blätter

- 6318 Frankfurt am Main - Ost
- 7118 Stuttgart-Nord



Störungssegmente

Horizonte	Orientierung	Azimut	Versatz	Aktivität	Kategorien	Länge
oberflächennah	N - S	ESE	großer 20 m		Störung, Abschiebung	23 km

Literatur

Horstig, G. v. (1956): Die Tektonik im Gebiet der Frankenwälder Querzone bei Berg nordwestlich Hof. - Geologica Bavarica 27, 84-130.

Typ:
Zeitschriftenartikel

Zitzmann, A. (1981): Tektonische Karte der Bundesrepublik Deutschland. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.

Typ:
Karte

Schlagwörter:
Alpidische Orogenese, Bohrung, Deckgebirge, Magmatit, Metamorphose, Orogen, Plutonit, Salzstock, Varistische Orogenese, Vulkanit

Schließen
Drucken

Abb. 3.2: Datenblatt der erfassten Information zu generalisierten Störungen am Beispiel der Steinachtalverwerfung.

3.2 Vorhandene geothermische Nutzung von Störungssystemen

3.2.1 Betrachtung von Bohrkernen mit Störungsmerkmalen

Störungen sind für die Geothermie von besonderem Interesse, da sie einerseits zu einer erhöhten Durchlässigkeit für Fluide führen können, in anderen Fällen aber auch eine komplette Abdichtung innerhalb des Gesteins bewirken können. Ob, und in welcher Weise sich Störungen im Kernmaterial ausprägen, wurde anhand von Änderungen der Werte von Porosität und Permeabilität (PoroPerm-Werte) untersucht.

In der Bohrungsdatenbank des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) kann gezielt nach verschiedenen Attributen gesucht werden. So ist es möglich, sich alle Bohrungen anzeigen zu lassen, die das Merkmal „Störung“ enthalten. Für die folgende Betrachtung wurden die Einschränkungen getroffen, dass die Störung tiefer als 3000 m sein soll und eine höhere Permeabilität als 10 mD besitzen muss. Um welche Art von Störung es sich handelt (Überschiebung, Diskordanz, Transgression etc.) und ob sich die angezeigten Störungen im Bereich von Kernstrecken befinden, musste anschließend anhand einer Bohraktensichtung für jede Bohrung einzeln ermittelt werden. Insgesamt wurden 25 Bohrungen hinsichtlich der genannten Kriterien untersucht. 4 Bohrungen konnten trotz Datenbankausgabe die geforderte Mindestpermeabilität nicht erreichen, wovon 3 Bohrungen aber Störungen im gekernten Bereich aufwiesen. Sie wurden deshalb ebenfalls in die Betrachtungen mit einbezogen. Weitere 8 Bohrungen wiesen ebenfalls Störungen in den gekernten Strecken auf und erfüllten alle Kriterien.

Bei den untersuchten Bohrungen handelt es sich um die Bohrungen Alfhausen Z1, Bethermoor Z2, Düste T3, Düste Z5, Emlichheim-Nord Z5, Fehndorf 3Z, Ganderkesee Z1, Hamwiede Z5, Hemmelte T3, Hemmelte Z5, Hemmelte Z8, Hemmelte-West Z1, Hesterberg Z2, Hofolding 4, Hohes Moor Z1, Hoya Z1, Kalle Z3, Kirchhatten Z2, Kneheim Z1, Rütenbrock 9Z, Schneflingen Z1, Uchte Z1, Ülsen Z1, Visbeck Z12 und Wietingsmoor Z2.

Nach Sichtung der Bohrakten konnten für die Bohrungen Alfhausen Z1, Bethermoor Z2, Emlichheim-Nord Z2, Fehndorf 3Z, Ganderkesee Z1, Hamwiede Z5, Hemmelte Z5, Hemmelte Z8, Hesterberg Z2, Hofolding 4, Hohes Moor Z1, Hoya Z1, Schneflingen Z1 und Uchte Z1 keine Störungen im gekernten Bereich festgestellt werden.

In den Bohrungen Düste T3, Düste Z5, Hemmelte T3, Hemmelte-West Z1, Kalle Z3, Kirchhatten Z2, Kneheim Z1, Rütenbrock 9Z, Ülsen Z1, Visbeck Z12 und Wietingsmoor Z2 fanden sich dagegen Störungen in den Kernstrecken, so dass sie für die Untersuchung verwendet werden konnten.

Sind im Bereich einer Störung deutliche Schwankungen der Permeabilität und Porosität zu verzeichnen, musste zunächst ermittelt werden, ob nicht der Wechsel zwischen verschiedenen Lithologien für diese Schwankungen als Hauptverursacher anzusehen ist. Sandsteine zeichnen sich im Allgemeinen meist durch eine höhere Permeabilität und Porosität aus als z. B. Tonsteine. Zu diesem Zweck wurden zunächst maßstabgetreue Säulendiagramme der Kernstrecken der betreffenden Bohrungen erstellt. In

diese Diagramme erfolgte anschließend der Plot der gemessenen Permeabilitäts- und Porositäts-Werte, die in den Abbildungen in anonymisierter Form ohne Nennung der absoluten Werte dargestellt werden (Abb. 3.3).

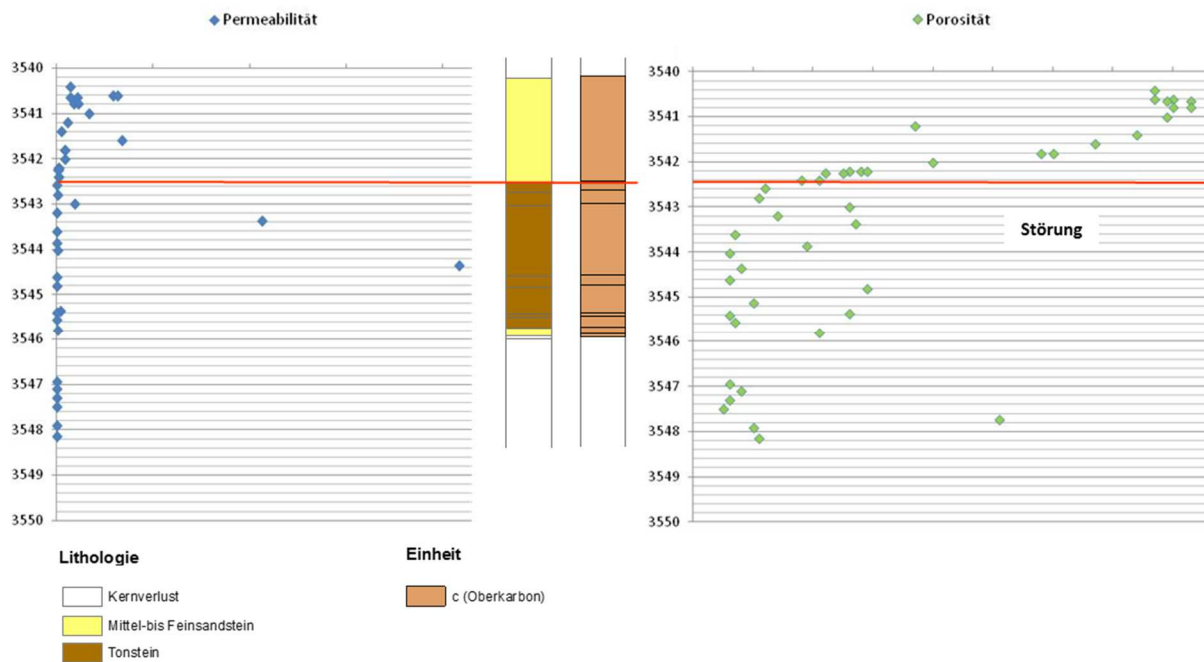


Abb. 3.3: Darstellung der PoroPerm-Werte einer Bohrung im Übergang von einer Sandsteinabfolge zu einer Tonsteinabfolge innerhalb derselben stratigraphischen Einheit im Bereich der Störung (rote Linie).

Bohrungen, in denen sich Veränderungen der PoroPerm-Werte eher auf einen Wechsel der Lithologie zurückführen lassen, sind Düste Z5, Fehndorf 3Z, Hemmelte T3, Hemmelte-West Z1 und Rütenbrock 9Z. Hier fällt die Störung meist mit einem abrupten Lithologiewechsel z. B. von Sandstein zu Tonstein oder Anhydrit zusammen. Außer bei einer Bohrung befinden sich darüber hinaus die Störungen nicht nur zwischen zwei unterschiedlichen lithologischen Einheiten, sondern trennen auch zwei verschiedene stratigraphische Abfolgen voneinander, weshalb es sich bei diesen Störungen eher um Transgressionen oder Schichtlücken etc. handelt (Abb. 3.4).

Insgesamt fanden sich sieben Bohrungen, die Störungen innerhalb derselben lithologischen Einheit aufwiesen. Es handelt sich um die Bohrungen Düste T3, Kalle Z3, Kirchhatten Z2, Kneheim Z1, Ülsen Z1, Visbek Z12 und Wietingsmoor Z2, die im weiteren Verlauf näher untersucht wurden. Bei den Bohrungen Düste T3, Kirchhatten Z2 und Wietingsmoor Z2 sind wiederum die Störungen zwar innerhalb lithologische Einheiten ausgebildet, jedoch grenzen sie jeweils zwei stratigraphische Abfolgen voneinander ab.

Exemplarisch wird der Bereich zweier anonymisierter Bohrungen, der sich in der Nähe der Störungen befindet, kurz beschrieben.

Die im gekernten Bereich einer Bohrung bei etwa 3280 m durchteufte Störung befindet sich innerhalb einer Tonsteinabfolge genau zwischen dem Übergang vom Volpriehausen-Sandstein zur Volpriehausen-Wechselfolge; hier liegt eine Schichtwiederholung durch Überschiebung vor. Die Lithologie im Bereich der Störung lässt sich als brauner

Tonstein beschreiben, der teilweise siltig und glimmerhaltig ist und von Fein- bis Mittelsandsteinlagen im mm bis cm-Bereich durchsetzt sein kann. Er ist häufig durch Entwässerungsstrukturen gestört. Die Siltsteinlagen sind mit weißen grobkörnigen ungerundeten bis gerundeten Dolomitpartikeln angereichert. Die braunglänzenden Schichtflächen weisen eine schwach ausgebildete Harnischstriemung auf. Haarrisse sind mit weißem Dolomit verheilt. Der Kernmantel ist glatt und der Bruch des Gesteins ist splittig. Das Schichteinfallen beträgt 50–62 °.

Die Permeabilität liegt im Bereich der Störung bei 0,01 mD. Auch ober- bzw. unterhalb ist keine oder nur eine geringe Änderung der Permeabilität festzustellen. Die Porosität weist Werte von 0,008 bis 0,013 auf und steigt beiderseits der Störung innerhalb derselben lithologischen Einheit auf Werte von bis zu 0,05. Diese Änderung lässt sich nur bedingt durch einen Wechsel der Lithologie erklären und könnte mit dem Auftreten der Störung bei etwa 3280 m in Verbindung gebracht werden (Abb. 3.5).

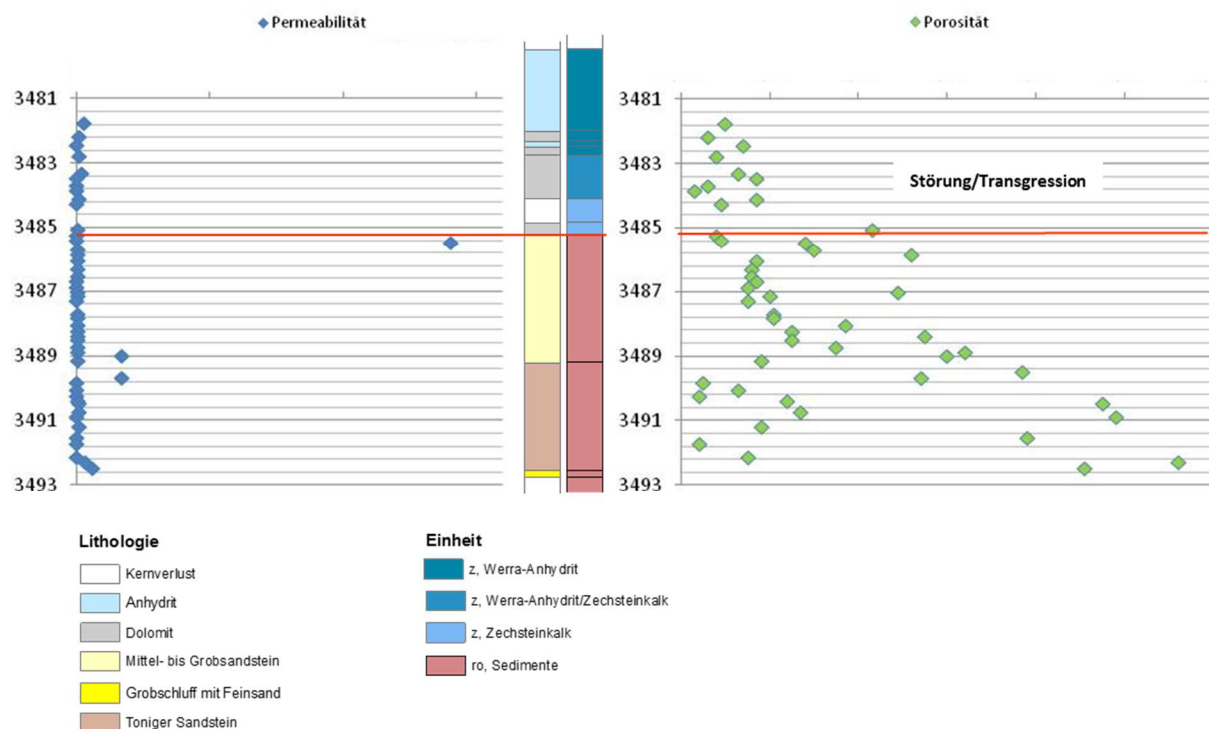


Abb. 3.4: Darstellung der PoroPerm-Werte einer Bohrung im Übergang von einer Dolomitabfolge zu einer Sandsteinabfolge zwischen den stratigraphischen Einheiten von Zechstein und Rotliegend im Bereich der Störung/Transgression (rote Linie).

Die Störung, die innerhalb des gekerntes Bereichs einer weiteren Bohrung auftritt, befindet sich innerhalb eines Dolomits der dem Hauptdolomits des Staßfurt-Zechsteins zugerechnet wird. Lithologisch handelt es sich um einen hellgraubraunen Dolomit mit einem Karbonatgehalt von 94–100 %. Durch kleine Tonlagen und -flatschen wirkt er etwas dunkelschlierig. Das fezzellig-kavernöse Gestein ist vorwiegend feinkristallin und zeigt eine interkristalline Porosität. Offene Drusen sind z. T. mit Kalkspat besetzt, und es treten mit Kalkspat verheilte Klüfte auf.

An den Klufträndern sind z. T. Kalkspatkristalle angereichert. Daneben treten feine offene Haarrisse auf. Im 8. Meter von der Krone befindet sich eine Kluft mit schwarzglänzender mineralischer Substanz, bei der es sich vermutlich um Pechblende handelt. Im 3. und 8. Meter von der Bohrkrone befinden sich wechselnd kleine dunkelbraune kryptokristalline dichte Kalksteinlagen, die z. T. etwas anhydritisch ausgebildet sein können. Es sind Schalenabdrücke enthalten und im 3. Meter von der Krone finden sich sehr selten Algenkörperumrisse. Weiterhin treten stylolithische Verzahnungen auf. Das Einfallen beträgt im oberen Abschnitt 25 °, im unteren Bereich 33 °, wobei die Einfallswerte nicht repräsentativ sind, da im schrägen Loch gekernt wurde. Bei der Entnahme findet eine Entgasung statt und ein mäßiger H₂S-Geruch ist wahrzunehmen.

Oberhalb und unterhalb der Störungsbereiche sinken die Permeabilitätswerte von maximal 236 mD bis auf weniger als 1 mD. Die Porositätswerte nehmen oberhalb der Störung bis auf 0,05 ab. Im Bereich der Störung und darunter schwanken sie im Bereich von 0,20 bis 0,25. Da im Bereich der Störung weder ein Fazieswechsel stattfindet noch ein Übergang in eine andere stratigrafische Einheit zu verzeichnen ist, könnte die Änderung der PoroPerm-Werte mit dem Auftreten der Störung bei etwa 3900 m in Verbindung stehen (Abb. 3.6).

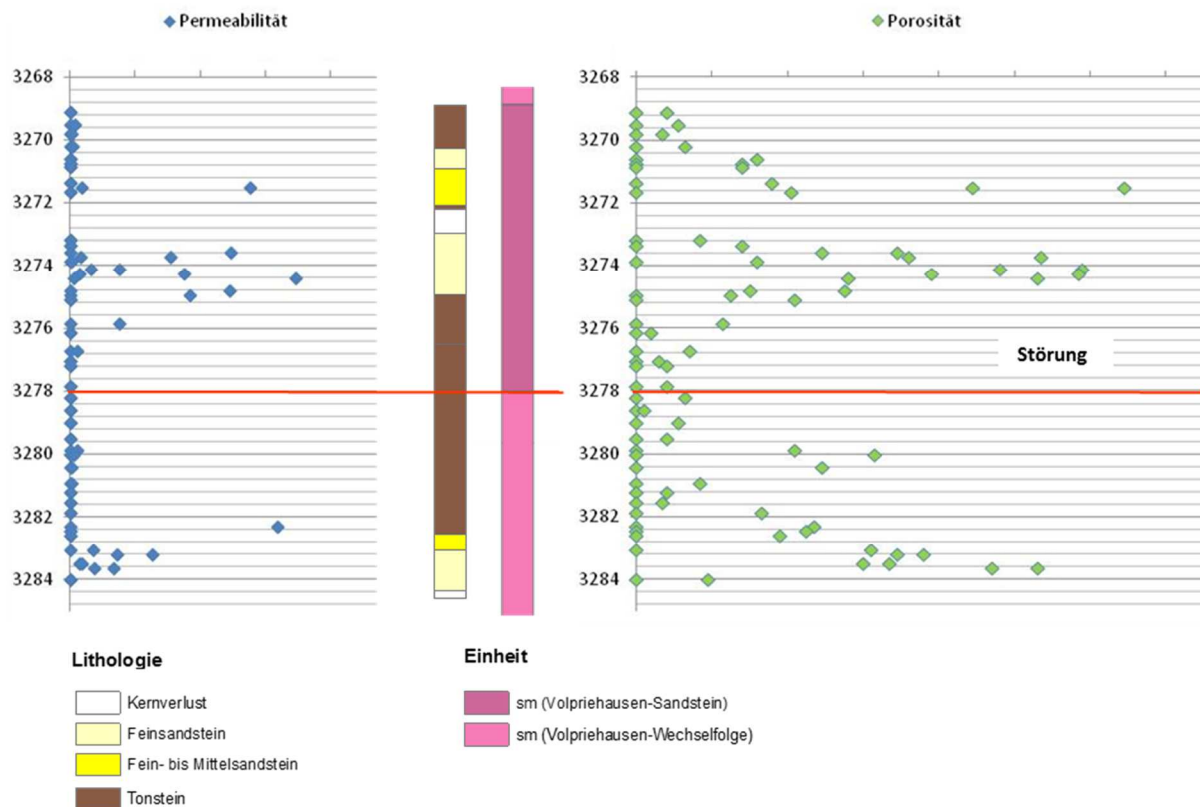


Abb. 3.5: Darstellung der PoroPerm-Werte einer Bohrung innerhalb einer Tonsteinabfolge im Bereich einer Störung (rote Linie).

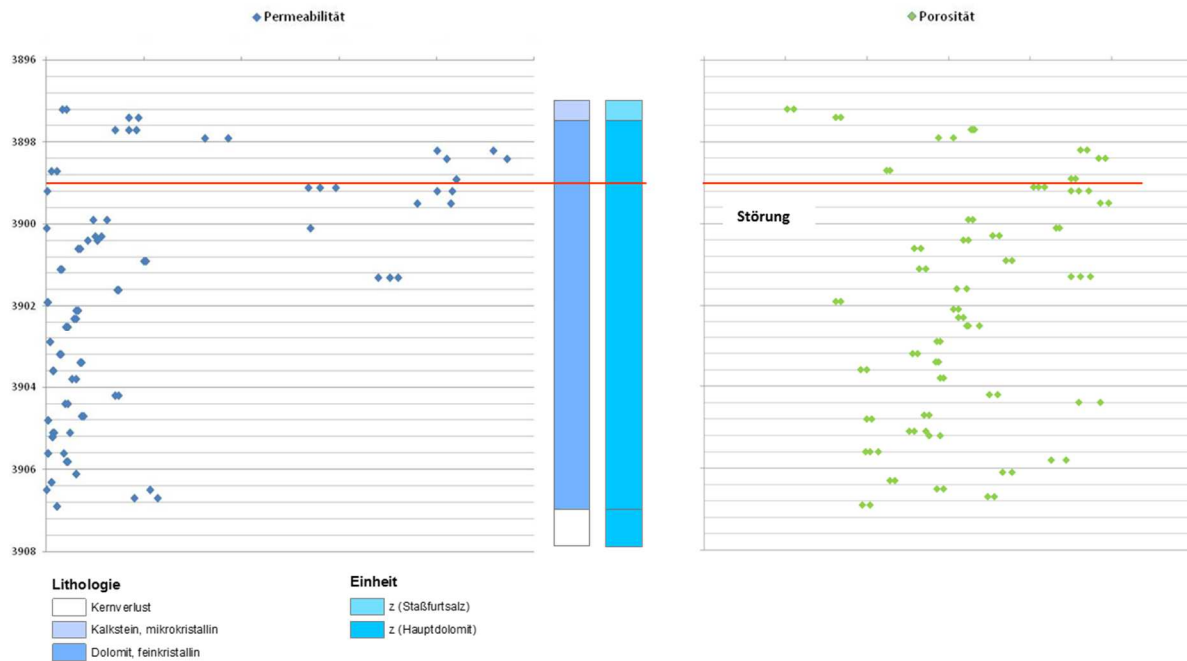


Abb. 3.6: Darstellung der PoroPerm-Werte einer Bohrung innerhalb einer Dolomitabfolge des Hauptdolomits im Bereich einer Störung (rote Linie).

Die ausführliche Untersuchung von Kernen aus Bohrungen, die in erster Linie als Öl- und Gasexplorationsbohrungen abgeteuft wurden, zeigt, dass sich ein Wechsel der Lithologien oftmals deutlich und gut anhand der gemessenen PoroPerm-Werte nachvollziehen lässt (Abb. 3.3). Weisen die gekernten Abschnitte Störungen auf, kann dagegen kein eindeutiger Trend beobachtet werden, ob und inwieweit die Störung Einfluss auf die PoroPerm-Werte nimmt. Trends hinsichtlich einer Erhöhung oder Erniedrigung der PoroPerm-Werten im Bereich der Störungen lassen sich nur bei wenigen Bohrungen feststellen wie z. B. Düste T3, Kirchhatten Z2 oder Visbeck Z12. Dies kann aber z. T. auch in der geringen Anzahl der untersuchten Kernstrecken begründet liegen, für die PoroPerm-Werte vorlagen.

3.2.2 Geothermische Projekte, die Störungssysteme nutzen

Störungszonen werden bisher in Deutschland nicht direkt für die Erdwärmegewinnung genutzt. Allerdings wird bei der Erschließung von Heißwasseraquiferen darauf geachtet, z. B. im Oberrheingraben und im Malm des Süddeutschen Molassebeckens, Störungszonen zu durchhörern, um höhere Fließraten zu erzielen. Im Verbundprojekt GE-OFÜND (FKZ 0325512B) sind für den Raum des Süddeutschen Molassebeckens 74 Anlagen erfasst worden, die entweder einen sicheren Anschluss (29) bzw. einen wahrscheinlichen Anschluss an Störungen aufweisen (12), bei denen sich ein Bruchsystem in der Nähe befindet (14), oder die ohne Anschluss an Störungen vorliegen (19) (GANZ & THOMAS 2016). In den Abbildungen 5a und b wird die Anzahl der Anlagen in Abhängigkeit von der Entfernung zu generalisierten Störungen (Abb. 3.1) (aus dem Projekt „Geothermie-Atlas“) bzw. regionalen Störungen aus dem Bayerischen Geothermieatlas (BSTWIVT 2010) dargestellt. Die Anlagen im Oberrheingraben fanden bei dieser Betrachtung aufgrund der unzureichenden Datenlage keine Berücksichtigung.

Die größte Anzahl von Anlagen mit sicherem Anschluss an eine Störung befindet sich innerhalb einer Zone von 1000–5000 m Entfernung zu einer generalisierten Störung. Die Anlagen ohne Anschluss weisen ebenfalls in dieser Zone die größte Anzahl auf.

Auf die Kategorien von unter 50 m und 50–100 m Entfernung zu einer Störung entfallen gar keine Anlagen (Abb. 3.7a). Bei regionalen Störungen fallen die meisten Anlagen mit sicherem Anschluss in die Kategorie der Entfernung von 500–1000 m. Die Anlagen ohne Anschluss sind dagegen in der Kategorie 1000–5000 m am häufigsten zu finden. In die Kategorie der Entfernung größer als 10000 m fallen gar keine Anlagen.

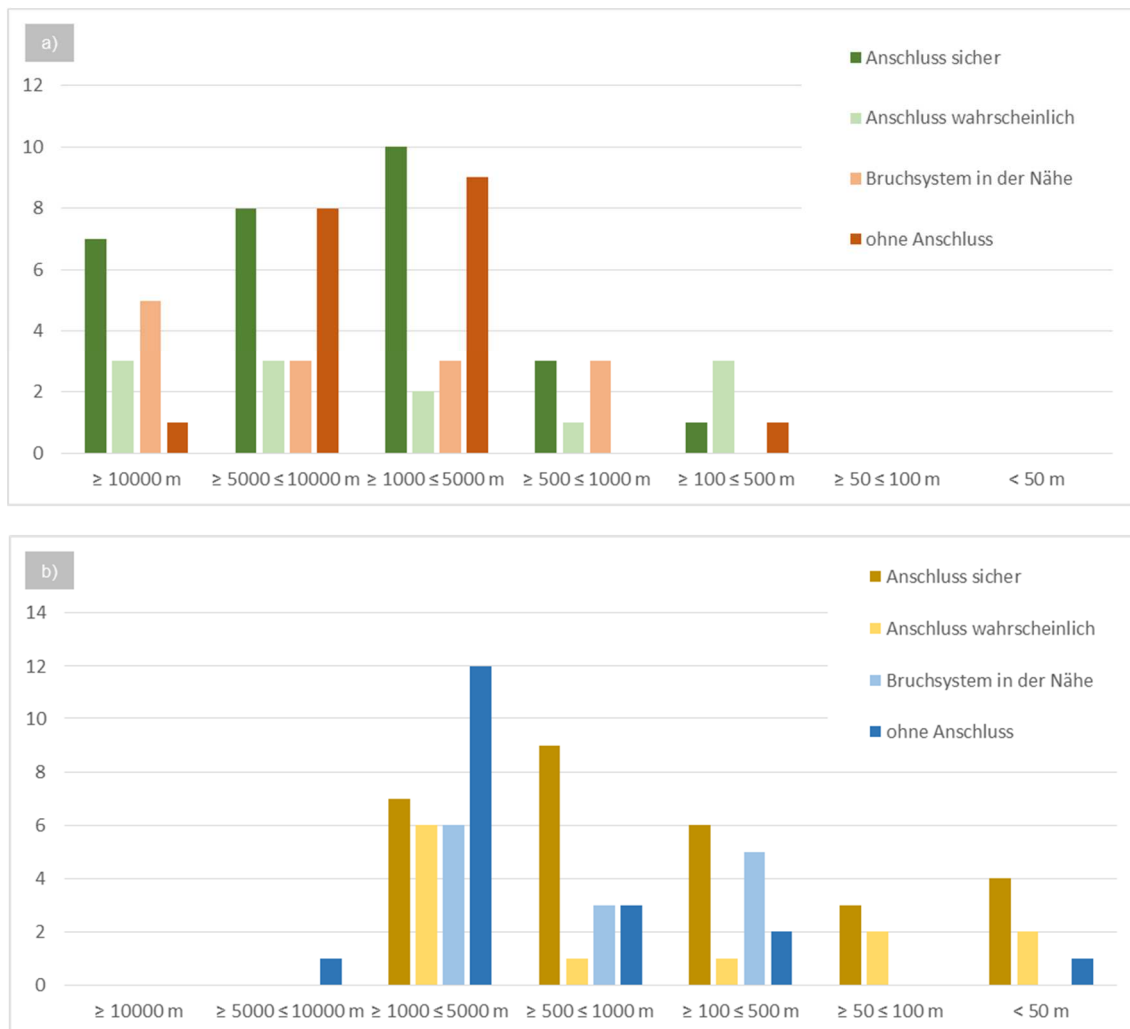


Abb. 3.7: Anzahl geothermischer Anlagen im Süddeutschen Molassebecken in Abhängigkeit von der Entfernung zu generalisierten bzw. regionalen Störungszonen. a) Generalisierte Störungszonen. b) Regionale Störungszonen.

Aus der Entfernung zu einer Störung kann nicht geschlossen werden, ob eine Bohrung an eine Störung angeschlossen ist, da sowohl Anlagen mit gesichertem Anschluss als auch Anlagen ohne Anschluss in diese Kategorie fallen (Abb. 3.7b). Die Entfernung zu Störungen korreliert nicht mit der Häufigkeit der angeschlossenen Anlagen. Dabei muss bedacht werden, dass es sich bei der Analyse der Abstände zwischen Bohrung und Störung lediglich um die Abstände auf der Oberfläche handelt, also nur Störungsspuren betrachtet werden. Das Einfallen der Störungen bleibt hierbei unberücksichtigt. Bei Gegenüberstellung der Verteilung der Anzahl an Anlagen auf die verschiedenen Entfernungskategorien ist eine Verschiebung in Richtung höhere Entfernung bei dem

Schnitt mit generalisierten Störungen im Vergleich zu den regionalen Störungen festzustellen. Die alleinige Betrachtung der generalisierten Störungen würde daher zu einer Überschätzung der Entfernungen führen, in denen ein Anschluss an Störungen möglich ist.

Die Ergebnisse der Durchsicht nach Störungsindikatoren flossen, soweit vorhanden, in die Attributierung der Störungssysteme ein.

3.2.3 Thermalwasseraustritte an Störungszonen

Im Rahmen von GeotIS wurden deutschlandweit Standorte zehner verschiedener Nutzungstypen erfasst, die sich nach der jeweiligen Hauptnutzung kategorisieren lassen: Thermalbad / Balneologie (160), Trink- und Brauchwasser (36), Aquiferspeicher (1), Fernwärme (23), Gebäudeheizung (8), Stromerzeugung (7), CO₂-Gewinnung (3), Forschung (4), sonstige (2) sowie 13 ungenutzte Anlagen Standorte.

Exemplarisch wurde der Zusammenhang zwischen Thermalwasseraustritten und tiefen Störungszonen auf Basis der Kategorie Thermalbad / Balneologie untersucht, indem ein Verschnitt von Thermalwasserbohrungen und -quellen mit der generalisierten Störungskarte erfolgte (Abb. 3.1). Die Abb. 3.8 stellt die Anzahl der Thermalwasserbohrungen / -quellen in Abhängigkeit von der Entfernung zu generalisierten Störungszonen dar.

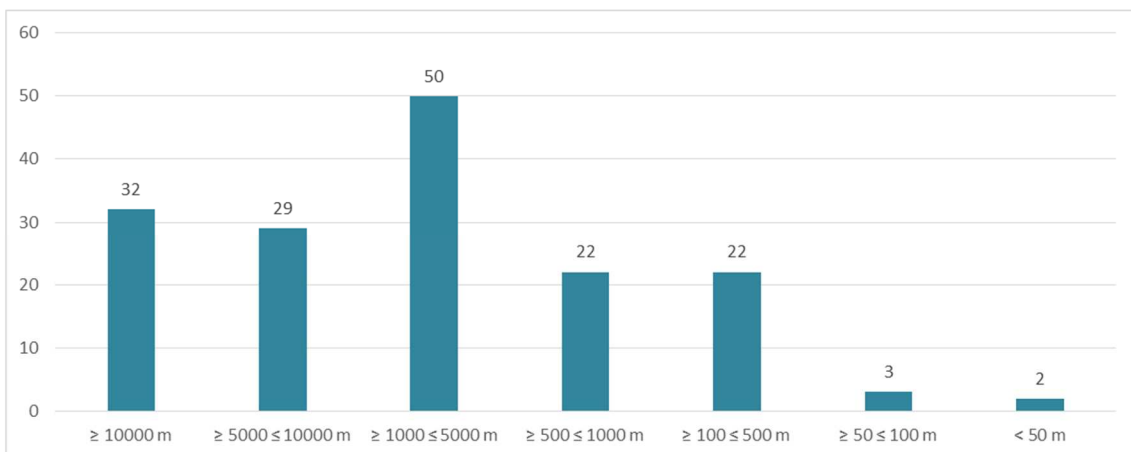


Abb. 3.8: Anzahl der Bohrungen in Abhängigkeit von der Entfernung zu den generalisierten Störungen.

49 der 160 betrachteten Bohrungen liegen nicht weiter als 1000 m von generalisierten Störungen entfernt. Weitere 50 Thermalwasserbohrungen befinden sich in einer Entfernung von 1000–5000 m. Für 61 Bohrungen kann innerhalb eines Radius von 5000 m keine Überschneidung mit einer generalisierten Störungszone festgestellt werden. Analog zu der Betrachtung in Kap. 3.2.2 liegt auch hier die höchste Anzahl an Thermalbohrungen in der Kategorie von 1000–5000 m Entfernung. Auch werden nur die generalisierten Störungsspuren an der Oberfläche berücksichtigt. Diese Betrachtung kann nur als erste Annäherung an die Thematik gewertet werden, da ein Vergleich mit generalisierten Störungen erfolgte, ohne dass regionale Störungssystem und deren exakter Verlauf in die Studie eingegangen sind. Daten über Temperaturinformationen und weitere Parameter sind soweit vorhanden in die Attributtabelle und Literaturdatenbank (Kap. 3.1) eingeflossen.

3.3 Geophysikalische Eigenschaften von Störungszonen

Wenn Störungen deutlich größere Durchlässigkeiten als das benachbarte Gestein aufweisen, können Fluidbewegungen auf diese Störungsbahnen fokussiert werden. Entlang dieser Störungsbahnen aufsteigende Fluide sind heißer als das Nebengestein und transportieren Wärme aus größeren Tiefen in höher gelegene Bereiche. Es müssten Temperaturanomalien entstehen. Im Folgenden werden die Ergebnisse vom Verschneiden von Temperaturkarten, generiert aus dem 3D-Temperaturmodell von GeotIS, mit den deutschlandweiten tiefen Störungssystemen (Abb. 3.1) gezeigt, um den Einfluss der Störungssysteme auf die Temperaturanomalien zu zeigen.

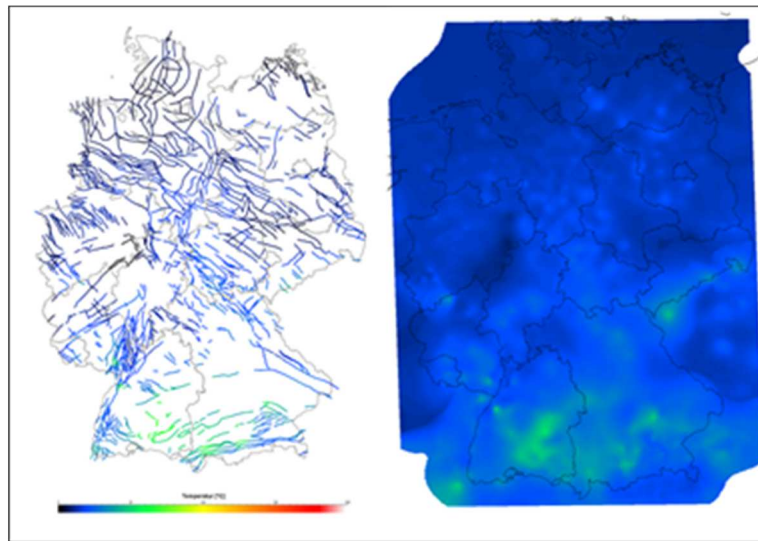


Abb. 3.9: Temperaturkarte und Verschnitt mit dem Störungszonen in 100m Tiefe unter NN.

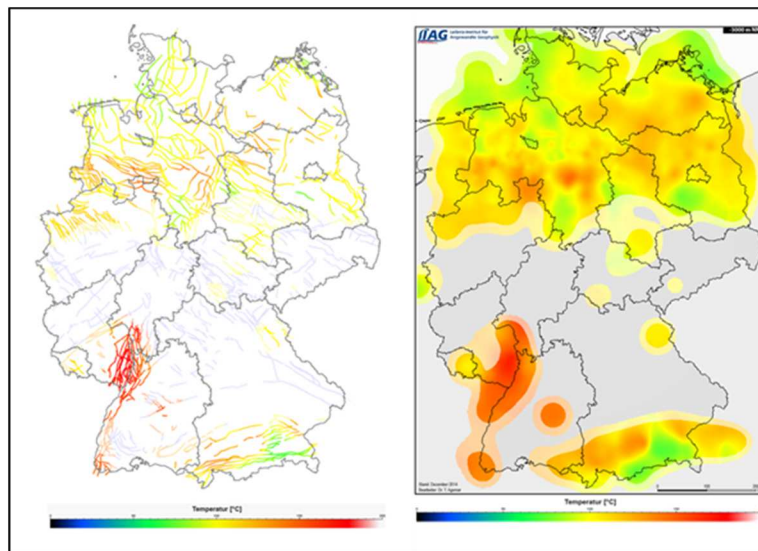


Abb. 3.10: Temperaturkarte und Verschnitt mit dem Störungszonen in 3000m Tiefe unter NN.

Im Vergleich der Temperaturkarten mit den Karten der verschnittenen tiefen Störungszonen in unterschiedlichen Tiefen (Abb. 3.9-3.11) kann nicht im Allgemeinen festgestellt werden, dass die Störungen mit höheren Temperaturen einhergehen. In Abb. 3.10 weisen die Störungslinamente des Oberrheingrabens und die Tempera-

turanomalie in der Tiefe von 3000 m im Ländereck Hessen, Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg die gleiche längs gerichtete Nordsüdstruktur auf. Wohingegen in der Bayrischen Molasse die westöstlich verlaufenden Störungen ein Kältetief durchlaufen.

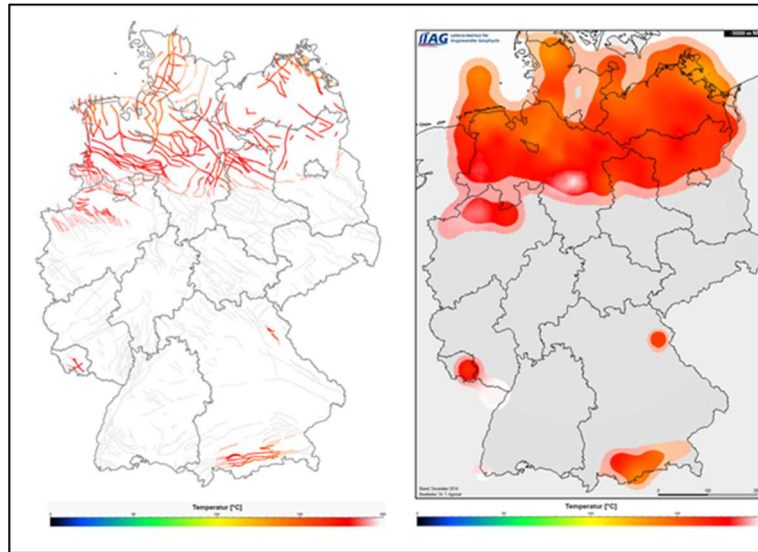


Abb. 3.11: Verschnitt der Temperaturkarte mit dem Störungszonen und Temperaturkarte in 5000m Tiefe unter NN.

Sehr gut ist zu erkennen, dass mit zunehmender Tiefe die grauen Flächen in den Temperaturkarten zunehmen, hier sind keine gemessenen Temperaturdaten vorhanden. Das Kartenmaterial lässt den Schluss zu, dass die Temperaturanomalien nicht vordergründig durch die Störungen verursacht werden. Alleine im Gebiet des Oberrheingrabens könnte man vielleicht eine solche Korrelation herstellen. Die Abbildungen verdeutlichen auch den Mangel an Temperaturdaten und in Kap. 3.2.1 wird auf die geringe Zahl von Bohrungen mit Kernen mit Störungsmerkmalen, mit einer Mindesttiefe von 3000 m, hingewiesen. Die Gitterabstände der Temperaturwerte in den GeotIS-Karten betragen 2000 Meter und die eingezeichneten Störungen sind stark vereinfachte Projektionen von Störzonen, für die die Ausbreitungsrichtung im Untergrund größtenteils nicht bestimmt ist.

Für eine numerische Modellierung einer Störung bezogen auf eine Temperaturverteilung, um eindeutige Rückschlüsse bezüglich der hydraulischen Parameter zu ziehen, ist die Datenlage zu gering und die Parametervariabilität zu groß. Bei diesen großen Datengitterabständen kann eine durch eine Störung verursachte engumgrenzte Temperaturanomalie nicht aufgelöst werden. Eine notwendige Voraussetzung ist eine engmaschige Temperaturermittlung für eine bekannte Störung, was ohne hohen Aufwand nur auf der Oberfläche möglich ist.

3.4 Kriterienkatalog für die Erfassung tieferreichender Störungen und ihrer geothermischen Nutzbarkeit in Deutschland

3.4.1 Einleitung

Störungen sind Bruchzonen oder Bruchflächen, die in Sediment- wie auch in kristallinem Gestein auftreten können. Für die geothermische Nutzung sind die spröde (d. h.

bruchhaft) deformierten Störungen von besonderer Bedeutung. In und um diese Bruchzonen kann das hydraulische und thermische Leitvermögen der Gesteinsschichten beträchtlich verändert sein. Bruchhafte Störungen können bis in eine Tiefe von 12 km reichen. In einer Tiefe von 12 bis 17 km werden Störungen spröd-duktil deformiert, ab 17 km Tiefe nur noch duktil und weisen keine hydraulische Wirksamkeit mehr auf.

Tiefreichende spröde Störungszonen durchziehen das gesamte Gebiet Deutschlands (Abb. 3.1). Störungen sind derzeit in Tiefen bis 5-7 km wirtschaftlich nutzbar. Im Rahmen des Projekts werden daher Störungen bis ca. 5 km Tiefe betrachtet. Die meisten tiefreichenden Störungen sind an geologische Großstrukturen gebunden, wie z. B. das Norddeutsche Becken, das Thüringer Becken, der Oberrheingraben oder das Süddeutsche Molassebecken.

3.4.2 Definition und Klassifikation von Störungen

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

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

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

3.4.3 Aufbau von Störungen

Bruchhafte Störungen entstehen durch Gesteinsversagen aufgrund tektonischer Spannungen in der Erdkruste. Die Deformation kann je nach Temperatur- und Tiefenlage spröd, spröd-duktil oder duktil sein, wobei spröde Deformation zu eng begrenzten Störungsflächen führt, die durch Scherung entstehen. Die Intensität der Deformation

hängt neben den geologischen Verhältnissen auch von der Größe der einwirkenden tektonischen Spannung ab. Je nach Versatzbetrag können Störungen entweder nur wenige Zentimeter breit und lang sein und als singuläre Trennfläche definiert werden, oder sie sind Meter bis Kilometer breit und bilden damit Störungszonen. Störungen treten in allen Skalenbereichen von der Mikroebene zwischen zwei Kristallkörnern bis zur Megaskala als Grenzen kontinentaler Platten auf. Eine Störung wird untergliedert in den Kernbereich der Scherfläche und zwei äußeren Zerrüttungszonen, in denen die Zerklüftung durch den Schervorgang erhöht ist (CAINE et al. 1996). Daher ist in der Regel die Durchlässigkeit beidseits des Störungskerns erhöht und nimmt nach den Seiten ab bis auf die Durchlässigkeit des ungestörten Gesteins. Entsprechendes gilt auch für das Elastizitätsmodul.

Abb. 3.12 zeigt schematisch den Aufbau einer Störung am Beispiel einer Blattverschiebung. Vielfach wird auch beobachtet, dass eine Störung aus mehreren kleineren Einzelstörungen aufgebaut ist, d. h. aus mehreren Kernbereichen und mehreren Auflockerungszonen, wie z. B. in der Tiefbohrung Soultz-sous-Forêts aber auch in Bergwerken im Schwarzwald. Allgemein gilt, dass die Breite einer Zerrüttungszone sich proportional zur Größe des Versatzbetrages verhält (z. B. CHOI et al. 2016) und auch Attribute wie Länge und Versatz miteinander korrelieren können (z. B. TORABI & BERG 2011, KOLYUKHIN & TORABI 2012). Diese Korrelationen wurden in verschiedenen Skalenbereichen und unterschiedlichen Lithologien gefunden.

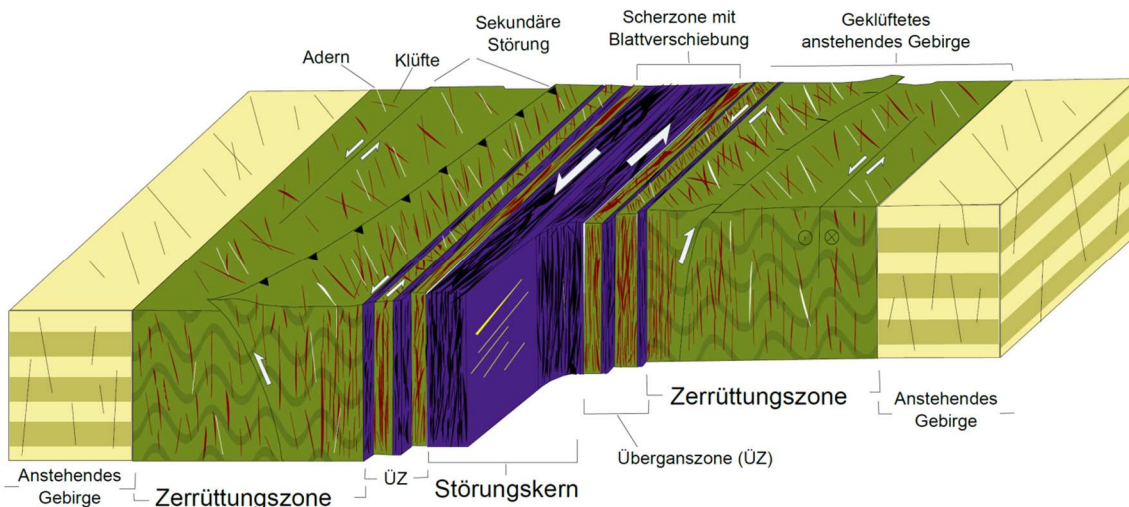


Abb. 3.12: Blockbild einer Störung bestehend aus zwei Zerrüttungszonen und einer Scherzone im Kernbereich (verändert nach CHOI et al. 2016).

3.4.4 Hydraulische Eigenschaften von Störungen

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

Fluide können durch die hydraulische Begrenzung im Störungskern und die erhöhte Durchlässigkeit in der Zerrüttungszone von einer eher horizontalen Fließrichtung in eine eher vertikale umgelenkt werden (Abb. 3.13). Daher können Störungszone gleichzeitig beides sein: hydraulisch dicht sowie hydraulisch erhöht leitfähig.

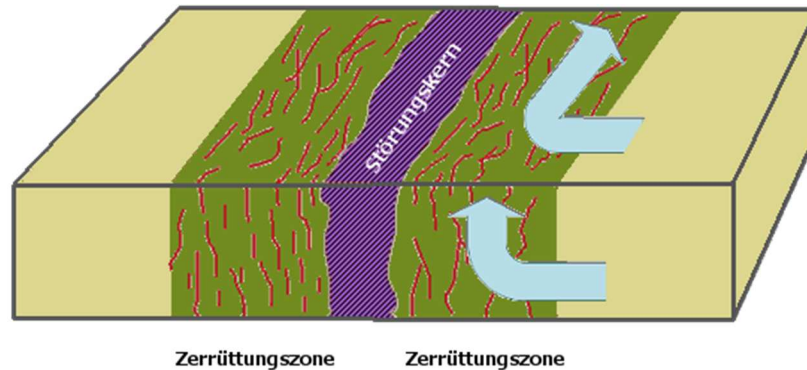


Abb. 3.13: Beispiel für eine mögliche hydraulische Wirkung von Störungszone. Ein undurchlässiger Störungskern stellt eine hydraulische Barriere dar und kann die Fließrichtung in verschiedene Richtungen umlenken.

Derartige Systeme treten verstärkt in tektonisch noch aktiven Gebieten mit erhöhter Reliefenergie auf, wie z. B. am Fuße des Schwarzwaldes (oder der Vogesen) in SW-Deutschland und sind die Ursache der meisten Thermalwasserquellen (z. B. Baden-Baden, Aachen, Wiesbaden, Ohlsbach etc.). Die großen Höhenunterschiede von z. T. 1.000 m initiieren diese Tiefenwasserzirkulation, die bis in einige 1.000 m unter Gelände reichen (Abb. 3.14). Die Verweilzeiten der in den Untergrund einsickernden meteorischen Wasser liegen bei einigen 1.000 bis 10.000 Jahren.

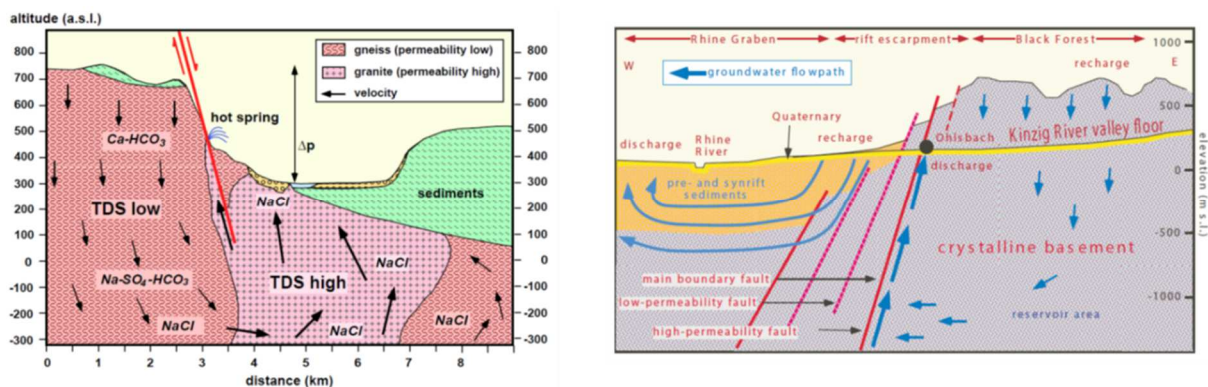


Abb. 3.14: Beispiel für Tiefenwasserzirkulationen, initiiert durch die hohen Topographieunterschiede und die hydraulische Wirkung von Störungszone (Quelle: STOBER et al. 1999, STOBER & BUCHER 2014).

Durch aufsteigende Fluide kann dabei auch Wärme in geringere Tiefen transportiert werden, was Störungen für eine geothermische Nutzung interessant macht. Zum anderen werden Wasser mit höherem Lösungsinhalt in flachere Bereiche transportiert. Durch den Aufstieg der Thermalwasser in andere Druck- und Temperaturbereiche kann es zu Übersättigung, unter gewissen Umständen auch zu Untersättigung der Wasser bezüglich verschiedener Mineralphasen und damit zu Ausfällungen bzw. Lösungserscheinungen kommen, d. h. zu einer Änderung der Permeabilität (STOBER & BUCHER 2014). Dabei stellen Anhydrit, Calcit, Dolomit, Tonminerale, Baryt und Quarz die häufigsten Mineralphasen bei Ausfällungen dar.

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

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

Mit Hilfe von Geothermometern kann aus der hydrochemischen Analyse einer Thermalwasserquelle auf die Reservoirtemperatur und daraus mittels geothermischen Gradienten auf die Zirkulationstiefe geschlossen werden. Beispielsweise ergeben sich somit für die Thermalquellen Baden-Baden Zirkulationstiefen von ca. 3500 m (STOBER 1995).

Weitergehende Informationen über die Geometrie und Eigenschaften von Störungen in größeren Tiefen können nur durch Bohrungen (wenn sie die Störung komplett durchörtern) und Seismik gewonnen werden. Der Erkenntniszuwachs durch Seismik wird dabei wesentlich von der Datenqualität bestimmt. Eine Unterscheidung zwischen Haupt- und Nebenstörung, eine Bestimmung der Zerrüttungszonenbreite oder eine Beurteilung der Klüftigkeit sind dabei sehr schwierig (z. B. SCHUCK et al. 2012). Tiefere Störungszonen des Norddeutschen Beckens wurden im Rahmen des StörTief-Projekts

am Beispiel des Glückstadt Grabens untersucht. Geometrische Attribute wurden hierbei durch die geologische 3D-Modellierung gewonnen und zusammen mit Informationen aus Bohrdaten zur Einschätzung der Untersuchungswürdigkeit verwendet.

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

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

Bekannt ist auch, dass die Transmissibilität von Störungen innerhalb einer Region, teilweise aber auch innerhalb der gleichen Störungszone an verschiedenen Abschnitten, sehr unterschiedlich sein kann (MOECK et al. 2015). Ursache können Unterschiede im Schichtaufbau, in der Klüftigkeit oder im Ausmaß der Zementation sein. Manche Störungssegmente wirken als Wasserstauer (Abb. 3.13), an denen sich die Grundwassergleichen um mehrere Dutzende Meter unterscheiden können (z. B. Ruhr-Sprung bei Niederzier am Niederrhein). Andererseits wurden bei einigen Geothermieprojekten Störungen gezielt durchörtert, um damit die Produktivität oder Injektivität einer Bohrung zu erhöhen, so z. B. für die Reinjektion des abgekühlten Thermalwassers aus dem Geothermieheizkraftwerk Unterhaching. Ebenso injiziert und fördert die Anlage in Landau in und aus Störungszonen.

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

3.4.5 Nutzungspotential und Kriterien

Ob eine tiefreichende Störung von geothermischem Nutzen ist, hängt von vielen Faktoren ab und sollte bereits im Vorfeld einer Bohrung im Rahmen einer Machbarkeitsstudie betrachtet werden, um abzuwägen, ob eine Störungszone für ein Geothermieprojekt ein erfolgversprechendes Bohrziel sein könnte. Ziel ist es dabei, abzuschätzen, ob ein geothermisches Potential innerhalb eines Störungsabschnitts auf Basis der vorhandenen oder noch einzuholenden Daten (bzw. Modelle) eher wahrscheinlich oder unwahrscheinlich ist. Auf regionaler Basis eignet sich für dieses Vorgehen ein einfaches Klassifikationsschema mit fünf Kategorien, wie es in Abb. 3.15 dargestellt ist.

Im günstigsten Fall (Abb. 3.15 links außen) ist die hydraulische Wegsamkeit einer Störung bereits nachgewiesen. Ein hinreichender Nachweis kann eine heiße Quelle, ein starker Zulauf oder Spülungsverlust in einer Bohrung in entsprechender Tiefe oder (im Idealfall) ein hydraulischer Test sein. Seltener werden Tracer-Experimente oder die

Fluidzusammensetzung den Nachweis erbringen. Bei der Bewertung hydraulischer Testdaten ist zu prüfen, in wieweit die ermittelte Gebirgsdurchlässigkeit tatsächlich der Störung zugeordnet werden kann. Zudem muss eine Störungsmusteranalyse und Spannungsfeldanalyse durchgeführt werden, um das Bezugssystem Störung – Permeabilitätsstruktur – heiße Quelle korrekt zu qualifizieren. Dabei ist zu beachten, dass sich mit der Tiefe in der Regel das Spannungsregime ändert, was sich insbesondere auf die Kluftpermeabilität auswirkt.

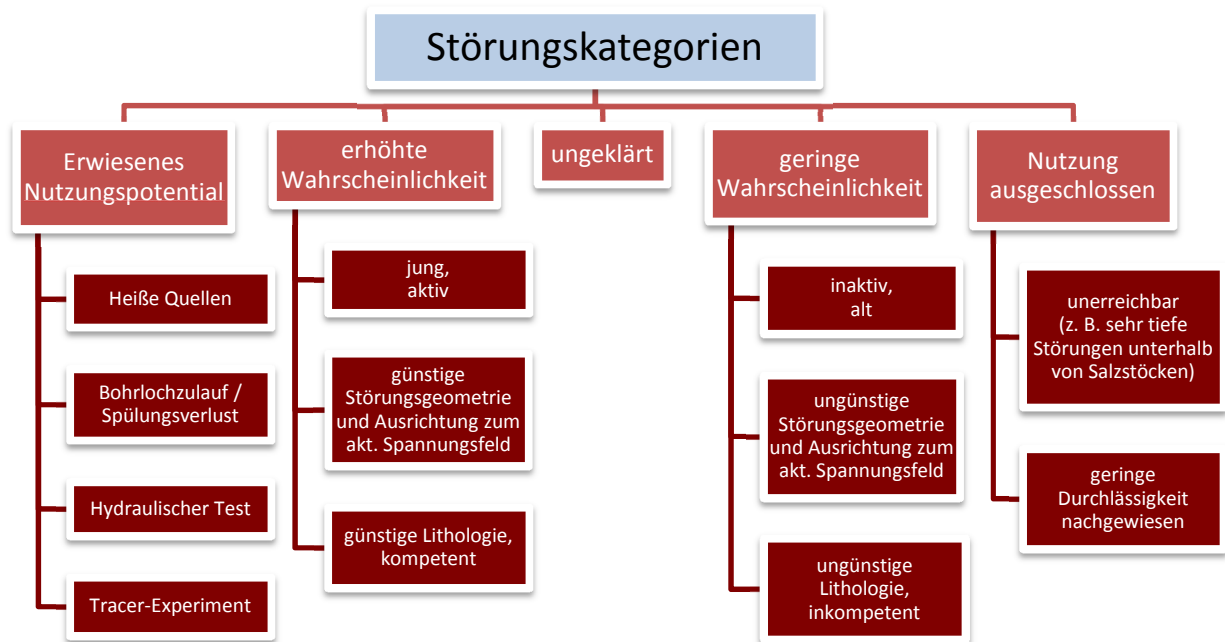


Abb. 3.15: Fünf-Klasseneinteilung von tiefreichenden Störungen hinsichtlich ihrer hydraulischen Leitfähigkeit.

Im ungünstigsten Fall (Abb. 3.15 rechts außen) ist eine geothermische Nutzung ausgeschlossen, beispielsweise, weil das Bruchsystem unterhalb einer Salzstruktur in unerreichbarer Tiefe liegt oder die geringe Permeabilität bereits nachgewiesen wurde. Häufig wird eine Zuordnung zu einem dieser beiden Fälle nicht möglich sein. Dann stützt sich eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit eines geothermischen Potentials auf verschiedene Anhaltspunkte, die zu einem eher positiven oder eher negativen Resultat führen. In vielen Fällen kann aufgrund unzureichender oder gegensätzlicher Anhaltspunkte überhaupt keine Aussage getroffen werden. Hier ist die Situation ungeklärt bis weitere Anhaltspunkte vorliegen.

Um eine Einschätzung bezüglich des geothermischen Potentials einer Störung vorzunehmen, wenn noch keine gesicherten Erkenntnisse über die Transmissibilität vorliegen, empfiehlt sich ein Indikatorenkatalog (Tab. 3.1) auf der Grundlage struktureologischer und lithologischer Merkmale.

3.4.6 Orientierung der Störung zum Spannungsfeld

Je nach Region und aktuellem Spannungsfeld können bestimmte Streichrichtungen die Wahrscheinlichkeit für vorhandene Fließwege parallel zum Störungsverlauf erhöhen. Von großer Bedeutung ist dabei die Gebirgsfestigkeit, die unter anderem von der

Gesteinszusammensetzung, vom Trennflächengefüge und Porenwasserdruck abhängt. Ein kritischer Spannungszustand nah am Versagenskriterium von Mohr-Coulomb (hohes Reaktivierungspotential) kann für die hydraulische Leitfähigkeit besonders günstig sein. Aus Studien ist belegt, dass gerade die kritisch gespannten Trennflächen besonders gute Zuflusswege für Thermalwasser ausmachen (BARTON et al., 1995). Dies sind vor allem Klüfte, die in einem Winkel von 30° bis 45° zur größten Hauptspannung orientiert sind und im Bereich aktiver Störungen nicht verheilen, da sie bei jeder Scherbewegung wieder aufreißen können. So werden in der Kohlenwasserstoffexploration kritisch gespannte Trennflächen als günstige Erschließungsziele genannt. In der Geothermie kann eine kritisch gespannte Trennfläche auch ein Ausschlusskriterium sein, sofern die Injektionsbohrung in solch eine Fläche geplant wird. Hier kann aber die seismische Gefährdung für die obertägige Infrastruktur möglicherweise zu hoch sein. Daher ist bereits im Vorfeld seismisches Monitoring und eine geomechanische Untersuchung zur Gefahrenabschätzung ratsam. Im Rahmen des Projektes „StörTief“ wurden an ausgewählten Standorten im Oberrheingraben und Molassebecken derartige Untersuchungen durchgeführt.

Allgemein werden bei dehnenden Störungen, die in Richtung der größten horizontalen Hauptspannung orientiert sind, sehr große Kluftöffnungsweiten und damit hohe Transmissibilitäten erwartet (siehe Abb. 3.16). Mit der Tiefe nehmen jedoch die Öffnungsweite ab und ab einer Tiefe von 2 km bieten sich keine dilativen Strukturen aufgrund zu hoher Normalspannungen an, so dass eine erhöhte hydraulische Leitfähigkeit entlang der größten Hauptspannung nicht mehr zu erwarten ist (FERRILL & MORRIS, 2003a, 2003b, 2007).

Typisches Spannungsfeld

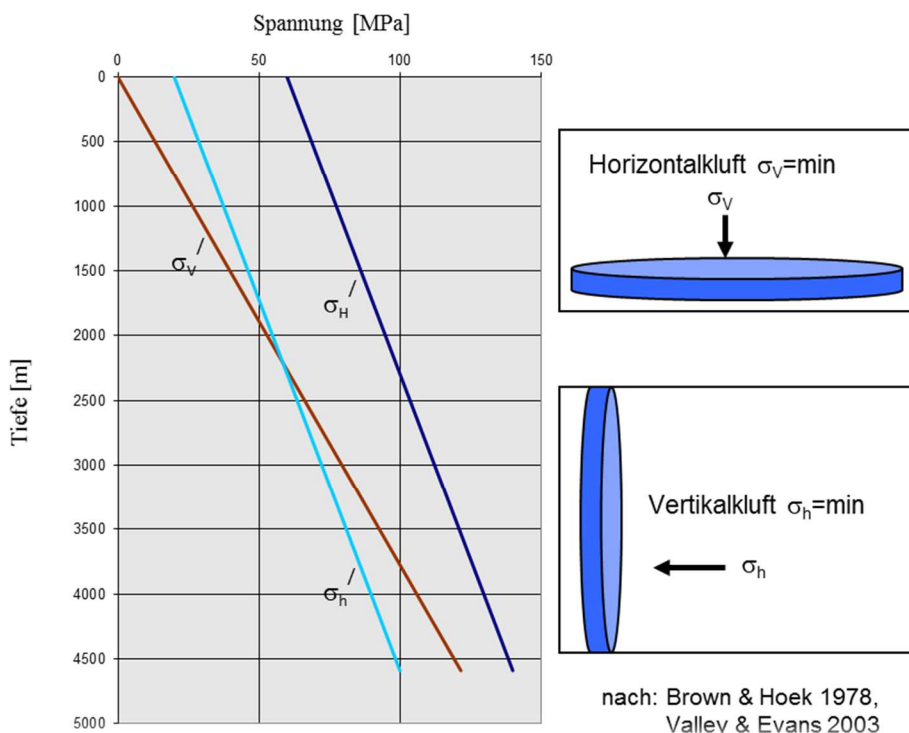


Abb. 3.16: Änderung der Klufforientierung als Folge des Spannungsfeldes (STOBER & BUCHER 2014)

Ab etwa 2 km Tiefe sind die Blattverschiebungen wegen ihrer erhöhten Scherspannung für die hydraulische Leitfähigkeit wichtig. Eine Blattverschiebung mit einer Bruchebene, die in einem charakteristischen Winkel von 30° bis 45° zur Hauptspannungsrichtung verläuft, lässt bei einem hohen Verhältnis von Scherspannung zu Normalspannung erhöhte hydraulische Durchlässigkeiten vermuten (BARTON et al. 1995). In Deutschland wurde im Auftrag des Deutschen Bundestages vor etwa 15 Jahren eine erste Studie zur Abschätzung des geothermischen Potentials von Störungen erstellt (JUNG et al. 2002). Diese Studie unterteilt tiefreichende Störungzonen nach ihren Streichrichtungen in drei Kategorien: NNE-SSW, NW-SE und W-E. Unterschiede im geothermischen Potential dieser drei Störungskategorien wurden aufgrund ihrer Orientierung zum N-S-gerichteten Hauptspannungsfeld von JUNG et al. (2002) vermutet, aber aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt. Angesichts der regional sehr unterschiedlichen geologischen Entwicklung und der lokalen Einflüsse auf das Spannungsfeld wäre eine derart pauschale Herangehensweise auch nicht zielführend. So können zum Beispiel im Bereich des Oberrheingrabens und des Süddeutschen Molassebeckens auch W-E gerichtete Störungen Erschließungsziele darstellen.

Die regionale Ausrichtung der heutigen größten horizontalen Hauptspannung kann der World-Stress-Map (HEIDBACH et al. 2008) entnommen werden. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die lokale Hauptspannung von der Darstellung in der World-Stress-Map abweichen kann (z. B. im Umfeld von Salzstrukturen und Störungen) und darüber hinaus auch tiefenabhängigen Veränderungen unterliegt, wie sie beispielsweise auch in den Tiefbohrungen von Soultz-sous-Forêts beobachtet wurden (VALEY & EVANS 2003). In größeren Tiefen verschlechtert sich die oft ohnehin unzureichende Datenlage zunehmend (z. B. Norddeutsches Becken). Genauere Informationen über die Richtungen der lokalen Hauptspannungen liefern auch die Auswertung von Bohrlochrandausbrüchen in Tiefbohrungen und die Kartierung vertikaler Zugrisse in Bohrungen.

3.4.7 Seismische Aktivität

Tiefenstörungen, die seismisch aktiv und nicht durch sekundäre Mineralausfällungen verheilt sind, können durchlässig für Fluide sein. Allerdings könnte die Injektion von Wasser in die Störung und damit die Erhöhung des Porendrucks das Verhältnis von Scher- zu Normalspannung so erhöhen, dass die Festigkeit des Gebirges überschritten wird und Scherung erfolgt. Bei einer Scherung und damit verbundenen Störungsreaktivierung wird Scherungsenergie frei, die sich in seismischen Ereignissen entlädt und bei genügender Intensität als Erdbeben an der Oberfläche verspürt werden kann.

An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass nicht nur bei Injektion von Fluiden sondern auch bei deren Förderung seismische Ereignisse auftreten können. Die allgemeine Erdbebenwahrscheinlichkeit für einen Ort kann nach der probabalistischen Methode von SÄGESSER & MAYER-ROSA (1978) auf der Grundlage historischer Erdbeben- daten berechnet werden. Generell erfolgen Spannungsumlagerungen durch Injektion in gering permeables Gestein nahezu ausschließlich an Trennflächen, während in

durchlässigem Gebirge mit hoher Porosität die Spannungsumlagerung in der weitverzweigten Matrix stattfindet. Das Störungsreaktivierungspotential gerade durch Injektion ist in gering permeablen Gesteinen höher als in hochpermeablen Gesteinen.

3.4.8 Störungsgeometrie

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

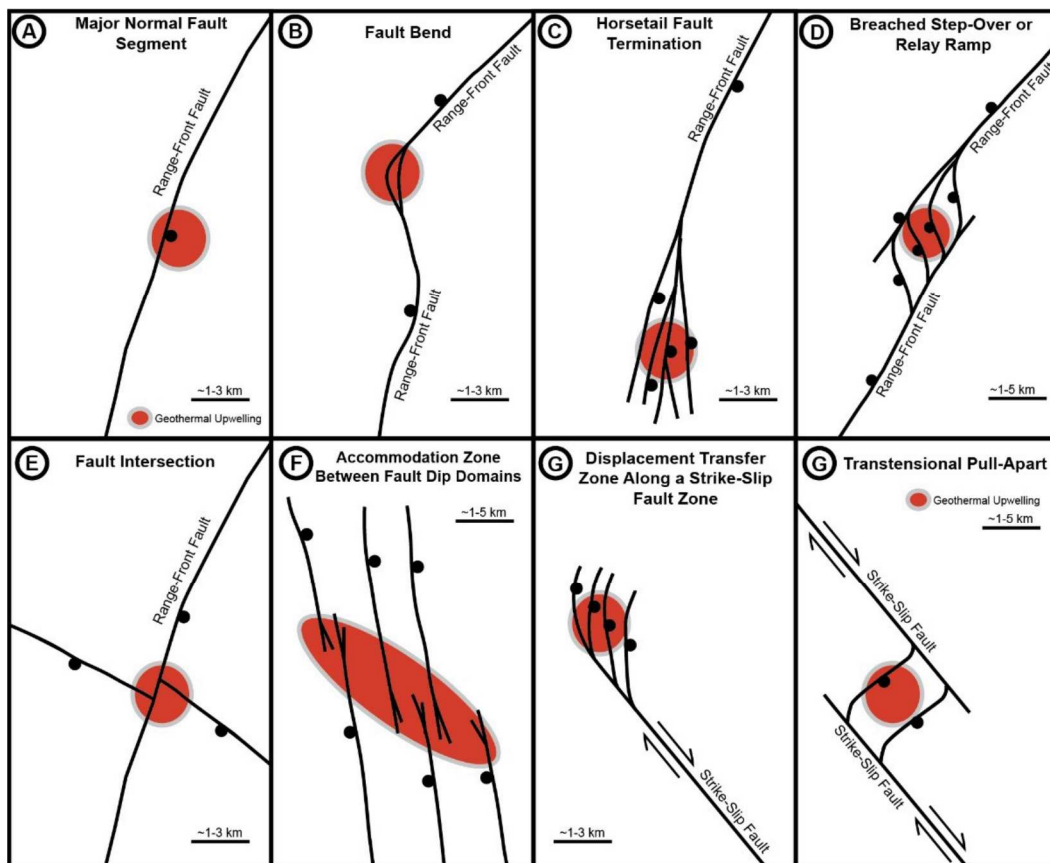


Abb. 3.17: Typische Störungsmuster bekannter hydrothermaler Systeme im Gebiet des Großen Beckens im Westen der USA (FAULDS & HINZ 2015). Ähnliche Muster können regional auch in Deutschland erwartet werden.

In einer Studie von FAULDS & HINZ (2015) wurden im Gebiet des Großen Beckens im Westen der USA typische Störungsmuster bekannter hydrothermaler System untersucht und in acht Kategorien unterteilt (Abb. 3.17). Unter den knapp 250 untersuchten Systemen zeigte sich, dass Relay-Rampen am häufigsten eine höhere Bruchdichte und damit eine erhöhte Permeabilität aufweisen (Abb. 3.18). Ein erhöhtes geothermi-

ches Potential wurde darüber hinaus auch häufig am Ende von Abschiebungen (insbesondere fächerförmige Horse-Tail-Strukturen) festgestellt. Bei beiden Störungsmustern verursacht die konzentrierte Spannung an den Störungsenden eine Rissausbreitung in das ungestörte Gestein. Gleiches wurde beobachtet, wenn sich zwei Abschiebungen oder eine Abschiebung und eine Diagonalverwerfung sich kreuzen.

Zu bemerken ist, dass die Studie von FAULDS & HINZ (2015) sich ausschließlich auf das Basin-and-Range-Gebiet bezieht, in dem die höchsten Dehnungsraten der Erdkruste weltweit auftreten. Eine Studie über den Zusammenhang zwischen Störungsgeometrien und hydrothermalen Quellen von CUREWITH & KARSON (1997) kommt nach der Untersuchung geotektonisch sehr unterschiedlicher Regionen zu ähnlichen Ergebnissen: Von 822 untersuchten hydrothermalen Quellen sind 78 % an Störungen gebunden. Dabei sind Störungsenden, Relay-Rampen, Pull-Aparts und Step-Over-Strukturen am häufigsten hydrothermal aktiv. Ähnliche Strukturen sind auch in Deutschland vorzufinden und eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse sollte untersucht werden. Die Relation zum rezenten Spannungsfeld und die kinematische Entwicklung der Störung sind weitere Faktoren, die die Klufnetzichte erhöhen können.

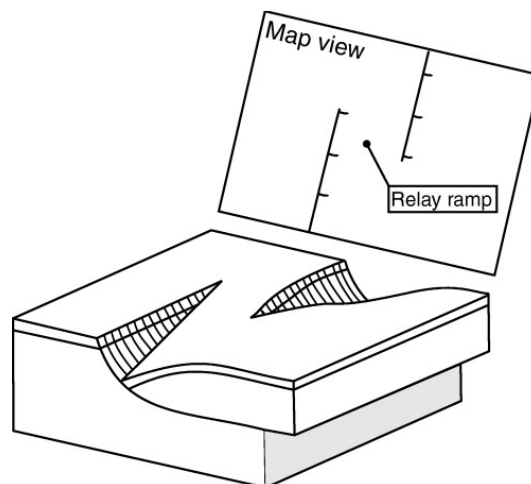


Abb. 3.18: Darstellung einer Relay Rampe am Beispiel einer listrischen Abschiebung als Blockbild (nach LARSEN 1988).

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

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

3.4.9 Einfluss von Fluid- und Gesteinseigenschaften auf die Durchlässigkeit von Störungen

Der Mineralbestand und die Korngrößenverteilung sowie Verfestigungsgrad haben einen großen Einfluss auf das Bruchverhalten im Bereich von Störungen. In klastischen Sedimenten kann ein hoher Anteil von feinkörnigen und insbesondere tonigen Lagen die Durchlässigkeit von Störungen reduzieren. Bei der Erkundung von Öl- und Gas-Reservoirien wird häufig das sogenannte „Shale Gouge Ratio“ (SGR) verwendet, um einzuschätzen, ob ein Fluid eine Störungsfläche quer zur Streichrichtung passieren kann (YIELDING et al. 1997). Der SGR stellt das Verhältnis aus Tonsteinanteil zu Versatzlänge entlang einer Störungsfläche dar und kann damit als ein weiterer Indikator für die hydraulischen Eigenschaften von Störungen verwendet werden:

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

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

Auch bei Karbonaten gibt es je nach Zusammensetzung und Korngefüge Unterschiede im Bruchverhalten. In der Regel ist Dolomit spröder als Kalkstein, aber auch der Zeitpunkt der Dolomitisierung ist wichtig. Da Dolomit ein geringeres Volumen als Kalziumkarbonat besitzt, können bei der Dolomitisierung Klufträume entstehen, welche sich günstig auf das hydraulische Verhalten der Zerrüttungszone auswirken. Voraussetzung für eine Dolomitisierung ist die Anwesenheit von Magnesium, das mit dem Fluid in eine Gesteinsformation eingetragen wird. Diese Fluidwegsamkeiten entstehen häufig entlang von Störungen und Kluftzonen, so dass sich eine erhöhte Dolomitisierung besonders entlang einer Störung bemerkbar macht. Bei Karbonaten kann außerdem der Fossilienanteil auf die Fazies hinweisen: Riffstrukturen und Riffschutt besteht aus Korallen- und Schwammresten, die bereits eine initial hohe Porosität verursachen und daher beste Speichergesteine darstellen. Zudem kann durch Verkarstung die Durchlässigkeit von Karbonaten in bestimmten Faziesräumen oder entlang von Störungszonen und darin von Kern- und Zerrüttungszonen stark erhöht sein. Einen Überblick über die Rolle der Lithologie auf die Durchlässigkeit von Störungen gibt Abb. 3.19.

Fluidzirkulation kann ebenfalls dazu führen, dass Klufthohlräume durch Mineralausfällungen verfüllt und damit abgedichtet werden. Sie kann aber auch bewirken, dass Fluidwegsamkeiten durch Mineralauflösung geweitet werden. Die Richtung der Wasser-Gesteinswechselwirkungen hängt sehr von der Gesteins- und Fluidzusammensetzung und den Druck- und Temperaturbedingungen ab. Entlang aktiver Störungen können Gesteinskörper mit verheilten Brüchen jedoch erneut brechen, wodurch wieder neue Fluidwegsamkeiten entstehen, bzw. es nie zu einer vollständigen Verheilung von offenen Klufzonen kommt, weil diese ständig in Bewegung gehalten werden. Dieser Prozess kann sich zyklisch wiederholen (crack-seal cycle), wodurch sogenannte Riss-Brekzien entstehen können (RAMSAY 1980).

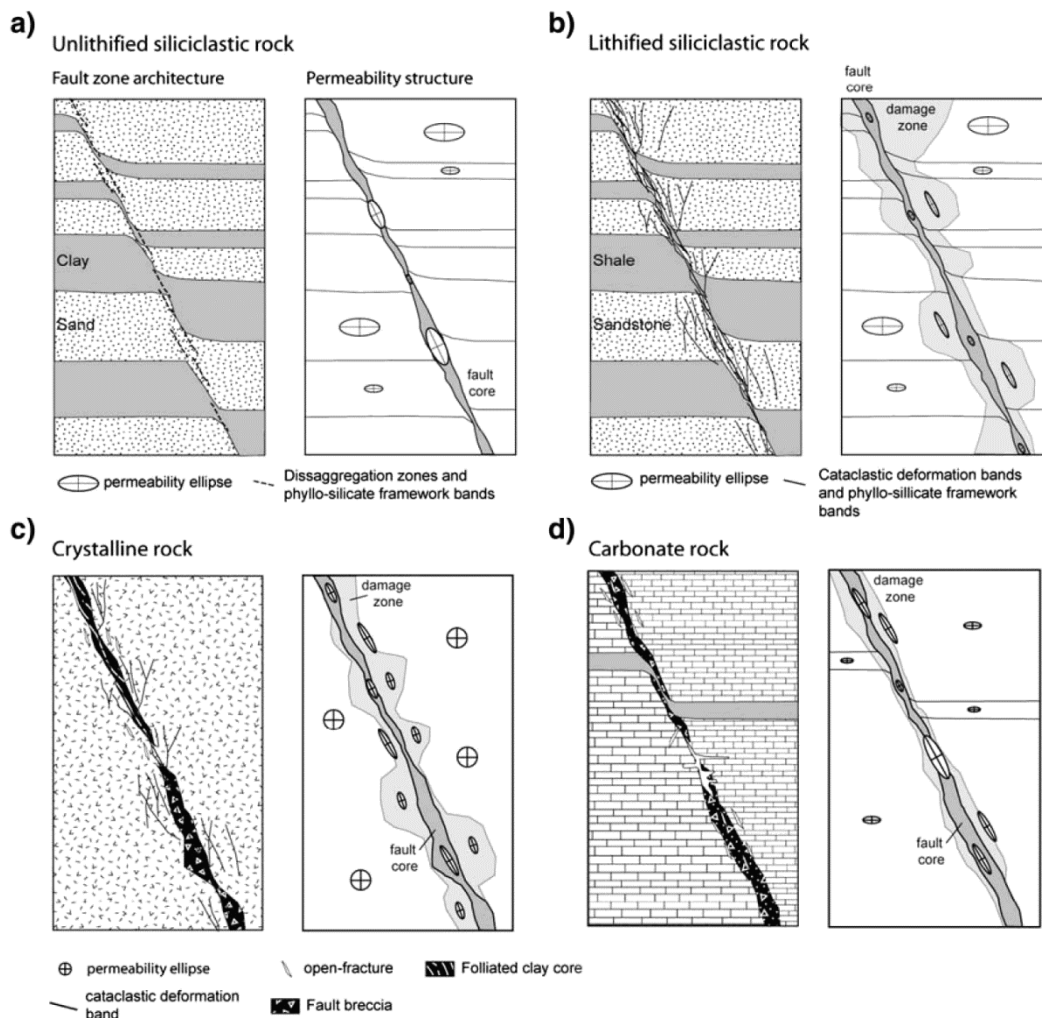


Abb. 3.19: Einfluss der Lithologie auf die hydraulische Durchlässigkeit von Störungen: a) unverfestigte Siliziklastika b) verfestigte Siliziklastika c) Kristallin d) Karbonatgestein (BENSE et al. 2013).

3.4.10 Thermische Anomalien

Aufsteigende Tiefenwässer sind in der Regel heißer als das umgebende Gestein und transportieren daher auch Wärme in höher gelegene Untergrundbereiche. Auf diese Weise entstehen positive Temperaturanomalien. Negative Temperaturanomalien können entstehen, wenn bei der Grundwasserneubildung große Mengen meteorischer Wässer lokal in tiefe Untergrundbereiche eindringen. Treibende Kraft ist in der Regel

ein hydraulischer Gradient. Freie Konvektion von Tiefenwässern ist in Deutschland vernachlässigbar.

Für den baden-württembergischen Teil des Süddeutschen Molassebeckens wurde in einer Studie von RÜHAAK et al. (2010) ein rein konduktives, numerisches Temperaturmodell mit gemessenen Temperaturen verglichen. Dabei zeigte sich, dass Gebiete mit Temperaturen deutlich oberhalb der berechneten Werte häufig räumlich mit Störungszonen korrelieren. Dieses Phänomen kann durch gekoppelten Fluid- und Wärmetransport entlang von Störungszonen erklärt werden. Eine ähnliche Studie von CHERUBINI (2014) über Temperaturanomalien in Brandenburg (Norddeutsches Becken) ist zu ähnlichen Ergebnissen gekommen. Allerdings ist der Nachweis, dass eine Temperaturanomalie durch eine permeable Störung in Sedimentgestein verursacht wird, immer schwierig, da auch eine heterogene Verteilung der Wärmeleitfähigkeit im Untergrund die Ursache sein kann. Erst bei sehr hohen Temperaturgradienten von ≥ 60 K/km ist davon auszugehen, dass Tiefenwässer entsprechend ihrem hydraulischen Potential an steilstehenden, gut durchlässigen Schichten oder Störungen aufsteigen. Dieser Wert basiert auf der durchschnittlichen Wärmestromdichte von 60-70 mW/m² in Deutschland und der Annahme, dass die Wärmeleitfähigkeit nur selten Werte < 1 W/(m K) erreicht.

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

3.4.11 Chemische Anomalien

Natürliche Gasaustritte an der Erdoberfläche (z. B. das im Laacher See aufsteigende Kohlenstoffdioxid) oder gemessene Gasanomalien im Untergrund (z. B. Helium, Kohlendioxid oder Radon), können auf Störungszonen hinweisen und ein Indiz für hydraulisch leitfähige Strukturen sein, die von der Oberfläche bis in mehrere Kilometer Tiefe hinab reichen können. Mit neuen Messmethoden, wie sie von JOLIE et al. (2016) vorgestellt und in Nevada (USA) getestet wurden, könnten vermutlich auch in Deutschland neue Erkenntnisse über Störungen gewonnen werden. Allerdings gilt es zu beachten, dass der Aufstieg von Spurengasen wie Kohlenstoffdioxid auch unabhängig von Störungen stattfinden kann. Eine Aufzeichnung des Gasflusses und eine Gegenüberstellung dieses Gasflusses mit dem Störungsmuster würde aber möglicher Weise Strukturen wiedergeben, an denen in der Tiefe Thermalwässer zirkulieren und dabei entgasen. Hydraulisch leitfähige Strukturen wären damit möglicher Weise diagnostizierbar. Aus dem Oberrheingraben sind mehrere Bereiche bekannt, an denen Gase wie Helium oder CO₂ austreten. Ein Teil dieser Gase ist sehr wahrscheinlich über tiefreichende Störungszonen aufgestiegen, da GRIESSHABER et al. (1992) anhand der Isotopenzusammensetzung eine Mantelkomponente in diesen Gasen nachweisen konnten. Eine erhöhte elektrische Leitfähigkeit, die sich durch einen höheren Salzgehalt ergibt, kann sowohl ursächlich mit dem Aufstieg von Tiefenwässern an Störungszonen (z. B. in Ohlsbach, Stober et al. 1999), als auch z. B. mit Ablaugungsvorgängen an Salzstrukturen verknüpft sein.

3.4.12 Vorgehen

Um deutschlandweit eine Klassifizierung der tieferreichenden Störungen vorzunehmen, sollte ein Bewertungssystem entwickelt werden. In Tab. 3.1 ist ein Indikatorenkatalog aufgeführt, den es zu erproben und weiter zu entwickeln gilt.

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

Tab. 3.1: Indikatorenkatalog für die Durchlässigkeit von Störungen. Bedeutende Indikatoren sind gelb unterlegt.

Indikation	untersuchungswürdig	neutral	eher ungeeignet
Ausrichtung zur heutigen max. Hauptspannung (σ_1)	$\pm 20^\circ$ - 40° (konjugiert), Parallel zu σ_1 und senkrecht zu σ_3	$< 20^\circ$ oder $> 40^\circ$ (konjugiert)	$\geq 70^\circ$ (konjugiert)
Störungsgeometrie	vernetzte Störungen: Relay-Rampe Horse-Tail / Störungsende Transtensionszone kreuzende Abschiebungen	singuläre Abschiebung Aufschiebung Überschiebung	Staffelbruch
Diagenese	Verkarstung, Lösung	tiefenabhängige Kompaktion	Zementation d. Mineralausfällung, Salzintrusion
Thermische Anomalien	$\Delta T/\Delta z \geq 60$ K/km entlang tieferreichender Störungen	$\Delta T/\Delta z$ 25-60 K/km entlang tieferreichender Störungen	$\Delta T/\Delta z < 25$ K/km entlang tieferreichender Störungen
Gestein primär	Trümmergestein (Brekzie) Spröde, fest, Klüfte (Zerrüttungszone)	Feinkörnige Brekzie, Klüfte und Haarrisse	Kataklastit, (Kernzone) Haarrisse SGR $> 0,15$ f. klast. Sed.
Deformationsverhalten des Ausgangsgesteins	kompetent	inkompetent/kompetent	inkompetent
Alter	jung rezente (Re-)Aktivierung		alt
Geochemie	He und CO ₂ magmatischen Ursprungs, Radongehalte, hohe Salzkonzentration in Grundwasser		

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

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

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

3.5 Literatur

- BARTON, C. A., ZOBACK, M. D. & MOOS, D. (1995): Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. *Geology* [Boulder] 23(8): 683-686.
- BENSE, V. F., GLEESON, T., LOVELESS, S. E., BOUR, O. & SCIBEK, J. (2013): Fault zone hydrogeology. *Earth Science Reviews*. 127, 171-192.
- BERTLEFF, B., JOACHIM, H., KOZIOROWSKI, G., LEIBER, J., OHMERT, W., PRESTEL, R., STOBER, I., STRAYLE, G., VILLINGER & E., WERNER, J. (1988): Ergebnisse der Hydrogeothermalbohrungen in Baden – Württemberg. *Jahresheft des Geologischen Landesamtes Baden – Württemberg*, 30, S. 27 – 116; Freiburg.
- BROWN, E.T. & HOEK, E. (1978): Trends in relationships between measured rock in situ stresses and depth. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 15, 211-215.
- BRILL, R. (1933): Die Tektonik an der Hauptrheintalverwerfung am Lorettoberg bei Freiburg i. Br.. *Geol. Rundschau*, 23a, 31-58.
- BRÜCKNER-RÖHLING, S., ESPIG, M., FISCHER, M., FLEIG, S., FORSBACH, H., KOCKEL, F., KRULL, P., STIEWE, H. & WIRTH, H. (2002): Projekt Gorleben, Standsicherheitsnachweise Nachbetriebsphase: Seismische Gefährdung. - Teil 1: Strukturgeologie. – Archiv-Nr. 0128111, 183 S., 39 Abb., 9 Tab., 70 Anl.; Hannover.
- BSTWIVT – BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, INFRASTRUKTUR, VERKEHR UND TECHNOLOGIE (Hrsg.) (2010): Bayerischer Geothermieatlas – Hydrothermale Energiegewinnung. – 93 S.; München.
- CAINE, J. S., EVANS, J. P. & FORSTER, C. B. (1996): Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, v. 18, 1025-1028.
- CHERUBINI, Y., CARACE, M., SCHECK-WENDEROTH, M. & NOACK, V. (2014): Influence of major fault zones on 3-D coupled fluid and heat transport for the Brandenburg region (NE German Basin). *Geoth. Energ. Sci.*, 2, 1–20.
- CHOI, J. H., EDWARDS, P., KO, K. & KIM, Y. S. (2016): Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach. *Earth Science Reviews*: 152; 70-87.
- CUREWITZ, D. & KARSON, J.A. (1997): Structural settings of hydrothermal outflow: fracture permeability maintained by fault propagation and interaction: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 79, 149-168.
- FASCHING, F. & VANEK, R. (2011): Engineering geological characterisation of fault rocks and fault zones. *Geomechanics and Tunnelling* 4 (3), 181-194.

- FAULDS, J. E. & HINZ, N. (2015): Favorable Tectonic and Structural Settings of Geothermal Systems in the Great Basin. Proceedings World Geothermal Congress 2015, 19-25 April 2015, Melbourne, Australia.
- FERRILL, D.A. & MORRIS, A. P. (2003A): Dilational normal faults. *Journal of Structural Geology* 25, 183-196.
- FERRILL, D.A. & MORRIS, A. P. (2003B): Erratum to: "Dilational normal faults." [*Journal of Structural Geology* 25 (2003), 183-196], *Journal of Structural Geology* 25, 827.
- FERRILL, D.A. & MORRIS, A. P. (2007): Second erratum to "Dilational normal faults." [*Journal of Structural Geology* 25 (2003), 183-196], *Journal of Structural Geology* 29, 1419-1420.
- FOSSEN, H., SCHULTZ, R. A., SHIPTON, Z. K. & MAIR, K. (2007): Deformation bands in sandstones: a review. *Journal of the Geological Society, London*. 164. 755-769.
- GANZ, B. & THOMAS, R. (2016): Verbundprojekt GEOFÜND – Charakterisierung und Weiterentwicklung integrativer Untersuchungsmethoden zur Quantifizierung des Fündigkeitsrisikos. Teilprojekt B: Optimierung der Methode auf Grundlage von geowissenschaftlichen Daten und Informationen – Endbericht, LIAG-Bericht, Archiv-Nr. 133433, 82 S.; Hannover.
- GRIESSHABER, E., O'NIONS, R. K. & OXBURGH, E. R. (1992): Helium and carbon isotope systematics in crustal fluids from the Eifel, the Rhine Graben and Black Forest, *F. R. G. Chem. Geol.* 99: 213-235.
- HEIDBACH, O., TINGAY, M., BARTH, A., REINECKER, J., KURFEB, D. & MÜLLER, B. (2008): The World Stress Map database release 2008. doi:10.1594/GFZ.WSM.Rel2008.
- HAENEL, R. & STAROSTE, E. (Eds.) (1988): Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland. – Publ. No. EUR 17811 of the European Commission, Office of Official Publications of the European Communities, 74 pp.; Hannover.
- JOLIE, E., KLINKMUELLER, M., MOECK, I. & BRUHN, D. (2016): Linking gas fluxes at Earth's surface with fracture zones in an active geothermal field. *Geology* 44(3):187.
- JUNG, R., RÖHLING, S., OCHMANN, N., ROGGE, S., SCHELLSCHMIDT, R., SCHULZ, R. & THIELEMANN, T. (2002): Abschätzung des technischen Potenzials der geothermischen Stromerzeugung und der geothermischen Kraft-Wärmekopplung (KWK) in Deutschland. – Bericht für das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag; BGR/GGA, Archiv-Nr. 122 458; Hannover.
- KOLYUKHIN, D. & TORABI, A. (2012): Statistical analysis of the relationships between faults attributes, *J. Geophys. Res.*, 117, B05406, doi: 10.1029/2011JB008880
- LARSEN, P.-H. (1988): Relay structures in a Lower Permian basement-involved extension system, East Greenland. *Journal of Structural Geology*. 10(1). 3-8.
- LEE, C.H. & FARMER, I. (1993): Fluid Flow in Discontinuous Rocks. Chapman and Hall, London.
- LEIBNIZ-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOPHYSIK, Geothermisches Informationssystem für Deutschland, www.geotis.de (2016).

- MOECK, I., MRAZ, E., LOSKE, B., JENTSCH, A., UHLIG, S. & HILD, S. (2015): Analysis of multiphase fossil normal faults for geothermal exploration in the Bavarian Molasse Basin. submitted: Journal of Earth Sciences.
- NEßLER, E., FRÖHLER, M. & LEBEDE, S. (1993): Die Rheingrabenverwerfung im Waukopf-Tunnel bei Ettlingen (Nordschwarzwald). Geol. Rundschau, 82, 765-768.
- PHILIPP, S. L., REYER, D., MEIER, S. & HEMES, S. (2008): Prognose von Bruchsystemen und Permeabilität im Muschelkalk des Oberrheingrabens: Ergebnisse von Geländestudien und numerischen Modellierungen. Der Geothermiekongress 2008, Proceeding, 90-96.
- PRINZ, H., REUL, K. & SCHOLZ, N. (1981): Neue Wege zur Erkundung tektonischer Strukturen im Tunnelbau. Rock Mechanics, Suppl. 11, 9-32.
- RAMSAY, J. (1980): The crack-seal mechanism of rock deformation. Nature 284, 135-139.
- REYER, D., BAUER, J. F. & PHILIPP, S. L. (2012): Fracture systems in normal fault zones crosscutting sedimentary rocks, Northwest German Basin. Journal of Structural Geology, 45, 38-51.
- RÖLLIG, G., VIEHWEG, M. & MUSSTOW, R. (1990): Geologische Karte der Deutschen Demokratischen Republik, geologische Karte ohne känozoische Sedimente 1 : 500 000. – Zentrales Geologisches Institut (ZGI); Berlin.
- RÖLLIG, G., VIEHWEG, M. & MUSSTOW, R. (1990): Geologische Karte der DDR, Geologische Karte 1:500.000 ohne känozoische Sedimente. - Berlin (Zentrales Geologisches Institut).
- ROTEVATN, A., TVERANGER, J., HOWELL, J. A. & FOSSEN, H. (2009): Dynamic investigation of the effect of a relay ramp on simulated fluid flow: geocellular modelling of the Delicate Arch Ramp, Utah. Petroleum Geoscience, Vol. 15, 45–58.
- RÜHAAK, W., RATH, V. & CLAUSER, C. (2010): Detecting thermal anomalies within the Molasse Basin, southern Germany. – Hydrogeology Journal, 18,8: 1897-1915.
- SCHULZ, R., SUCHI, E., ÖHLSCHLÄGER, D., DITTMANN, J., KNOPF, S. & MÜLLER, C. (2013): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. Bericht, LIAG: 107 S.; Hannover.
- SÄGESSER, R. & MAYER-ROSA, D. (1978): Erdbebengefährdung in der Schweiz. Schweizerische Bauzeitung. 96 (7), 107-122.
- SCHUCK, A., VORMBAUM, M., GRATZL, S. & STOBER, I. (2012): Seismische Modellierung zur Detektierbarkeit von Störungen im Kristallin.- Erdöl Erdgas Kohle, 128, Jg. 2012, Heft 1, S. 14-20, Urban Verlag, Hamburg/Wien.
- SÖLLIG, A. & RÖLLIG, G. (1990): Geologische Karte der Deutschen Demokratischen Republik, Tektonische Karte 1 : 500 000. – Zentrales Geologisches Institut; Berlin (unveröff.).
- STOBER, I. (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges.- Ferdinand Enke Verlag, 81 Abb., 16 Tab., 191 S., Stuttgart.
- STOBER, I., RICHTER, A., BROST, E. & BUCHER, K. (1999): The Ohlsbach Plume: Natural release of Deep Saline Water from the Crystalline Basement of the Black Forest.- Hydrogeology Journal, Vol. 7 (3), pp. 273-283, Springer, Berlin/Heidelberg.

- STOBER, I. & BUCHER, K. (2014): Hydraulic and hydrochemical properties of deep sedimentary aquifers of the Upper Rhine Graben, Europe.- Geofluids (doi: 10.1111/gfl.12122).
- TORABI, A. & BERG, S. S. (2011): Scaling of fault attributes: A review. Marine and Petroleum Geology, Volume 28, Issue 8, 1444-1460.
- VALLEY, B. & EVANS, K. (2003): Strength and elastic properties of the Soultz granite. In: Zürich E (ed) Synthetic 2nd year report, Zürich, Switzerland, 2003. ETH, Zürich, p. 6.
- YIELDING, G., FREEMAN, B. & NEEDHAM, D. T. (1997): Quantitative Fault Seal Prediction. AAPG Bulletin, V. 81, No. 6 (June 1997), 897–917.
- ZITZMANN, A. (1981): Tektonische Karte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 1 000 000. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover (unveröff.).

Danksagung:

Wir bedanken uns bei der ExxonMobil Production Deutschland GmbH, der Wintershall Holding GmbH, der DEA Deutsche Erdoel AG, der EWE Aktiengesellschaft, der ENGIE Deutschland GmbH und dem Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG, ehemals WEG) für die Bereitstellung der Daten zu Forschungszwecken.

4 Erfassen von Störungssystemen

4.1 Weiterentwicklung der geothermischen 3D-Strukturmodelle des Norddeutschen Beckens unter besonderer Berücksichtigung von Störungen

4.1.1 3D-Modellierung tiefreichender Störzonen

Aus der Abbildung von Störungen (Abb. 3.1), die lediglich die Störungsspuren auf der Oberfläche abbildet, ergaben sich folgende Fragen: wie weit reichen die Störungen in die Tiefe, welches Einfallen besitzen sie und wie sehen die Strukturen im Detail aus (d. h. Vernetzungsgrad, Staffelung von Störungen etc.). Darüber hinaus sollte festgestellt werden, wie die Störungen zum rezenten Stressfeld orientiert sind und welche Konsequenzen sich hieraus für eine etwaige geothermische Nutzung ergeben.

Die Klärung dieser Fragen sollte anhand von seismischen Messungen erfolgen, so dass exemplarisch ein Gebiet ausgewählt wurde, für das 2D/3D-Seismik Daten verfügbar sind. Des Weiteren bestand die Notwendigkeit, dass in diesem Gebiet Bohrungen mit Geofonversenkungsmessungen (GVM) in ausreichender Zahl und Tiefe vorhanden sind, um eine Schichtzuordnung zu ermöglichen (GEOFONVERSENKMESSUNGEN 2016).

Um das strukturelle Inventar möglichst einfach zu halten, sollten in dem Modellgebiet außer einer Störungsspur aus dem generalisierten Shape weitere markante Strukturelemente wie z. B. Salzstrukturen (REINHOLD et al. 2008) möglichst nicht vorhanden sein. Für einen ersten Überblick wurden Informationen zum Schichtaufbau, Dehnungsstrukturen oder Strukturelementen aus dem „Geotektonischem Atlas“ (GTA) (BALDSCHUHN et al. 2001) und dem „Geotektonischen Atlas als geologisches 3D-Modell“, kurz GTA-3D (BOMBIEN et al. 2012) entnommen. Informationen über die Gebirgsspannung stammen aus der World Stress Map (HEIDBACH et al. 2008).

Bei Realisierung einer geothermischen Nutzung müssten darüber hinaus noch die Faktoren „geothermischer Gradient“ und „Wärmeabnehmer über Tage“ Berücksichtigung finden. Diese Bedingungen waren für die Auswahl des Modellgebiets zunächst jedoch zweitrangig, da es sich vorerst um eine reine Modellbetrachtung handelt.

Nach dem Zusammentragen und der Darstellung der verschiedenen Datensätze in einer GIS-Karte wurde das Störungssystem von Hemmelte als ein geeignetes Modellgebiet ausgewählt. Der in diesem Gebiet vorhandene 3D-Survey Oldenburg-Süd / Ridderade wird hier von zwei generalisierten Störungsspuren des Störungssystems in westnordwest-ostsüdöstlicher Richtung durchquert, und auch die anderen Vorbedingungen sind für dieses Gebiet erfüllt (Abb. 4.1).

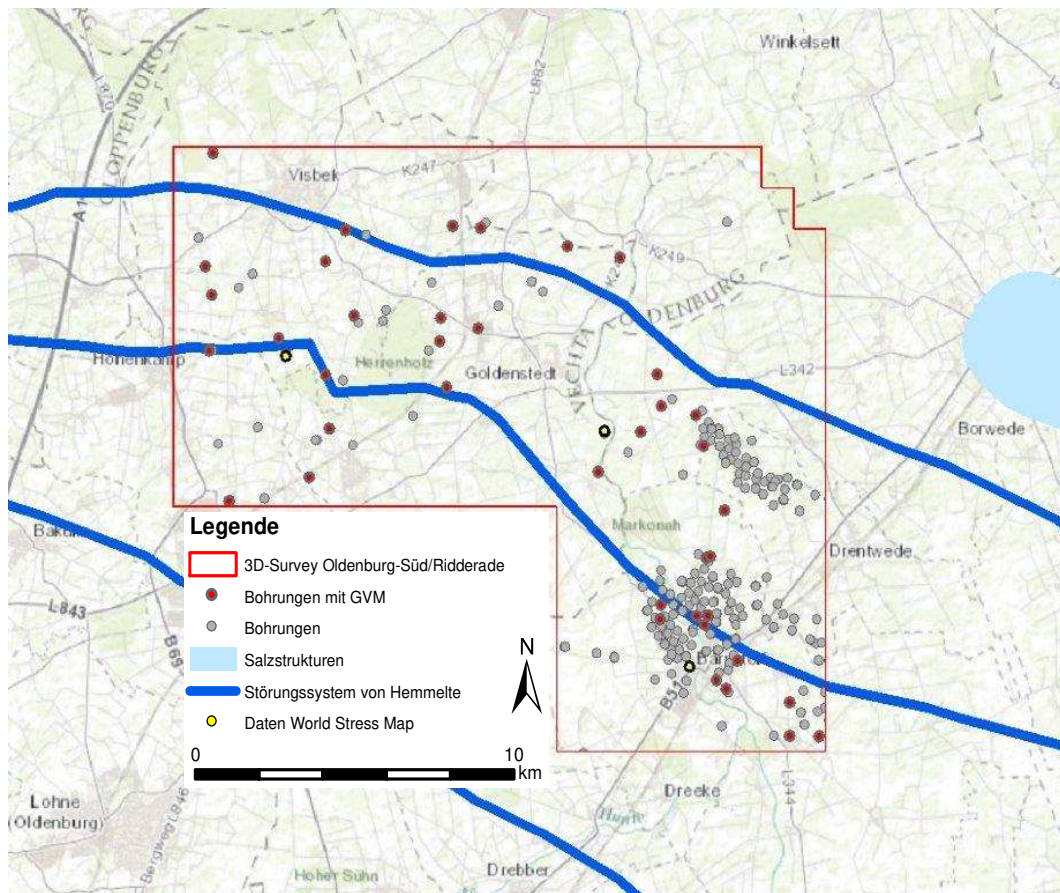


Abb. 4.1: Lage des Modellgebiets Oldenburg-Süd / Ridderade. © Weltweite topografische Karte, ESRI.

Für das ca. 274 km² große Modellgebiet in Südwest-Niedersachsen wurden zunächst Seismik- und Bohrungsdaten zusammengetragen, konvertiert und für die weitere Bearbeitung in GOCAD / SKUA® eingelesen. Die die geophysikalischen Daten enthaltenden SEG-Y Files lagen zunächst nur als seismische 2D-Linien vor und mussten mit den entsprechenden Programmen bearbeitet und umgewandelt werden. Aus den so vervollständigten Daten konnte mithilfe des Programms „Open Detect“ aus den SEG-Y 2D-Files ein SEG-Y 3D-File erstellt werden. Danach fand der Import als Voxet in GOCAD statt. Die GOCAD-Projektanlage erfolgte in der Zeitdimension, da die Seismik als z-Komponente diese Einheit aufweist. Die Zeitangaben liegen als Two-Way-Traveltime (TWT) vor; die Einheit beträgt Millisekunden. Da die Bohrungen mit den ent-

sprechenden Horizontmarkern nur Tiefenangaben enthalten, mussten sie in die Zeitdimension umgerechnet werden. Dies geschah über die in einigen Bohrungen erfolgten Geofonversenkungsmessungen (GVM), die eine Zeit / Tiefenkorrelation ermöglichen. Die hieraus ermittelten Geschwindigkeiten dienen zur Anpassung der Bohrungen an die Zeitdimension, wobei die Bohrungen optisch eine Streckung erfahren. Eine Zuordnung der beobachteten Reflektoren zu einzelnen Horizonten bzw. Horizontmarkern wurde hierdurch möglich (Abb. 4.2).

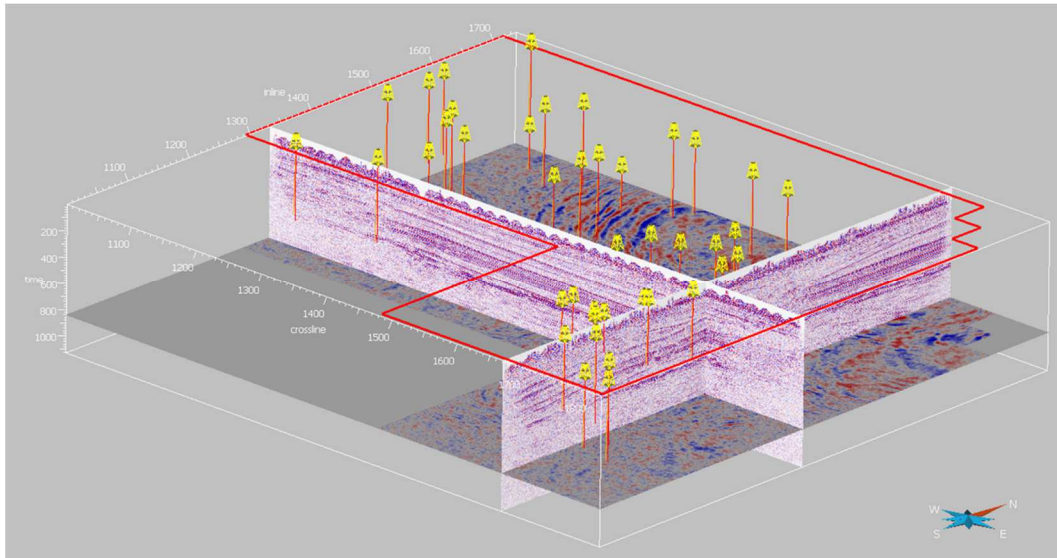


Abb. 4.2: Darstellung des Seismik-Voxets Oldenburg-Süd / Ridderade (roter Rahmen) mit Inline, Crossline, Zeiteinheit (z-Achse) und Bohrungen mit Geofonversenkungsmessungen.

Vierzehn stratigrafische Einheiten werden im GTA (BALDSCHUHN et al. 2001) als besonders deutlich in Erscheinung tretende Reflektoren genannt. Dazu gehören der Hauptdolomit, die Oberkante des Zechsteins, der Grenzbereich Unterer / Mittlerer Buntsandstein, die Oberkante des Mittleren Buntsandsteins, der Mittlere Muschelkalk, das Rhät (wahrscheinlich der Mittelrhätsandstein), der Lias ϵ , die Malmbasis, die Oberkante des Weißjuras (meist Serpulit), der Wealden (wahrscheinlich Wealden 3), das Valendis, die Albtransgression, die Oberkreidebasis und die Tertiärbasis. Aus diesen Horizonten wurden fünf Horizontflächen ausgewählt und in der Zeitdomäne abgebildet, für die aufgrund ihrer Position und Ausprägung für die Modellierung des Strukturinventars eine Schlüsselposition angenommen werden kann, um potenzielle Nutzhorizonte und Störungen als stratigrafisches Volumenmodell darzustellen. Modelliert wurden der Hauptdolomit als älteste seismisch abgebildete Abfolge, der Mittlere Muschelkalk und der darüber befindliche Rhät sowie der Wealden als transgressiv auflagernde Einheit und die ebenfalls transgressiv auflagernde Oberkreidebasis, die zudem die jüngste noch vollständig seismisch erfasste Abfolge darstellt. Nach Digitalisierung der Horizontspuren im GOCAD-Workflow „Interpretation Modelling“ erfolgten die Interpolation und die Erstellung von 2D-Grids bzw. Flächen.

Hierdurch wurden Diskontinuitäten und Versätze sichtbar, die nachfolgend als Störungen digitalisiert werden konnten. Durch Interpolation erfolgte ihre flächige Darstellung im Modell als „Surface“.

Über die entsprechenden Geschwindigkeitsmodelle erfolgte die Umwandlung der Daten von der Zeitdomäne in die Tiefendomäne. So konnten die Einfallswinkel der Störungen exakt dargestellt und die Tiefenlagen der Horizonte genau abgebildet werden.

Die räumliche Auflösung des GTA-3D (BOMBIEN et al. 2012) ist nicht so hoch wie die des in dieser Studie modellierten Detailgebiets, jedoch zeichnen sich die generellen Ablagerungsverhältnisse und strukturellen Merkmale bereits gut ab. Das modellierte Detailgebiet ermöglicht eine weitere Präzisierung im Hinblick auf die Lage und Wertigkeit der erfassten Störungen. Bereits im untersten Horizont des Hauptdolomits zeichnen sich die Inhomogenitäten, die im Folgenden als Grabenstruktur gedeutet werden, deutlich ab und können durchgehend bei allen der fünf aufgenommenen Horizonte verfolgt werden. Zur übersichtlicheren Darstellung ist zukünftig noch eine grafische Überarbeitung der modellierten Horizonte denkbar, bei der z. B. Datenlücken sinnvoll interpoliert oder Horizontoberflächen an markanten Störungen abgeschnitten werden (Abb. 4.3 a–j).

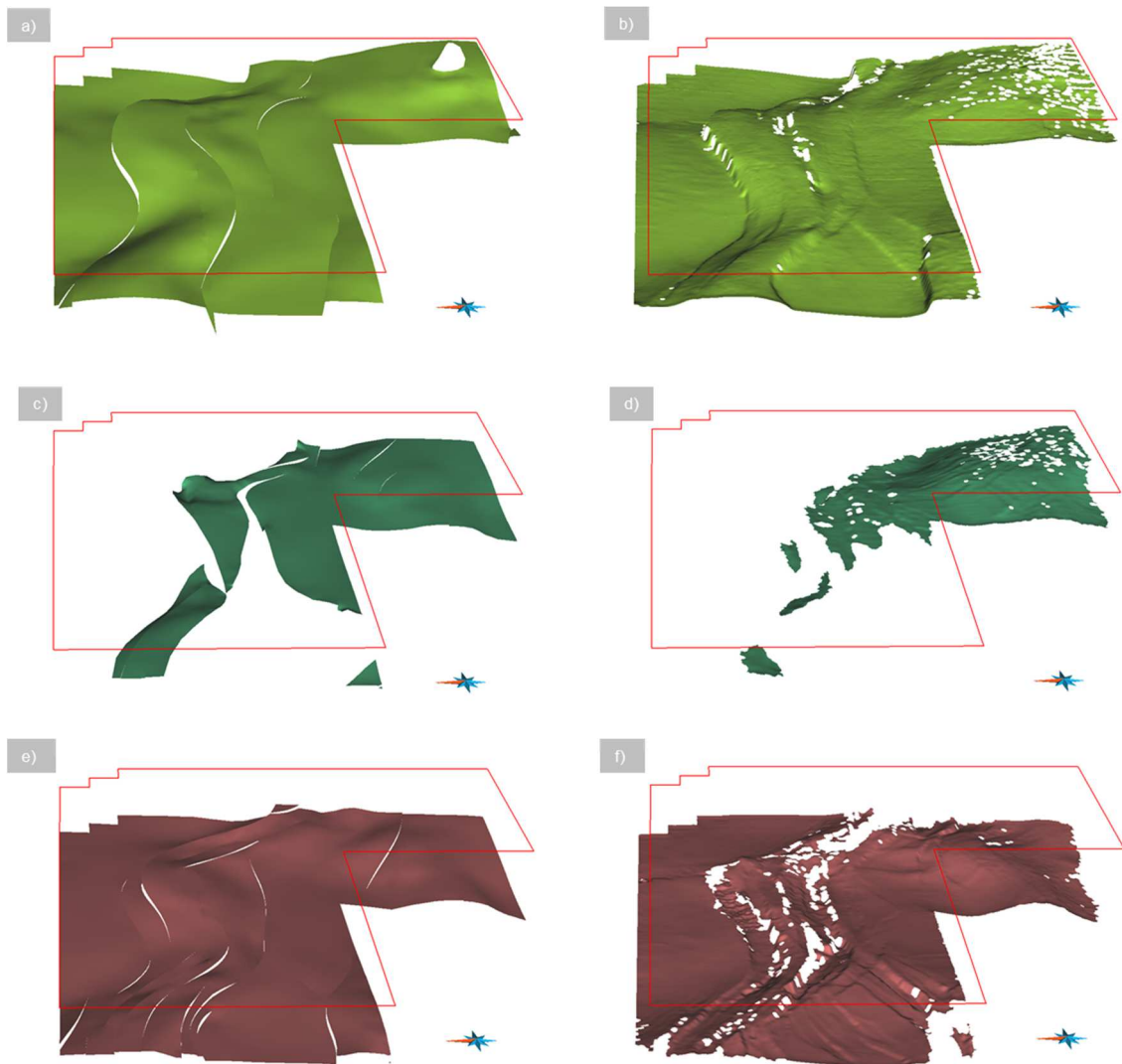


Abb. 4.3 a-f: Gegenüberstellung der verschiedenen Horizontmodelle innerhalb des 3D-Surveys Oldenburg-Süd / Ridderade (roter Rahmen). a) Oberkreidebasis und c) Unterkreidebasis sowie e) Liasbasis aus dem Geotektonischen Atlas 3D (BOMBIEN et al. 2012). b) Oberkreidebasis, d) Wealden und f) Mittelrhät aus dieser Studie.

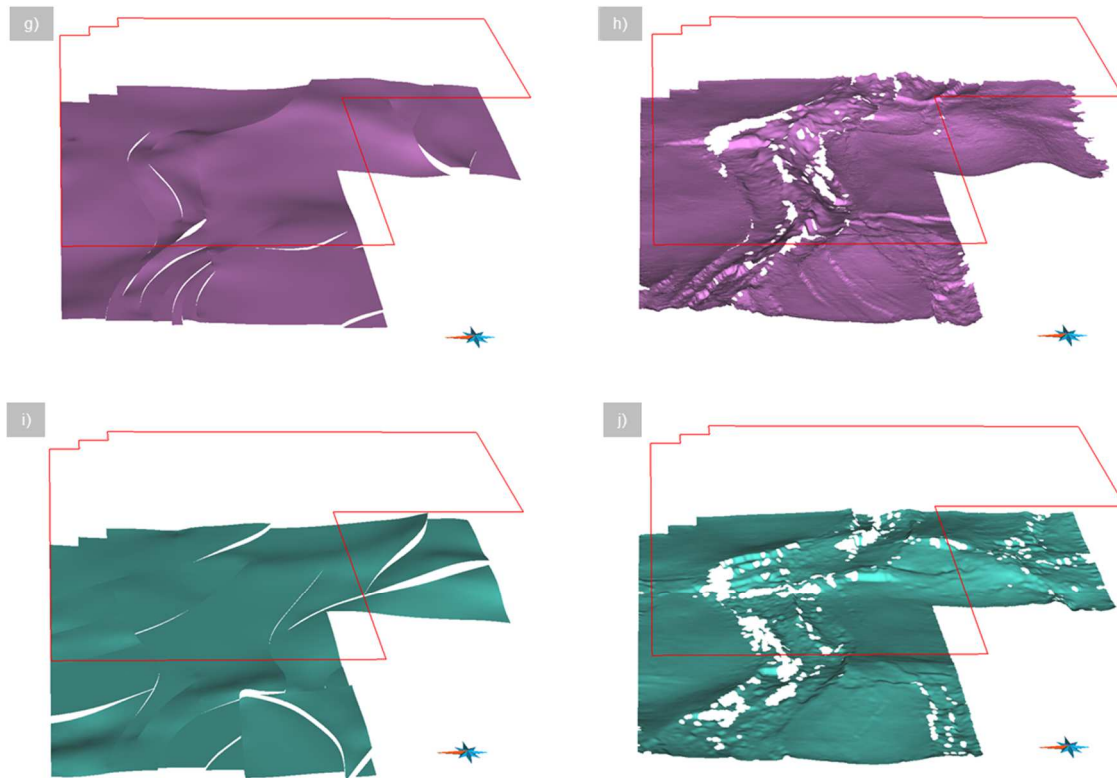


Abb. 4.3 g-j: Gegenüberstellung der verschiedenen Horizontmodelle innerhalb des 3D-Surveys Oldenburg-Süd / Ridderade (roter Rahmen). g) Basis des Oberen Buntsandsteins bzw. des Muschelkalks sowie i) Basis des Zechsteins aus dem Geotektonischen Atlas 3D (BOMBIEN et al. 2012). h) Mittlerer Muschelkalk sowie j) Top des Hauptdolomits aus dieser Studie.

Obwohl der GTA-3D eine Weiterentwicklung der bisherigen meist analog vorliegenden Darstellungen der Struktureinheiten auf digitaler Basis darstellt, wurden alle Störungen für die einzelnen Horizonte gesondert und voneinander getrennt aufgenommen, d. h. hier wurden keine horizontübergreifenden Verbindungen zwischen den Störungsspuren der einzelnen Horizonte hergestellt. Demgegenüber bilden die modellierten Störungen aus dem Modellgebiet dieser Studie flächige Elemente, die sich gegebenenfalls über mehrere Horizonte verfolgen lassen (Abb. 4.4 a, b).

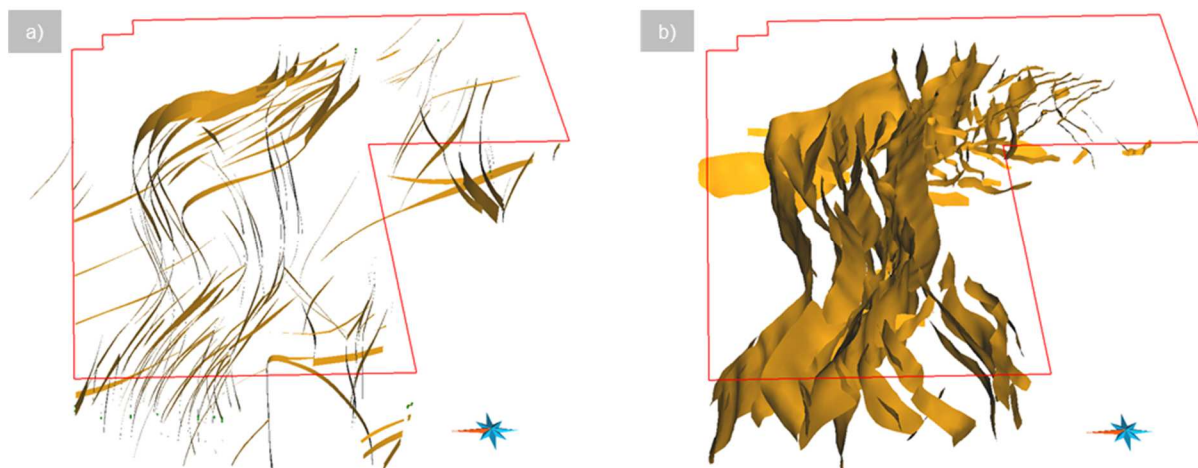


Abb. 4.4: Vergleich der Störungsmodelle innerhalb des 3D-Surveys Oldenburg-Süd / Ridderade (roter Rahmen). a) Darstellung von Störungen der einzelnen Horizonte aus dem Geotektonischen Atlas 3D (BOMBIEN et al. 2012). b) Darstellung der modellierten Störungen dieser Studie.

Im modellierten Detailgebiet konnten zwei Hauptstörungen (gelb) ausgemacht werden, deren Lage eine relativ gute Übereinstimmung mit dem generalisierten Störungs-Shape aus dem Projekt „Geothermie-Atlas“ aufweist. Sie besitzen ein steiles, teilweise wechselndes Einfallen. Diese zwei Hauptstörungen bilden eine Grabenstruktur, wobei die Störungen von den obersten modellierten Horizonten der Kreide bis in den Zechstein hinabreichen. Die maximale Sprunghöhe der Schichten, die durch diese Störungen versetzt werden, kann an einigen Stellen bis zu 400 m betragen.

Alle anderen ermittelten und erfassten Störungen sind von geringerer Ausprägung und Tiefe und können entsprechend als Nebenstörungen bezeichnet werden, wobei die Störungen, die sich innerhalb des Grabens befinden (grau), etwas markanter bzw. durchhaltender in Erscheinung treten als die Störungen, die sich außerhalb des Grabens befinden (grün).

Die Nebenstörungen innerhalb des Grabens folgen in ihrem Verlauf der Grabenstruktur, sind aber nicht sehr tiefreichend, sondern setzen sowohl lateral als auch vertikal immer wieder aus oder werden von benachbarten Störungen unterbrochen. Teilweise bilden sich auch kleine Halbgräben aus.

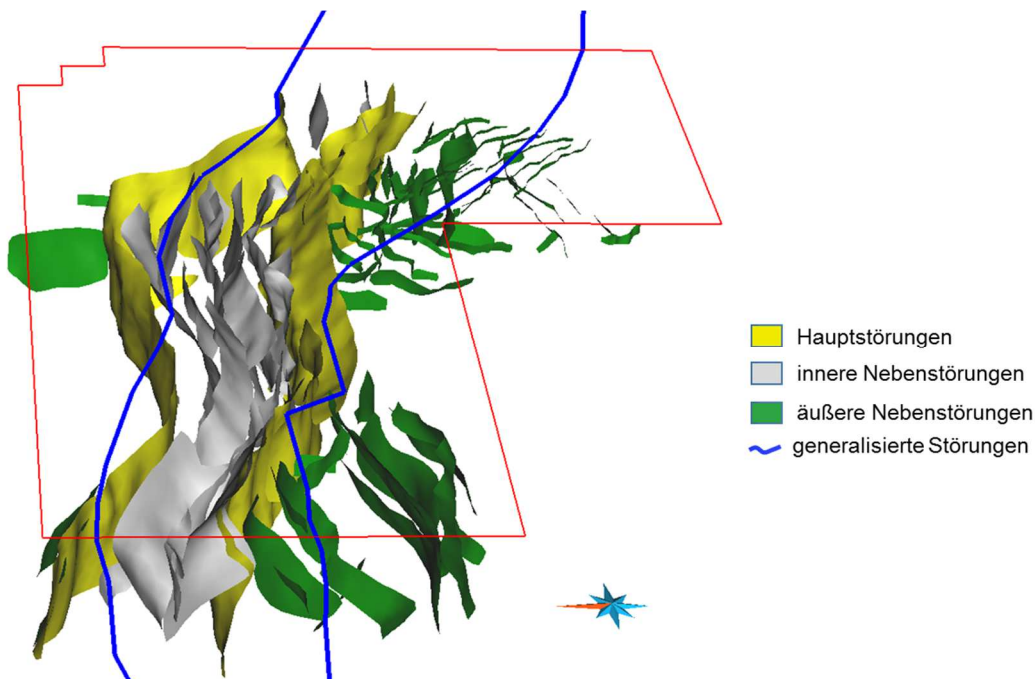


Abb. 4.5: Darstellung der modellierten Störungen dieser Studie innerhalb des 3D-Surveys Oldenburg-Süd / Ridderade (roter Rahmen). Darstellung der modellierten Störungen mit Unterteilung in Hauptstörungen bzw. Grabenstruktur (gelb), Nebenstörungen innerhalb der Grabenstruktur (grau) und Nebenstörungen außerhalb der Grabenstruktur (grün) und Überblendung der modellierten Hauptstörungen mit den generalisierten Störungsspuren aus dem Projekt „Geothermie Atlas“ (blaue Linien).

Die Störungen, die sich außerhalb des Grabens befinden, besitzen je nach Tiefenlage bzw. Horizont sehr unterschiedliche Streich- und Einfallswerte und zeigen nur eine geringe laterale und vertikale Reichweite. Nördlich des Grabens besitzen die Horizonte eine auffällig ungestörte Lagerung. Lediglich zwei quer zur Grabenstruktur verlaufende Störungen können hier festgestellt werden, die keine allzu große vertikale Ausprägung

besitzen. In der Überblendung mit den generalisierten Störungen aus dem Projekt „Geothermie Atlas“ kann eine gute Übereinstimmungen in der Lage und Form der Hauptstrukturelemente festgestellt werden (Abb. 4.5).

Die Abb. 4.6 stellt die sukzessive Überlagerung der fünf modellierten Horizonte mit den zwei modellierten Hauptstörungen dar. Die Tiefenstörungen, die einen Graben bilden, können durchgehend vom Zechstein bis in die Oberkreide verfolgt werden. Die nördliche Grabenschulter weist dabei keine Segmentierung oder Unterbrechungen auf, wogegen die südliche Störung im östlichen Teil des Modellgebiets etwas stärker aufgegliedert ist, jedoch immer noch als übergeordnetes Strukturelement in Erscheinung tritt.

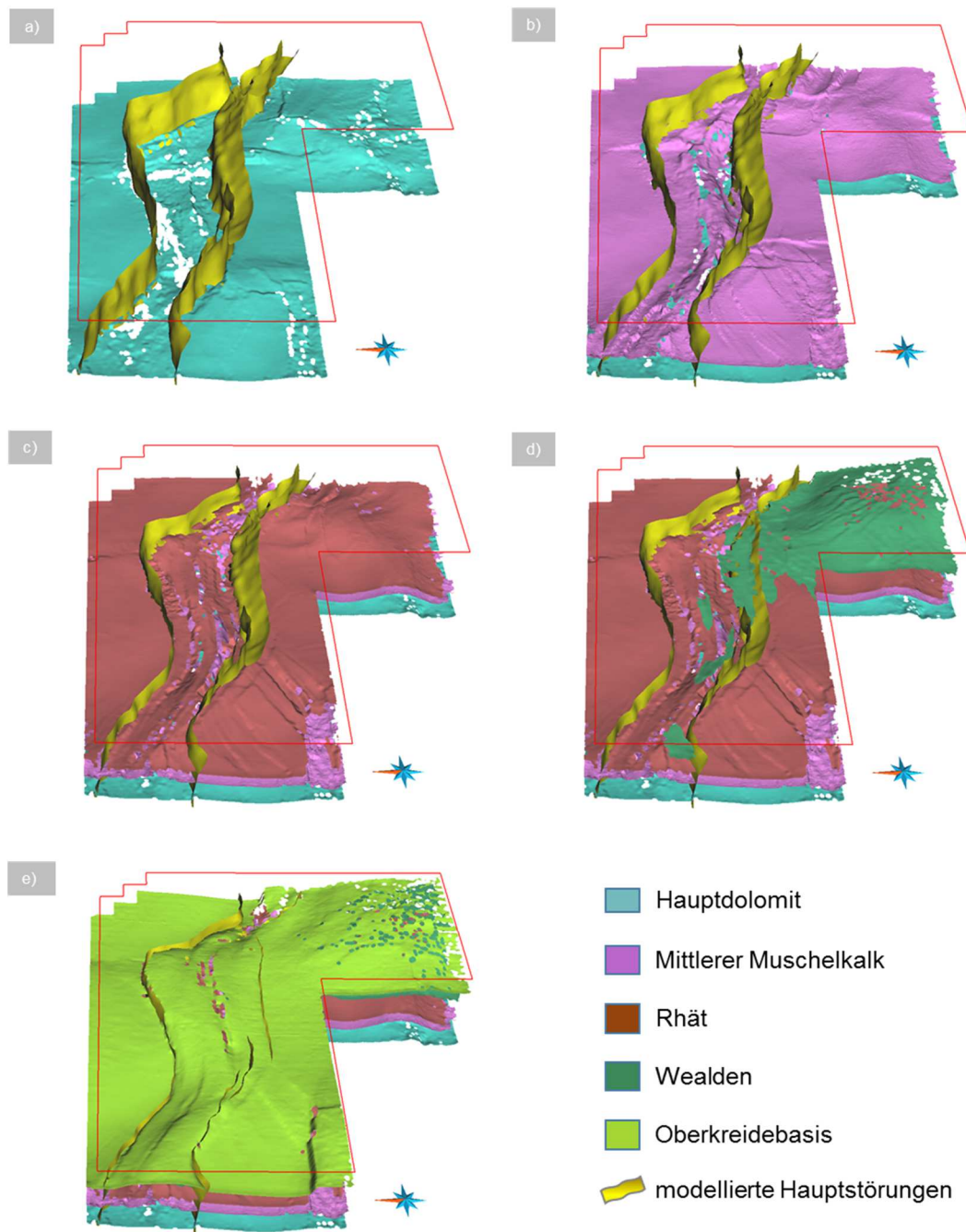


Abb. 4.6: Überlagerung der modellierten Horizonte dieser Studie innerhalb des 3D-Surveys Oldenburg-Süd / Ridderade (roter Rahmen) mit den modellierten Störungen aus diesem Projekt. a) Hauptdolomit. b) Mittlerer Muschelkalk. c) Rhät. d) Wealden. e) Oberkreidebasis.

Die Lage der nördlichen Hauptstörung bzw. nördlichen Grabenschulter stimmt in ihrem Verlauf sehr gut mit der nördlichen Störung aus dem Störungs-Shape aus dem „Geothermie Atlas“ bei einer maximalen Abweichung von ca. 1500 m überein. Dass es sich hierbei tatsächlich um Tiefenstörungen handelt, konnte anhand der Modellierung auf Basis der 3D-Seismikdaten nachgewiesen werden, was für einen Einsatz dieser Methodik bei Geothermievorhaben spricht. Auch die südliche Grabenrandstörung stimmt in ihrem Verlauf relativ gut mit der generalisierten Darstellung überein; lediglich im östlichen Bereich ist eine Abweichung von bis zu 5000 m zu verzeichnen. Diese lässt sich teilweise auf die in diesem Bereich sehr komplexe Strukturen zurückführen. Insgesamt kann festgestellt werden, dass in diesem Gebiet die generalisierten Störungen aus dem „Geothermie-Atlas“ die tatsächlichen Verhältnisse gut repräsentieren (Abb. 4.7).

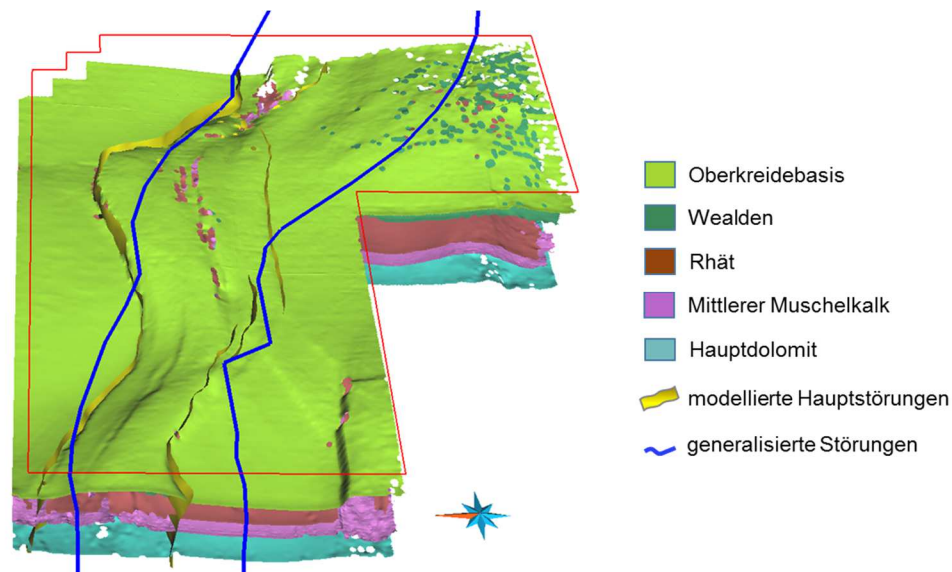


Abb. 4.7: Überlagerung der modellierten Horizonte dieser Studie innerhalb des 3D-Surveys Oldenburg-Süd / Ridderade (roter Rahmen) mit den in dieser Studie modellierten Hauptstörungen und den generalisierten Störungen aus dem Projekt „Geothermie Atlas“ (blaue Linien).

JUNG et al. (2002) nahmen an, dass Störungen mit den Richtungen $150-160^\circ$ und $20-30^\circ$ wegen ihrer günstigen Orientierung in Bezug zum heutigen Spannungsfeld eine größere Chance für höherer Transmissibilitäten bieten. Die beiden modellierten Hauptstörungen im Gebiet Oldenburg-Süd / Ridderade besitzen im Mittel einen Streichwert von 110° bzw. 120° .

Für ausgesuchte Störungen kann durch Einsatz spezieller Programme unter Verwendung von Daten der „World Stress Map“ (WSM) nun eine Abschätzung über deren mögliche Eignung für Geothermievorhaben erfolgen. (Abb. 4.8).

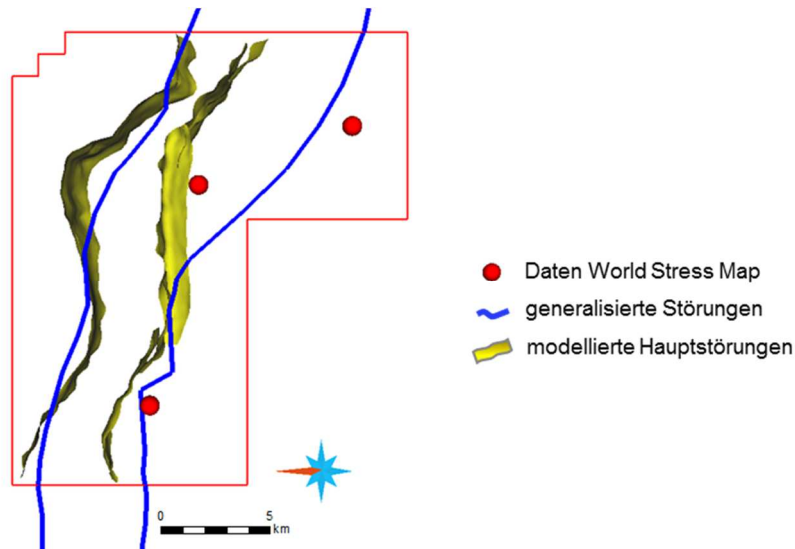


Abb. 4.8: Aufsicht auf die Überlagerung der modellierten Störungen mit den generalisierten Störungen und der Lage gemessener Spannungsdaten (World Stress Map / HEIDBACH et al. 2008) im Untersuchungsgebiet (roter Rahmen) mit Angabe von Tiefe und Azimut.

4.1.2 Neue Fazieskarten

Von den Bearbeitern des BMWi-geförderten Projekts „Identifikation hydraulisch geeigneter Bereiche innerhalb der mesozoischen Sandsteinaquifere in Norddeutschland“ (kurz: Sandsteinfazies) erhielten wir 2016 Kartenmaterial in Form von PDF- und Shape-Dateien zur Integration in GeotIS. Ausgehend von Kernbohrungen und geophysikalischen Bohrlochmesskurven sowie unter Berücksichtigung der jeweiligen Liefergebiete wurden für das Norddeutsche Becken die räumliche Lage von Verteilerrinnen und weiteren Sedimentationsräumen während des Mesozoikums rekonstruiert und hydraulisch charakterisiert. Um die für eine geothermische Erkundung relevanten Ergebnisse durch verschiedene Kartenebenen in GeotIS darzustellen, bedurfte es einer kartographischen Nachbearbeitung, die weitgehend abgeschlossen ist. Die neuen Fazieskarten für das Norddeutsche Becken werden bei der nächsten Aktualisierung des Systems den GeotIS-Nutzern zur Verfügung stehen.

4.2 Stereoskopische 3D-Visualisierung seismischer Daten zur Detektion von tiefreichenden Störungen

4.2.1 Virtuelle Welten

Das Visualisierungssystem SeisViz3D unterstützt das Verständnis und das Erkennen von geologischen Strukturen, die durch seismische Daten abgebildet werden. Aus der stereoskopischen Darstellung der Daten erzeugt das System einen dreidimensionalen räumlichen Eindruck. Hierdurch wird das Erkennen von unbekanntem Strukturen erleichtert, mitunter manche Zusammenhänge auch erst erkannt.

Der realitätsnahe Eindruck der virtuellen Umgebung (Virtuell Reality, (DÖRNER et al, 2013)) wird durch drei Aspekte definiert: Die technischen Möglichkeiten, die Interaktion zwischen dem Nutzer und dem virtuellen System und die mentale Erfahrung des Nutzers. Die technische Umsetzung besteht aus der Erzeugung des stereoskopischen

Raums, der Echtzeitfähigkeit des Systems und der immersiven Darstellung. Die Interaktion zwischen Nutzer und System, sollte die immersive Darstellung nicht stören und unterscheidet sich daher von den klassischen WIMP Techniken: **Windows, Icons, Menues, Pointing**. Die mentale Erfahrung meint die Präsenz in der virtuellen Welt, die das System erzeugen kann. Die Präsenz beinhaltet die Ortsillusion, die Plausibilitätsillusion und die Involviertheit. Bei dem Visualisierungssystem SeisViz3D wird hier nur die Involviertheit berücksichtigt, da es sich bei den seismischen Daten generell um keine natürliche Umgebung handelt. Bestimmte Darstellungen durch das System vermitteln allerdings den Eindruck einer Topographie und damit die Assoziation zu bekannten Strukturen. Die Involviertheit ist unter dem Aspekt der Konzentration auf die Szene und damit auf die Daten von Bedeutung.

4.2.2 SeisViz3D – Projektablauf

Der Entwicklungszeitraum des Systems betrug 24 Monate (Abb. 4.9). Die Funktionalitäten des Systems wurden in einem Konzept definiert, welches aber kontinuierlich überprüft und wenn erforderlich, an die Projektentwicklung angepasst wurde. Die programmtechnische Entwicklung des Systems wurde durch das Fraunhofer Institut für Intelligente Analyse und Informationssysteme (IAIS) in Sankt Augustin in enger Zusammenarbeit mit dem Leibniz- Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) durchgeführt.

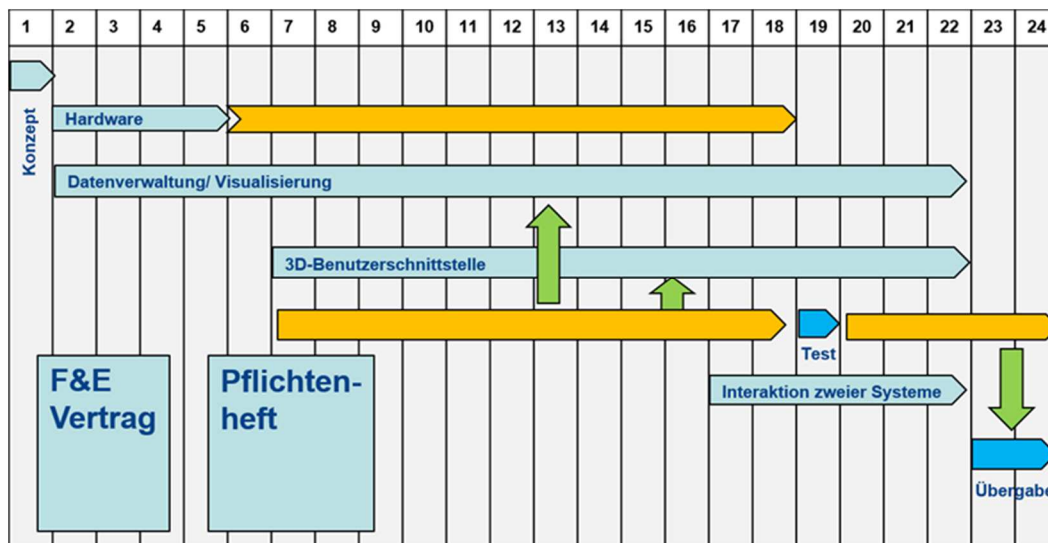


Abb. 4.9: zeitlicher Ablauf der Entwicklung des Visualisierungssystems SeisViz3D mit dem Fraunhofer Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme

Die Hardware Beschaffung erstreckte sich über einen längeren Zeitraum, da die technische Entwicklung und die technischen Möglichkeiten zwischen der Antragsphase und dem Projektanfang starken Änderungen unterlagen. Über den gesamten Zeitraum der Systementwicklung wurden begleitend Nutzertests am LIAG durchgeführt, deren Ergebnisse in die Ausgestaltung der Benutzerschnittstellen und die Darstellung der Daten einfließen. Damit wurde sichergestellt, dass die Funktionen und die Handhabung des Systems den Bedürfnissen der zukünftigen Anwender entsprechen.

4.2.3 SeisViz3D – Technik

Das System SeisViz3D besteht aus einer Software und einer Hardware Komponente. Hierzu gehören eine Workstation mit einer leistungsfähigen Grafikkarte, einem 55 Zoll großen Monitor und einem Tablet zur Unterstützung der Bedienung (Abb. 4.10). Das System kann auch mit einem 3D-Beamer oder einem kleineren Desktop-Monitor genutzt werden und ist daher geeignet für Vorführungen oder der Arbeit am Schreibtisch. SeisViz3D lässt sich vollständig über Maus und Tastatur steuern, das Tablet kann wahlweise als Bedienungshilfe mit hinzugenommen werden. Für die Hardware wurden Komponenten verwendet, die auf dem Markt verfügbar, allerdings im oberen Leistungsniveau für Systeme am Arbeitsplatz angesiedelt sind. Das System mit Monitorstandfuß und Stehpult nimmt ca. eine Fläche von 3 qm ein und findet daher in einem normalen Arbeitszimmer Platz.

Konzipiert wurde das System für ein stehendes Arbeiten, um eine freie Bewegung vor dem Monitor zu ermöglichen. Ergonomisch ist dies eine sinnvolle Alternative, da die Sitzposition die Bewegungsmöglichkeiten einschränkt und es oft zu einer verkrampften Haltung kommt. Bei Höhenverstellbarkeit des Monitors und eines Stehpultes, welches als Ablage für die Bedienelemente dienen kann, lassen sich auch stehendes und sitzendes Arbeiten abwechseln.



Abb. 4.10: Das System SeisViz3D besteht neben der Software aus einem 55 Zoll großen 3D-fähigen Monitor, einer Workstation mit einer leistungsfähigen Grafikkarte und einem Tablet als Unterstützung der Bedienung.

4.2.4 SeisViz3D – Handhabung

Die Interaktion mit dem Programm findet mit den Geräten Tablet und Computermaus und den Menüs statt (Abb. 4.11). Alle Steuerungen können aber auch allein durch die Maus erfolgen. Das Tablet dupliziert teilweise die Steuerungsmöglichkeiten der Maus.

Die Steuerung beinhaltet die Bewegung der Szene und die der Zeiger. Bei den Zeigern (Cursor) wird unterschieden zwischen dem Mauszeiger und dem 3D-Cursor. Der Mauszeiger gibt die Position des Zeigers auf der Bildschirmoberfläche an. Er wird verwendet, um die Menüs zu bedienen und Einstellungen vorzunehmen und zeigt den Drehmittelpunkt bei der Bewegung der Szene an. Der 3D-Cursor gibt die Lokation des

Zeigers im 3D-Raum an. Die Lokalisierung wird durch die Darstellung der 3 Raumachsen unterstützt, die sich im Cursor-Mittelpunkt schneiden. Der 3D-Cursor wird durch den Mauszeiger mit bewegt, wobei beide nicht unbedingt die gleiche Lage einnehmen.

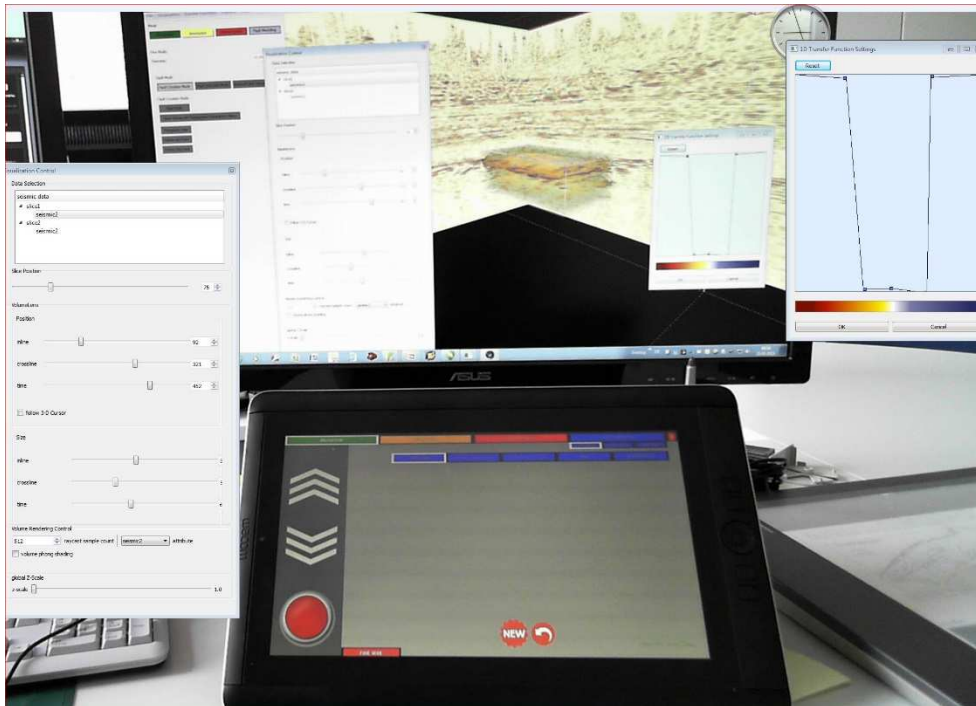


Abb. 4.11: Arbeitsplatz für das Visualisierungssystem. Im Vordergrund das Tablet mit der Bedienoberfläche. Im Hintergrund ein 3D-fähiger Monitor mit der Darstellung von seismischen Schnitten, der Volumenlinse und Menüs für die Einstellungen.

Durch die Duplizierung der Bewegungsmöglichkeiten auf das Tablet lassen sich die einzelnen Bewegungen besser koordinieren. So ist die Cursorsteuerung mit der Maus bei Durchführung der Bewegung der Szene gleichzeitig, bzw. in schneller Abfolge möglich. Die Trennung bewirkt eine Konzentration auf die Bewegung der einzelnen Hände. Bei alleiniger Maussteuerung muss nacheinander die Szene und dann der Cursor bewegt werden. Dies führt zu einer Unterbrechung des Bewegungsablaufs. Außerdem hat sich gezeigt, dass der Cursor möglichst kontinuierlich im Blickfeld sein sollte, da ansonsten die Position des Cursors und damit die notwendige Bewegungsrichtung nicht mehr klar sind.

Die Menüs sind auf dem Bildschirm und dem Tablet teilweise unterschiedlich. Während auf dem Bildschirm weitere numerische Einstellungen durchgeführt werden können, gibt es auf dem Tablet Alternativen, um bestimmte Tätigkeiten durchzuführen. Speziell sind auf dem Tablet große Tasten verfügbar, um Punkte in der Szene zu setzen und Punktensembles neu anzulegen. Dies erleichtert die Arbeit insofern, da speziell bei der Betrachtung der Szene im stereoskopischen Modus, diese Tasten schnell gefunden werden können. Ein längeres Abwenden von der Szene führt zu einem Flackern der Ansicht, da die Menüs nicht stereoskopisch dargestellt werden. Für die Auswahl und die Positionierung von Punkten wurden spezielle Cursor und Hilfslinien implementiert, die die Arbeit bei der stereoskopischen Betrachtung im Raum unterstützen (Abb. 4.12).

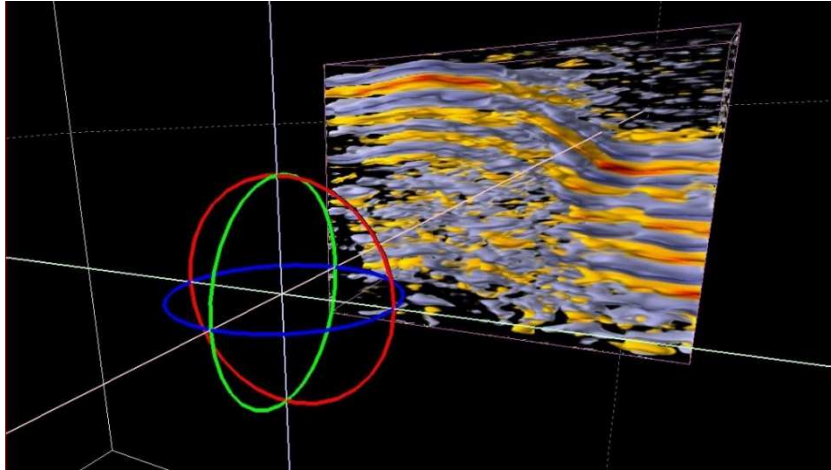


Abb. 4.12: Cursor zum Kennzeichnen von Punkten oder Störungen.

4.2.5 Daten

Die Daten werden im SEG-Y Dateiformat eingelesen. Um die Datenmenge zu reduzieren wird nur ein 8-bit Zahlenformat mit Vorzeichen unterstützt. Die Aufbereitung der Daten sollte in einem entsprechenden Seismikprogramm vorbereitet werden, da eine Datenmanipulation innerhalb des Systems nicht vorgesehen ist. Diese Datenmanipulation sollte die Dynamik bei der Darstellung ausnutzen, da oft sehr wenige Daten nur maximale oder minimale Werte annehmen. Diese können bei der Vorbearbeitung in den Nutzbereich verschoben werden. Die Skalierung der Daten kann durch die Analyse der Amplitudenverteilung unterstützt werden. Um die Darstellung zu optimieren ist es manchmal sinnvoll die zu interpretierenden Bereiche auszuschneiden. Der Vorteil der Visualisierung ist, dass Horizonte ohne eine Flächenerstellung in den Originaldaten betrachtet werden können. Daher ist darauf zu achten, dass bei horizontbasierten Ausschneideverfahren nicht Informationen verloren gehen und dadurch Situationen vorgetäuscht werden.

4.2.6 SeisViz3D – Arbeitsabläufe

Die Visualisierung von seismischen Daten wird in der Phase der Exploration vor allem während der Interpretation der Daten und bei der Bohrpfadplanung durchgeführt. In diesen Abschnitten kann das Visualisierungssystem eingesetzt werden und die Durchführung der Arbeiten unterstützen (Abb. 4.13).

Für die Interpretation von Störungen in seismischen Daten werden bestimmte Arbeitsabläufe in speziellen seismischen Interpretationsprogrammen verwendet. SeisViz3D ist nicht dafür gedacht diese Abläufe insgesamt zu ersetzen, sondern diese zu ergänzen, indem die Strukturen vor oder während des Interpretationsvorgangs räumlich visualisiert werden. Hier kommen die einzelnen Aspekte der virtuellen Darstellung zum Tragen: Echtzeitfähigkeit, Interaktion und Immersivität.

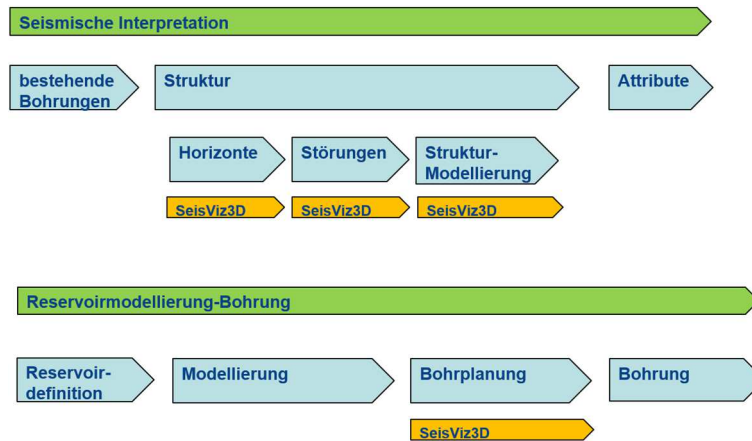


Abb. 4.13: Gliederung der Teilphasen: Seismische Interpretation und Reservoirmodellierung in der Explorationsphase.

Bei der konventionellen Interpretation werden in einzelnen Sektionen „fault traces definiert“, die den Schnitt der Störungsfläche mit der seismischen Sektion definieren. Diese fault traces werden durch das Programm zu einer Störungsfläche durch Interpolation zusammengesetzt. Die Definition der fault traces richtet sich nach dem erkennbaren Versatz von einzelnen Horizonten. In gut geschichteten Sedimentabfolgen lassen sich der Versatz und damit die Störungsfläche gut ablesen. In Bereichen ohne deutliche Schichtung wird die Störungsspur inter- oder extrapoliert. Die Form der gewählten Störungsspur in dieser Situation ist abhängig von dem gewählten tektonischen Modell und ihrem bisherigen Verlauf.

So sieht man am Beispiel des Datensatzes aus dem Messgebiet Unterhaching innerhalb der Karbonatplattform mehrere Störungszonen (Abb. 4.14). Die Interpretation der einzelnen Störungen wird durch die Horizonte oberhalb der Karbonatplattform (Lithothamienkalk bis Basissandstein) bestimmt. Die Karbonatplattform selbst zeigt relativ wenig kohärente Einsätze. Die Reflexionen an der Basis (mittel- und unterjurassische Sand-Tonfolgen) zeigen wiederum deutliche Versätze, die zur Festlegung der Störungsspuren verwendet werden können.

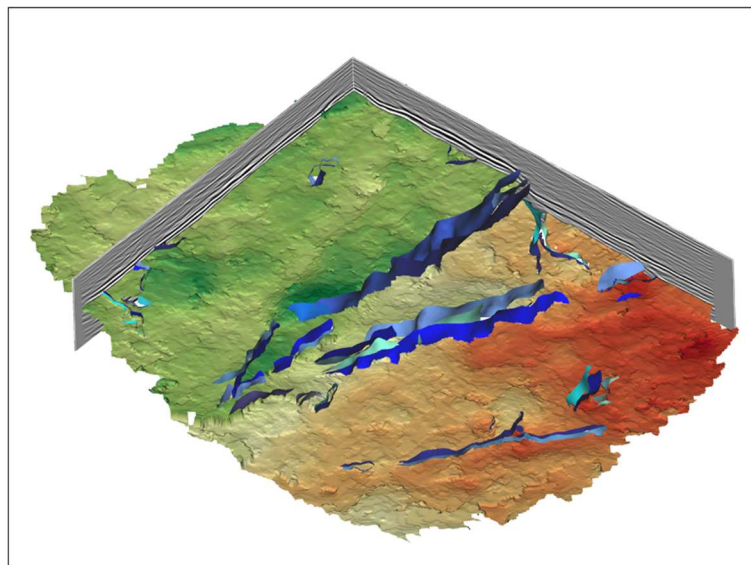


Abb. 4.14: Störungsinterpretation und Darstellung des Top Malm des Messgebietes Unterhaching (C. Kadner).

In dem Visualisierungssystem SeiViz3D wird in der stereoskopischen Ansicht interpretiert. Schnitte und Flächen aus dem seismischen Volumen dienen zur Orientierung. Die Auswahl der Störungsfläche geschieht innerhalb der räumlichen Darstellung der Volumenlinse. Die Daten in diesem Bereich sind teilweise transparent dargestellt, so dass ein Einblick in das seismische Volumen möglich ist (Abb. 4.15).

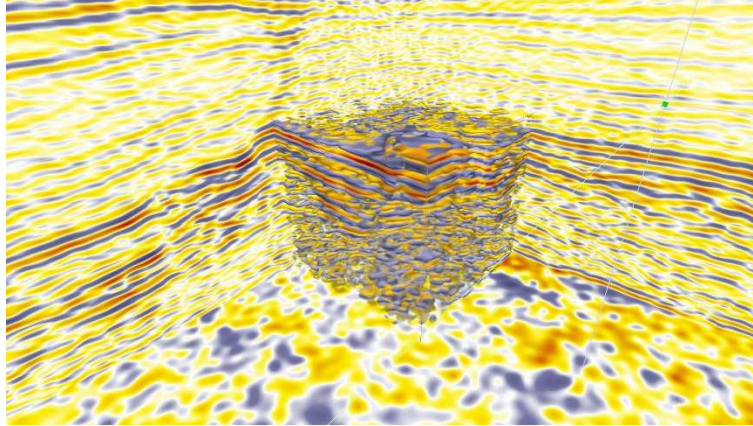


Abb. 4.15: Darstellung der Seismik in SeiViz3D mit Schnitte, Zeitfläche und Volumenlinse.

Zur Orientierung und Festlegung von zu interpretierenden Bereichen können Markierungen verwendet werden. Störungen werden durch das Setzen einzelner Punkte innerhalb des 3D-Volumens erzeugt (Abb. 4.16). Dies kann teilweise gesteuert werden, in dem die Parameter des Triangulationsalgorithmus angepasst werden. Ein Zusammenbau zu größeren Flächen und die weitere Verarbeitung in anderen Programmen sind möglich.

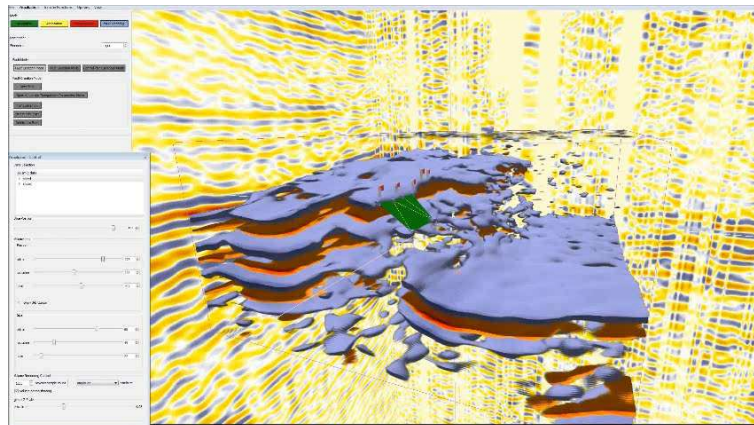


Abb. 4.16: Interpretationsdarstellung in SeiViz3D, mit Menüs zur Auswahl der Aktionen und Darstellung der Szene, Markierung und Störungsfläche.

Die interpretierten Flächen in SeiViz3D sind nicht unbedingt glatt und kontinuierlich, sondern sollen die Heterogenität der Störungsfläche abbilden. Es können daher auch Lücken entstehen (Abb. 4.17). Der verwendete „Greedy Algorithmus“ ermöglicht eine möglichst genaue Anpassung der Fläche an die Strukturen. Während der Interpretation kann die Flächenerstellung durch die Parameter angepasst werden.

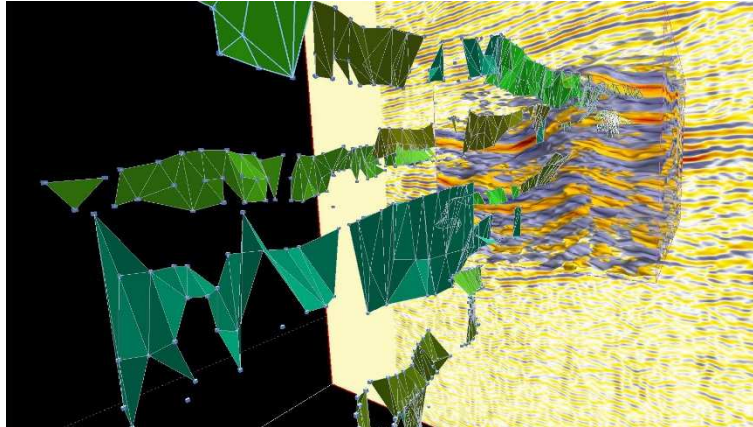


Abb. 4.17: Interpretierte Störungsflächen in SiesViz3D.

4.2.7 Beispiele

Für die Evaluierung des Systems sind verschiedene Datensätze verwendet worden. Diese bilden unterschiedliche Sedimentationsräume ab (Abb. 4.18). **F3-Demo** ist ein Datensatz aus der holländischen Nordsee. Die hier abgebildete Struktur stellt einen flachen Salzstock dar, der durch den Salzaufstieg im Oberbau Störungen erzeugt hat. **Penobscot** ist ein Datensatz aus dem offshore Bereich vor der kanadischen Küste. Die Schelfablagerungen sind durch markante Störungen gegliedert. **Stratton** ist ein Datensatz aus dem Süden der USA und zeigt eine typische Growth-Fault Struktur. Der Datensatz **Waha** (West Waha and Worsham Bayer Fields) ebenfalls aus dem Süden der USA zeigt stark tektonisch beanspruchte Karbonatlagen und Tiefwassersedimente. Die Darstellungen zeigen gut reflektierende Schlüsselhorizonte, die durch die Auswahl der Teiltransparenz und die Positionierung der Volumenlinse abgebildet werden.

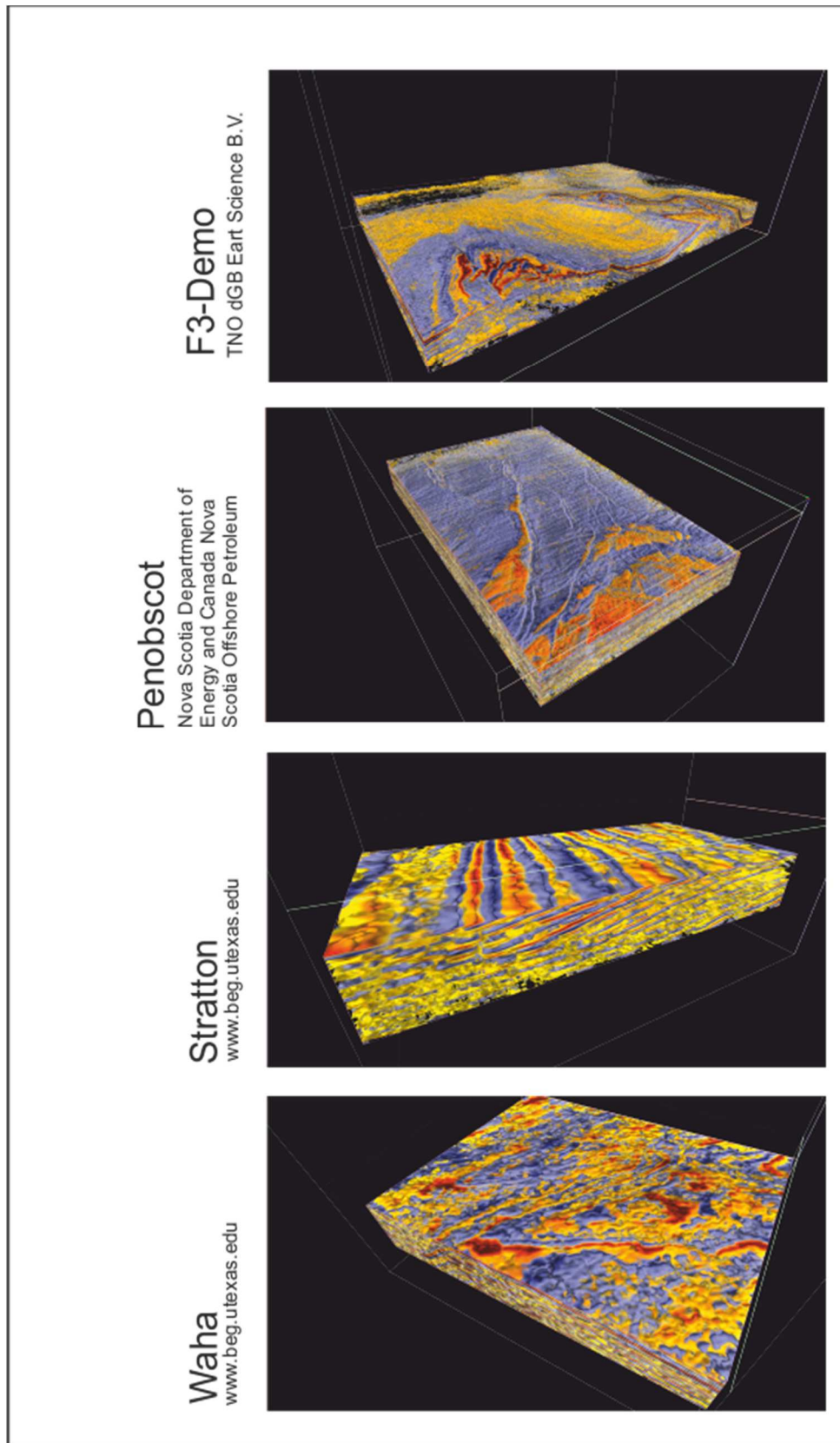


Abb. 4.18: Datensätze, die unterschiedliche Sedimentationsräume und Strukturen abbilden. Darstellung mit SeisViz3D mit der Volumenlinse und Teiltransparenz der Amplituden.

In dem F3-Demo Datensatz wurde die komplexe Salzstruktur räumlich abgebildet (Abb. 4.19). Störungen oberhalb der Struktur wurden modelliert (Abb. 4.20). Die interne Struktur, auch von scharfen Störungzonen, ist sichtbar (Abb. 4.21). Dies gilt

auch für Störungen in den Datensätzen Penobscot und Waha (Abb. 4.22 und Abb. 4.24). Im Datensatz Stratton wird die interne Struktur der hangend Scholle, d. h. des „Rollover“ mit den zugehörigen Störungen abgebildet (Abb. 4.23).

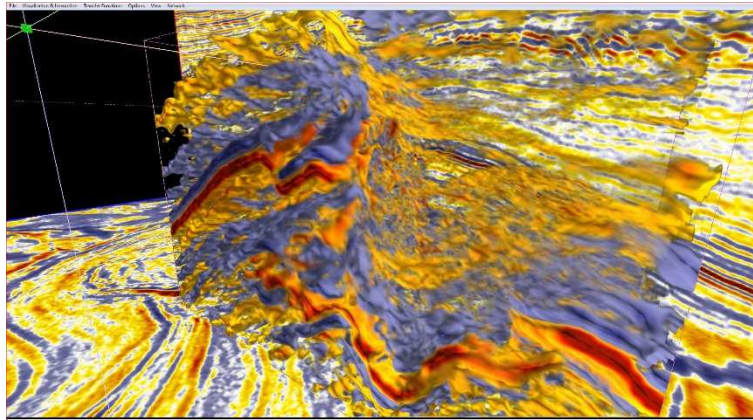


Abb. 4.19: Abschiebung oberhalb des Salzaufstiegs im Datensatz F3-Demo.

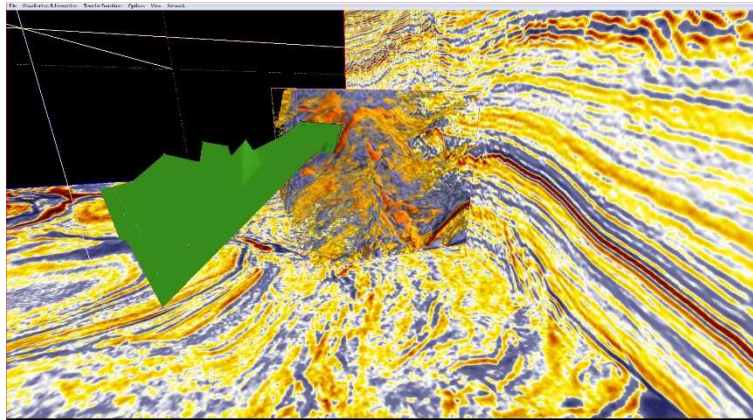


Abb. 4.20: Modellierung der Störung oberhalb des Salzaufstiegs im Datensatz F3-Demo.

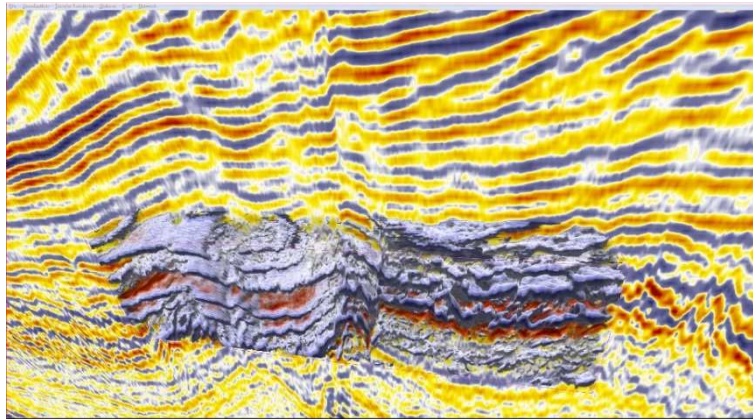


Abb. 4.21: Interne Struktur einer Störung oberhalb des Salzaufstiegs im Datensatz F3-Demo.

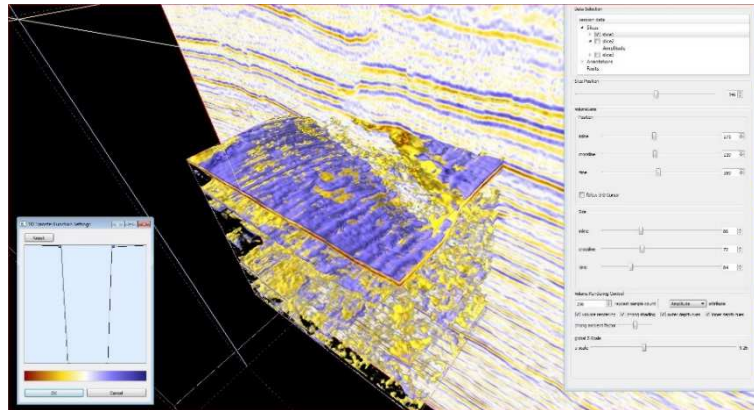


Abb. 4.22: Datensatz Penobscot. Darstellung der Störung in der Volumenlinse.

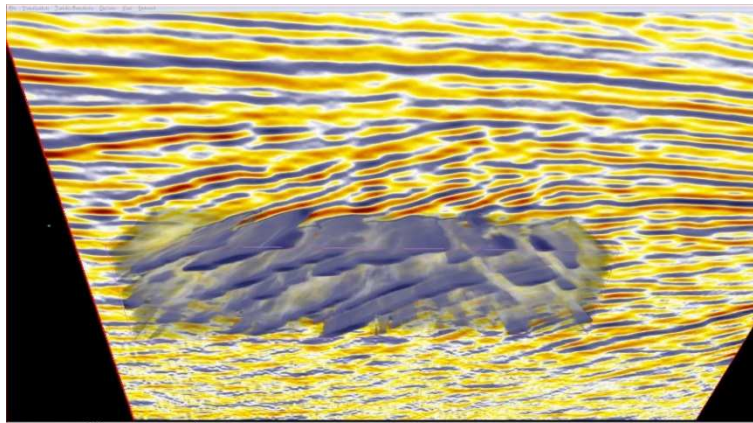


Abb. 4.23: Datensatz Stratton. Räumliche Darstellung der roll-over Struktur in der Volumenlinse.

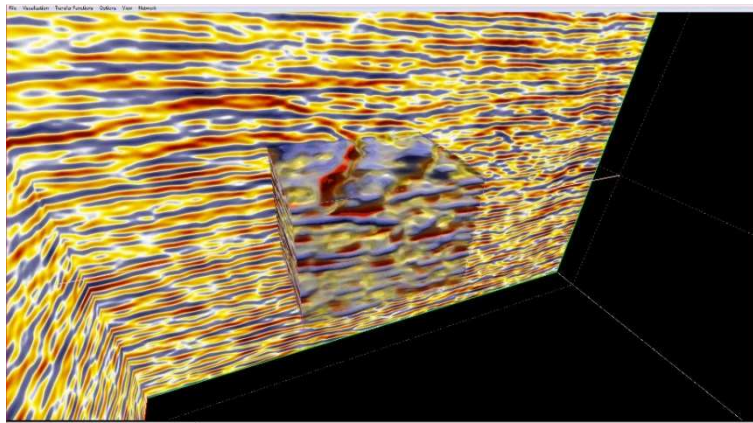


Abb. 4.24: Datensatz Waha. Darstellung der Störung in der Volumenlinse.

Neben der seismischen Amplitude können die Daten auch mit anderen Attributen dargestellt werden. Attribute sind Transformationen eines Signals, bzw. der seismischen Spur und die Korrelation von Spuren untereinander mit unterschiedlichen Gewichtungen. Durch die Attributberechnung werden besondere Signaleigenschaften verstärkt und zeigen geringe Änderungen in der Form (Phase), Frequenz oder Amplitude an, die nur schwer erkennbar oder auszuwerten sind. Bei der Evaluierung verschiedener Attribute ging es vor allem darum, Änderungen im Signalbild, die durch Störungen hervorgerufen werden, abzubilden. Der Fokus lag darüber hinaus im Bereich der Karbonatplattform. Daher wurden diese Untersuchungen mit dem Datensatz Unterhaching

durchgeführt. Während in den abdeckenden Schichten oberhalb der Karbonate Störungen durch den Versatz der geschichteten Einheiten oft klar zu erkennen sind, ist dies innerhalb der Karbonatplattform nicht mehr möglich. Bei der Betrachtung der Amplituden muss berücksichtigt werden, dass diese nicht spezielle Eigenschaften des Gesteins widerspiegeln, sondern das Reflexionsgeschehen des Wellenfeldes. Andere Gesteinseigenschaften können daher ähnliche Attribute in den Signalen erzeugen, wenn die Reflektivität ähnlich ist. Es wurde zunächst eine größere Anzahl von Attributen berechnet und das Hervorheben der Störungen oder des Störungsbereichs bewertet. Anschließend wurde die Visualisierung mit dem System SeisViz3D getestet. Für die weitere Analyse wurden zwei Attribute ausgewählt: Momentane Amplitude und die Energie, die beide ein Maß für die Energie, d. h. das Amplitudenquadrat sind. In dem ersten Fall wird das Amplitudenquadrat über ein Zeitfenster summiert, in dem zweiten Fall wird die Einhüllende durch die s. g. Hilberttransformation berechnet. Das Zeitfenster für die Energieberechnung wurde so gewählt, dass es ungefähr der Signallänge entspricht.

Für eine erste Darstellung wurden die Amplitudendarstellung und das Energieattribut (Abb. 4.25) bzw. die momentane Amplitude übereinandergelegt und hohe Werte ausgeblendet. Dargestellt sind jeweils eine Inline- und eine Crossline-Fläche. Niedrige Werte überdecken die Amplitudendarstellung, während in den anderen Bereichen die Amplitudendarstellung sichtbar bleibt. Die starken horizontal geschichteten Bereiche stellen die abdeckenden Schichten oberhalb der Karbonatplattform dar. Oberhalb dieser Schichten befinden sich die Sedimente der unteren Meeresmolasse, die eine geringe Reflektivität aufweisen und unterhalb der Karbonatplattform gilt dies ebenso für den kristallinen Unterbau. Innerhalb der Karbonatplattform sind einige wenige stark reflektive Bereiche mit laminarer Schichtung zu erkennen. Getrennt werden diese Bereiche durch eine mehr oder weniger stark senkrecht verlaufende schmale Zone niedriger Amplitude bzw. Energie. Horizontale Bereiche niedriger Amplitude bzw. Energie sind ebenfalls innerhalb der Karbonatplattform zu erkennen und sind oft unterhalb ungestörter Bereiche der abdeckenden Schichten zu finden. Die Unterscheidung zwischen gering reflektiven Bereichen, die aus geringen Impedanzen an Schichtgrenzen oder durch die Dispersion von Wellenenergie an Störungen herrühren ist so nicht direkt sichtbar. Durch die senkrechte Orientierung dieser Zonen innerhalb der Karbonatplattform im Bereich von Störungen kann jedoch die Annahme aufgestellt werden, dass sie den Störungsverlauf innerhalb der Karbonatplattform abbilden.

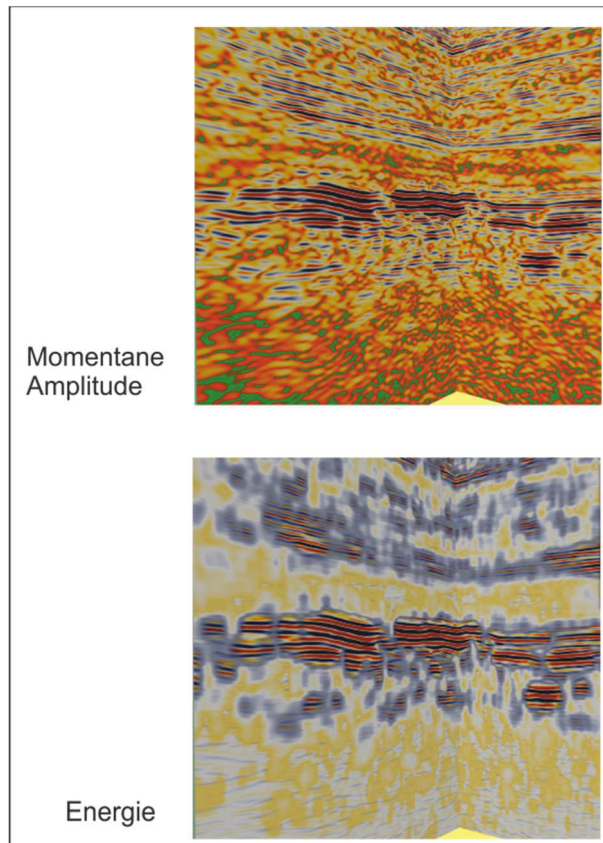


Abb. 4.25: Momentane Amplitude - Attribut und Energie – Attribut, jeweils zusammengestellt mit der Amplitude. Die großen Werte der Attribute sind jeweils ausgeblendet. Dargestellt ist jeweils eine Inline und Crossline aus dem Datensatz Unterhaching.

Entsprechende Darstellungen wurden mit dem Visualisierungssystem SeisViz3D durchgeführt (Abb. 4.26). Hier dient ebenfalls die seismische Sektion als Hintergrund. Die Volumenlinse wurde mit den entsprechenden Attributen dargestellt. Die Farbschema lassen sich nicht getrennt auf Sektion und Volumenlinse anwenden. Zu den beiden Attributen momentane Amplitude und Energie wird zusätzlich die Varianz dargestellt. Die Varianz wurde mit einem relativ kleinen Fenster berechnet, um die entsprechenden Varianzwerte möglichst auf die nicht kohärenten Bereiche zu beschränken. Die Transparenz wurde mit der Transfer Funktion eingestellt. Die entsprechende Einstellung muss jeweils getestet werden. So wurde für die momentane Amplitude ein anderes Farbschema verwendet. Dies liegt an der Form des Histogramms für die unterschiedlichen Attribute. Für symmetrische Histogramme eignen sich grundsätzlich symmetrische Farbschemata mit weiß als zentraler Farbe. Bei stark asymmetrischen Histogrammen sind entsprechende asymmetrische Farbschemata besser zu nutzen. Eine Ähnlichkeit in der Verteilung der Werte der unterschiedlichen Attribute ist auch hier erkennbar. Die Werte variieren jedoch nicht nur stark in der Inline-Richtung, also parallel der dargestellten Sektion, sondern auch senkrecht dazu. Dies liegt an der heterogenen Reflektivitätsverteilung innerhalb der Karbonatplattform und an dem lokal nicht linearen Störungsverlauf.

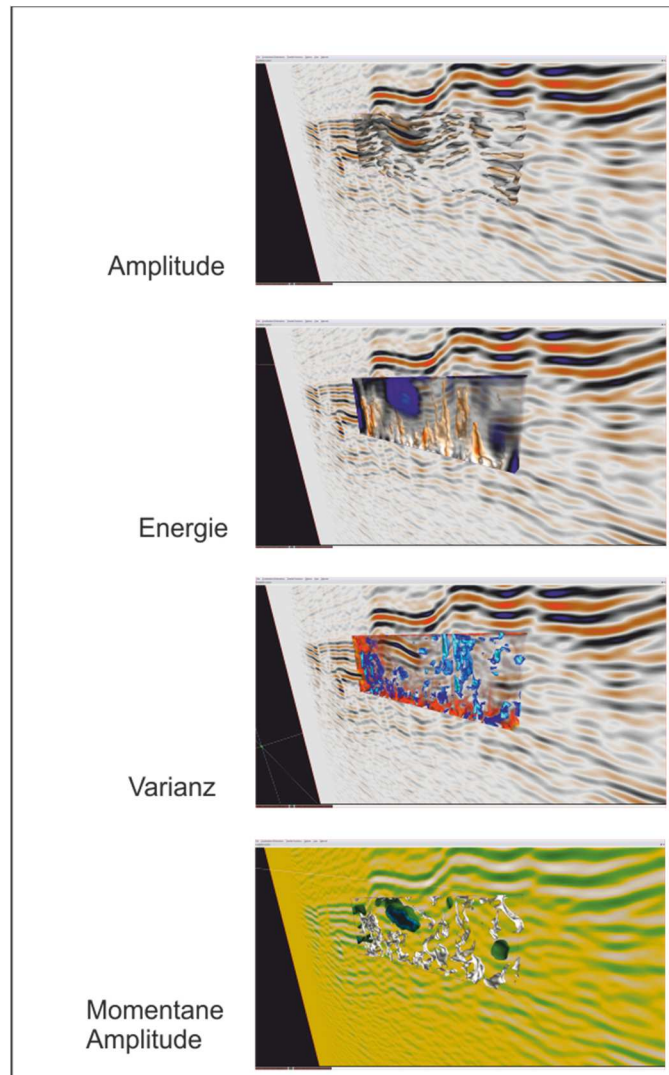


Abb. 4.26: Darstellung verschiedener Attribute in der Volumenlinse.

4.2.8 Zusammenfassung / Ausblick

Das seismische Visualisierungssystem SeisViz3D ermöglicht die Interpretation von Störungen bzw. Flächen in einer virtuellen Umgebung. Dies geht über die rein stereoskopische Darstellung hinaus, da die Echtzeitfähigkeit, die Interaktion zwischen Nutzer und System und die Immersivität ebenso berücksichtigt wurde. Das Visualisierungssystem wurde speziell für die Interpretation von Störungsflächen konzipiert. Das Erkennen und Interpretieren von komplexen Strukturen ist der wesentliche Mehrwert des Systems, das als Ergänzung zu konventionellen Systemen gedacht ist. Dies wurde an verschiedenen Datensätzen verdeutlicht. Ein Schwerpunkt war die Visualisierung von Störungen innerhalb der Karbonatplattform der bayerischen Molasse. Hier sind seismische Attribute analysiert und verwendet worden, um die Störungsbereiche darzustellen.

Das System SeisViz3D befindet sich derzeit im Status eines Prototyps, d. h. die Funktionen funktionieren, jedoch gibt es deutliche Verbesserungsmöglichkeiten in der Nutzerfreundlichkeit. Weitere grundsätzliche Entwicklungen ergeben sich in der Kombination mit der Visualisierung von numerischen Simulationen und der Bohrfadplanung.

Das System wurde auf verschiedenen Veranstaltungen eingesetzt und wurde positiv von fachfremden Besuchern aufgenommen. Hier zeigt sich speziell eine Erleichterung des Zugangs zu abstrakten Primärinformationen, d. h. seismischen Daten, ohne dass diese grafisch in Untergrundszensarien umgesetzt werden müssen.

4.3 Literatur

- BALDSCHUHN, R., BINOT, F., FLEIG, S. & KOCKEL, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. – Geologisches Jahrbuch, A 153: 95 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- BOMBIEN, H., HOFFERS, B., BREUCKMANN, S., HELMS, M., LADEMANN, K., LANGE, M., OELRICH, A., REIMANN, R., RIENÄCKER, J., SCHMIDT, C., SLABY, M.-F., ZIESCH, J. (2012): Der Geotektonische Atlas von Niedersachsen und dem deutschen Nordsee-Sektor als geologisches 3D-Modell. –Geowissenschaftliche Mitteilungen 48 (06/2012): 6-13.
- DÖRNER, R., BROLL, W., GRIMM, P. & JUNG, B. (2013): Virtual und Augmented Reality (VR/AR), 351 S., Springer, Berlin, Heidelberg, doi 10.1007/978-3-642-28903-3.
- GEOFONVERSENKMESSUNGEN (2016): GVM und seismische Daten. In: Kohlenwasserstoff-Fachinformationssystem (KW-FIS) des Landesamts für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG). Stand: Nov. 2016.
http://www.lbeg.niedersachsen.de/energie_rohstoffe/erdoel_und_erdgas/
 (Datenabruf zwischen: 10/2015-05/2016).
- Übersicht über Geofonversenkmessungen (GVM) und seismische Daten. In: NIBIS® KARTENSERVEN des Landesamts für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG). Stand: Nov. 2016.
<http://nibis.lbeg.de/cardomap3/?TH=BOHRKW>.
 (Datenabruf zwischen: 10/2015-05/2016).
- HEIDBACH, O., TINGAY, M., BARTH, A., REINECKER, J., KURFEB, D. & MÜLLER, B. (2008): The World Stress Map database release 2008
 doi:10.1594/GFZ.WSM.Rel2008.
- JUNG, R., RÖHLING, S., OCHMANN, N., ROGGE, S., SCHELLSCHMIDT, R., SCHULZ, R. & THIELEMANN, T. (2002): Abschätzung des technischen Potenzials der geothermischen Stromerzeugung und der geothermischen Kraft-Wärmekopplung (KWK) in Deutschland. – Bericht für das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, BGR/GGA, Archiv-Nr. 122 458; Hannover.
- REINHOLD, K., KRULL, P., KOCKEL, F., LUTZ, R. & GAEDICKE, C. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands 1 : 500 000. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR); Berlin.

Danksagung:

Wir bedanken uns bei der ExxonMobil Production Deutschland GmbH (EMPG, ehemals BEB) und dem Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG, ehemals WEG) für die Bereitstellung der Daten zu Forschungszwecken.

5 Bewertung von Störungszonen

5.1 Neuberechnung des geothermischen Potenzials

5.1.1 Arithmetisches Modell

Bei der bisherigen Berechnung des geothermischen Potenzials von Störungszonen (JUNG et al. 2002) wurde mit starken Vereinfachungen gearbeitet. In diesem Projekt wird das Potenzial arithmetisch und numerisch unter differenzierter Berücksichtigung von unterschiedlichen Parametern bestimmt und eine Methode zur Abschätzung von Potenzialen mit Hilfe von numerisch berechneten Koeffizienten vorgestellt.

JUNG et al. (2002) haben zur Berechnung eine Deutschlandkarte mit tiefen Störungssystemen erstellt, von denen sie annahmen, dass die Störungen vertikal 7 km tief reichen und dass die Summe der Längenausdehnung aller Störungen an der Oberfläche (Spur) 20000 km ergibt. Zur Stromgewinnung muss eine Mindesttemperatur von 100 °C angetroffen werden. Diese Temperatur wird unter Bezugnahme auf den geothermischen Gradienten in 3000 Meter Tiefe mit einer Bodentemperatur von 10 °C erreicht. Weiterhin wurden folgende Parameter für das Gestein zur Berechnung verwendet:

t = 100 Jahre Nutzungsdauer	Dichte $\rho_G = 2600 \text{ kg/m}^3$
Auskühlungstiefe d = 340 m	Mindest-Transmissibilität
Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 2,184 \text{ W/(K}\cdot\text{m)}$	$T_{\min} = 2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3 = 2 \text{ D}\cdot\text{m}$
spezifische Wärmekapazität	
$c_G = 840 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$	

Für das Fluid:

Wärmekapazität von 4184 J/(kg·K)
 Dichte von 1000 kg/m³
 Mindest-Fließrate von $Q_{\min} = 50 \text{ m}^3/\text{h} = 14 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 14 \text{ l/s} \approx 14 \text{ kg/s}$

Das Modell wird in vier Tiefenbereiche mit einer Höhe von $h = 1000 \text{ m}$ in die Intervalle 3–4, 4–5, 5–6 und 6–7 km und den mittleren Temperaturen von 115 °C, 145 °C, 175 °C und 205 °C eingeteilt. Die Länge des Modells beträgt $l = 1000 \text{ m}$.

Mit diesen Daten wird das folgende geothermische Potenzial von JUNG et al. (2002) für die elektrische Energie für eine gesamte Störungslänge von 20000 km bestimmt:

Temperatur-klasse	Teufenintervall	Recovery-Faktor	Zur Stromerzeugung nutzbare therm. Energie	Wirkungsgrad Stromerzeugung	Elektrische Energie
[°C]	[km]	[%]	[J]	[%]	[J]
100-130	3–4	2,4	3,6 E+19	10,3	3,8 E+18
130-160	4–5	4,0	7,9 E+19	11,7	9,8 E+18
160-190	5–6	4,6	1,1 E+19	12,6	1,4 E+19
190-220	6–7	5,0	1,4 E+19	13,1	1,9 E+19
Gesamtenergie [J]			3,7 E+20		4,5 E+19
Gesamtenergie [GWa]			1,2 E+04		1,4 E+03

Tab. 5.1: Ergebnisse aus der Studie von JUNG ET AL. (2002). Der Recovery-Faktor bestimmt den förderbaren Energieanteil aus der „Heat in Place“ und der Wirkungsgrad ergibt den in elektrische Energie umwandelbaren Anteil an.

Zur Verbesserung der Potenzialabschätzung wurde die überarbeitete Störungskarte (Abb. 5.1) aus dem Projekt „Geothermie-Atlas“ (FKZ: 0325257A), welche in diesem Projekt weiter optimiert wurde, genutzt. Es wurde eine gesamte Störungslänge von 24363 km ermittelt, welche in diesem Projekt geringfügig auf 24351 km korrigiert wurde.

Für jede der 919 im Geothermie-Atlas ausgewiesenen Störungszonen sind Temperaturprofilschnitte aus dem aktuellen Temperaturmodell von GeotIS erstellt und für Berechnungen, entsprechend der Studie von JUNG et al. (2002), genutzt worden. In einem Abstand von je 100 m Tiefe sind 70 Temperaturwerte pro Schnittpunkt eines Profils aufgenommen und für jeden Wert die „Heat in Place“ nach JUNG et al. (2002) einzeln berechnet worden. Dieses Modell wird im Folgenden differenziertes Temperaturmodell (3D-T.-Modell) genannt. Als Beispiel ist in Abb. 5.2 ein Repräsentant von den 919 Störungen mit 17 Schnittpunkten dargestellt. Durch die differenziertere Bestimmung der förderbaren Wärmeenergie sind größere Abweichungen aufgetreten, die mit zunehmender Tiefe kleiner werden. Das kann damit erklärt werden, dass schon in geringeren Tiefen als 3000 m die 100 °C Grenze überschritten wird und damit insgesamt mehr Wärmeenergie für die Stromgewinnung vorhanden ist.

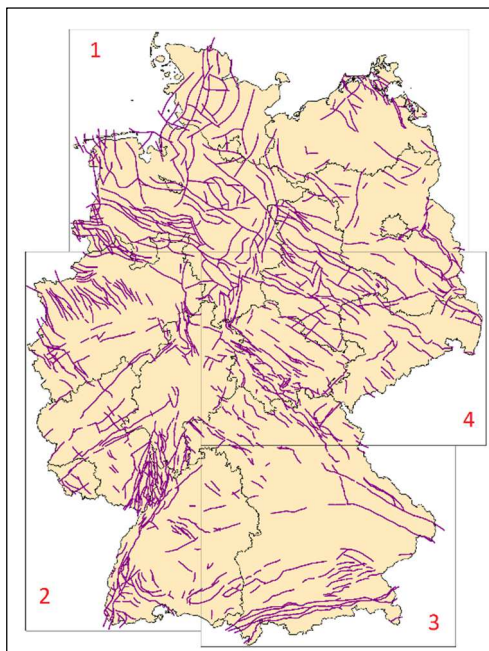


Abb. 5.1: Einteilung der tieferreichenden Störungszonen (siehe Kap. 3.1) in vier Regionen: 1) Norddeutsches Becken, 2) Oberrheingraben, 3) Süddeutsche Molasse, 4) Mitteldeutschland.

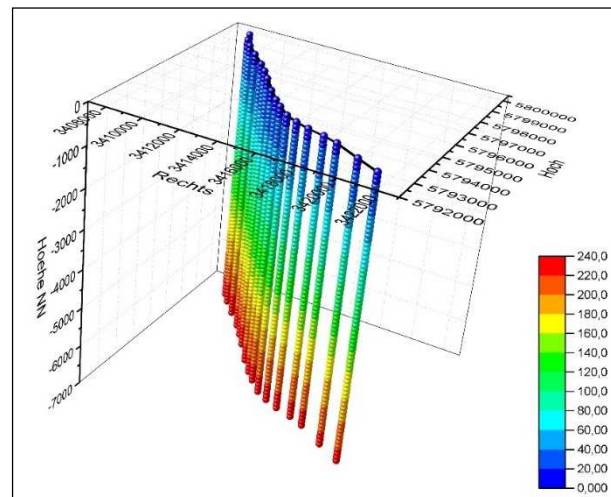


Abb. 5.2: Beispiel eines Temperaturprofils mit Temperaturwerten aus dem GeotIS 3D-Temperaturmodell.

Betrachtet man nur die Wärmeenergie für die oben genannten Tiefenintervalle, Tab. 5.2, dann sind maximal 8 % größere Werte für die „Heat in Place“-Wärmeenergie im Vergleich zu den Rechnungen mit den Durchschnittstemperaturwerten mit Hilfe des Temperaturgradienten (30 K/km) ermittelt worden. Das bedeutet, dass für eine überregionale Betrachtung des geothermischen Potenzials in 3–7 km Tiefe mit 1 km breiten Abschnitten der geothermische Gradient eine ausreichende Genauigkeit zur Berechnung der vorherrschenden Temperatur zur Verfügung stellt.

Teufenintervall	Temperaturklasse	Thermische Energie (Jung)	Thermische Energie _{Jung} l=24363 km	Thermische Energie (3D-T.-Modell)	Energie _{Jung} im Verhältnis zu Energie _{3D-T.-Modell}
[km]	[°C]	[J]	[J]	[J]	[%]
3-4	100-130	1,5 E+21	1,9 E+21	2,1 E21	95
4-5	130-160	2,0 E+21	2,4 E+21	2,6 E21	92
5-6	160-190	2,4 E+21	3 E+21	3,1 E21	97
6-7	190-220	2,8 E+21	3,5 E+21	3,7 E21	95
Gesamtwärmeenergie [J]		8,7 E+21	1,08 E+22	1,14 E+22	95
Gesamtwärmeenergie [GWa]		2,8 E+05	3,4 E+05	3,6 E+05	94

Tab. 5.2: Thermische Energie „Heat in Place“ im Vergleich, nach der Studie von JUNG et al. (2002), mit neuer Störungslänge $l = 24363$ km und differenzierten Temperaturmodell (3D-T.-Modell) mit $l = 24363$.

Für lokale Modelle wiederum kann die genaue Berücksichtigung des Temperaturmodells aber essenziell sein. Als Vorarbeit zur numerischen Ermittlung des geothermi-

$$T_w(z, t) = T_{w0} + (T_{R0} - T_{w0}) \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{K_R \cdot z}{c_w \cdot \rho_w \cdot Q \cdot (a_R \cdot t)^{1/2}} \right)$$

schen Potenzials wurde die Formel von LOWELL (1976) genutzt, um die numerischen Ergebnisse und die Ergebnisse aus der Studie von JUNG et al. (2002) überprüfen zu können. Das Modell ist ein Quader mit einer Bruchfläche von 1 km^2 . Die Breite des Bruches ist vernachlässigbar klein. Die Fluidtemperatur berechnet sich für eine Störung aus der Formel:

mit

$a_R = K_R / \rho_R c_R$ Temperaturleitzahl

L = Auskühlungsbreite

K_R = Wärmeleitfähigkeit des Gesteins

c_R = spezifische Wärmekapazität Gestein,

ρ_R = Dichte Gestein

z = Höhe im Bruch

c_w = spezifische Wärmekapazität Wasser

ρ_w = Dichte Wasser

Q = Volumenstrom pro Einheit Bruchlänge

Dabei wird die geförderte „Heat in Place“-Wärmeenergie in Abhängigkeit von der Förderrate und der Wärmeaustauschfläche berechnet. Abb. 5.3 zeigt, dass die Annahme einer Wärmeförderung, berechnet mit den Parametern des 3D-T.-Modells, für die Stromgewinnung und einer Betriebszeit 100 Jahre nur mit einer Schüttung von 14 l/s erreichbar ist. Bei einer höheren Förderrate fällt die Produktionstemperatur $T_w(z, t)$ unter 100 °C und verstößt gegen die Annahme, dass Strom nur mit Temperaturen $\geq 100 \text{ °C}$ produziert werden kann.

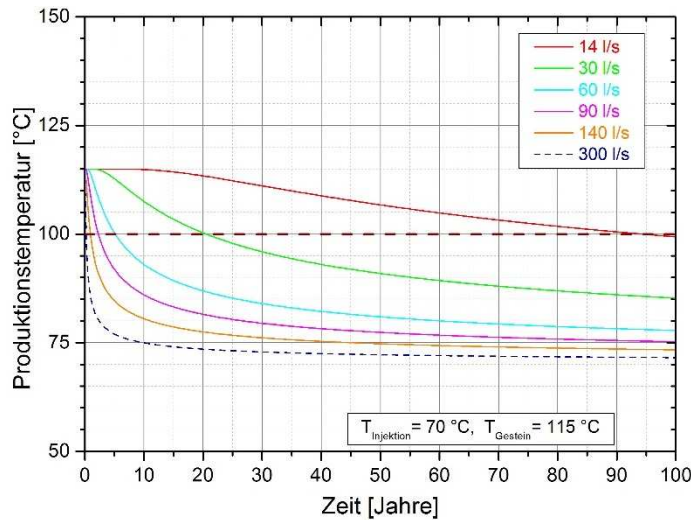


Abb. 5.3: Berechnete Fördertemperatur nach LOWELL (1976) mit unterschiedlichen Schüttungsraten und den Parametern nach JUNG et al. (2002): c_G = spezifische Wärmekapazität (840 J/kg·K), ρ_G = Dichte (2600 kg/m³) und der Störungslänge = 24363 km.

Für Stromgewinnung nutzbare Energie			
Temp. klasse	Teufen	Energie 3D-T-Modell	Energie Lowell
[°C]	[km]	[J]	[J]
100 - 130	3 - 4	4,8 E+19	1,7 E+20
130 - 160	4 - 5	1 E+20	2,8 E+20
160 - 190	5 - 6	1,4 E+20	3,9 E+20
190 - 220	6 - 7	1,9 E+20	5,0 E+20
Gesamtenergie [J]		4,8 E+20	1,34 E+21
Gesamtenergie [GWa]		1,5 E+04	4,2 E+04

Tab 5.3: Vergleich der aus zwei unterschiedlichen Modellen berechneten zur Stromerzeugung nutzbaren Energie, aus den tiefen Störungssystemen Deutschlands.

Tab. 5.3 zeigt die für Stromgewinnung nutzbare Energie zweier Modelle zum Vergleich. Das mit den Algorithmen der Studie von JUNG et al. (2002) und der differenzierteren Temperaturbestimmung berechnete 3D-T-Modell ergibt ca. 1/3 der für Stromgewinnung nutzbaren Gesamtenergie von ca. $1,5 \cdot 10^4$ GWa im Verhältnis zu der mit der Formel von LOWELL (1976) berechneten Gesamtenergie von ca. $4,2 \cdot 10^4$ GWa. Der Recovery-Faktor (s. Tab. 5.1) hängt u. a. von der Temperatur ab, daher sind die Energiewerte_{3D-T-Modell} für Verstromung \neq Recovery-Faktor_{Tab. 5.1} * Thermische Energie_{3D T.-Modell}. Außerdem verdeutlicht die Abb. 5.3, dass bei deutlich höheren Schüttungsraten als 14 l/s die zur Stromerzeugung angenommene Mindesttemperatur von 100°C bei einer Laufzeit von 100 Jahren unterschritten wird. Die Studie von JUNG et al. (2002) schätzt die Größe des geothermischen Potenzials von Störungszonen eher niedriger ein.

5.1.2 Numerisches Modell

Das generelle Problem bei der Berechnung des geothermischen Potenzials von Störungen von ganz Deutschland ist der Grad der Verallgemeinerung sowie die ungenügende Datenbasis. In der Modellannahme werden deshalb die Störungssysteme, d. h. Störungszone, Störungskern und Umgebungsgestein (Abb. 3.9), auf eine blackboxartige Störungszone, Abb. 5.4, reduziert, deren Parameter die Eigenschaften der Störung als Gesamtheit repräsentieren soll. Des Weiteren wurde Deutschland in vier Regionen, (Abb. 5.1), in das Norddeutsche Becken (1) mit 7687 km Störungslänge, in den Oberrheingraben (2) mit 7337 km, in die Süddeutsche Molasse (3) mit 2989 km und Mitteldeutschland (4) mit 6338 km eingeteilt, um Porositäts-, Permeabilitätsdaten und Störungslängen für die Regionen festzulegen. Dafür wurden die Bohrkern-daten aus der GeotIS-Datenbank ausgewertet. Für die Tiefenintervalle, für die keine Daten vorlagen, wurden die Werte des vorhergehenden Intervalls übernommen. Dieser Mangel an Daten ermöglicht es aber, den Einfluss der erhöhten Temperatur und des Anfangsdruckes in zunehmender Tiefe zu beobachten. Unter der Annahme, dass das Umgebungsgestein der Regionen nicht undurchlässig ist, wurden Permeabilität

und Porosität der Gesteinsmatrix der Grenze der unteren 25%, Perzentil 25, gleichgesetzt. Für die Werte der Modellstörungszonen wurde das Perzentil 95, siehe Tab. 5.4 und Tab. 5.5 gewählt. Sie korrespondieren gut mit den Werten aus CHERUBINI et al. (2014), MOECK (2014), NOACK et al. (2010) und SULZBACHER et al. (2005).

Tiefe (km)	Region 1 Norddeutschland				Region 2 Oberrheingraben			
	Matrix (Perz. 25)		Störung (Perz. 95)		Matrix (Perz. 25)		Störung (Perz. 95)	
	Perm (D)	Poro auf 1	Perm (D)	Poro auf 1	Perm (D)	Poro auf 1	Perm (D)	Poro auf 1
3-4	0,0000289	0,018	0,0285	0,22	0,00001	0,014	0,00046	0,124
4-5	0,00002	0,022	0,0217	0,152	0,00001	0,014	0,00046	0,124
5-6	0,000017	0,027	0,021	0,144	0,00001	0,014	0,00046	0,124
6-7	0,000001	0,005	0,00056	0,05	0,00001	0,014	0,00046	0,124

Tab. 5.4: Permeabilitäts- und Porositätsdaten für die Störungssysteme der Region Norddeutschland und Oberrheingraben für das Umgebungsgestein (Matrix) und die Störungszone (Störung).

Tiefe (km)	Region 3 Süddeutsche Molasse				Region 4 Mitteldeutschland			
	Matrix (Perz. 25)		Störung (Perz. 95)		Matrix (Perz. 25)		Störung (Perz. 95)	
	Perm (D)	Poro auf 1	Perm (D)	Poro auf 1	Perm (D)	Poro auf 1	Perm (D)	Poro auf 1
3-4	0,000009	0,017	0,71	0,172	0,000011	0,019	0,035	0,134
4-5	0,000085	0,026	0,064	0,135	0,0000121	0,029	0,0052	0,117
5-6	0,000085	0,026	0,064	0,135	0,0000121	0,029	0,0052	0,117
6-7	0,000085	0,026	0,064	0,135	0,0000121	0,029	0,0052	0,117

Tab. 5.5: Permeabilitäts- und Porositätsdaten für die Störungssysteme der Region Süden und Mitteldeutschland für das Umgebungsgestein (Matrix) und die Störungszone (Störung).

Die Grundidee besteht darin, in Anlehnung an die arithmetische Berechnung, für diese vier Regionen Modelle mit dem Programmsystem COMSOL® für die Teufen von 3 bis 7 km zu erstellen. Die Längen und Höhen der Störungen betragen jeweils 1000 m, die Störzonen sind 20 Meter breit. Der Modelkubus hat das Volumen von 1 km³ (Abb. 5.4). Die Parameter die zur Berechnung der geothermischen Energie für eine Laufzeit von 50 Jahren in die Modelle eingehen, werden variiert, damit eine Vielzahl von möglichen geologischen Zuständen abgeschätzt werden können.

Die Laufzeit wurde auf 50 Jahre im Vergleich zur arithmetischen Berechnung verkürzt, damit eine Mindesttemperatur von 100 °C auch mit höheren Fließraten (15 kg/s, 60 kg/s, 100 kg/s) überhaupt erreicht werden kann. Ein Beispielmodell zeigt Abb. 5.5, der Fluss wird in kg/s angegeben, um unabhängig von der temperatur- und druckabhängigen Volumenänderung des Fluids zu sein. Aus diesen Variationen, siehe Tabellen im Anhang, wird dann das geothermische Potenzial für Deutschland bestimmt. Aus der Vielzahl von geologischen Zuständen kann man z. B. bei der lokalen Potenzialabschätzung die geeignete Kombination von Parametern für das eigene Untersuchungsgebiet auswählen und erhält dadurch die zugehörige berechnete Potenzialabschätzung.

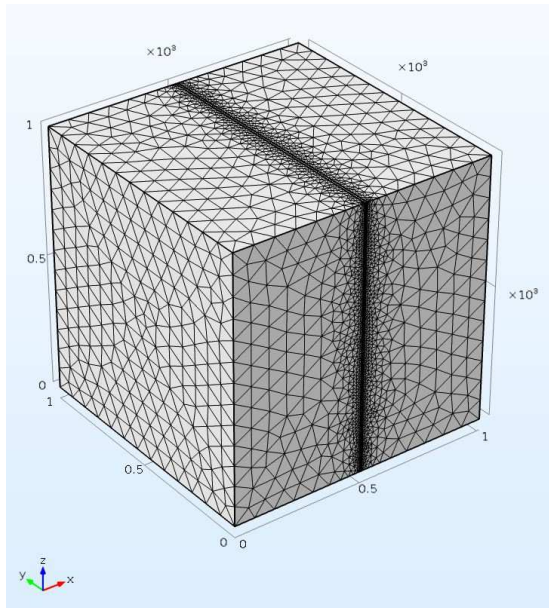


Abb. 5.4: COMSOL® Gitternetzmodell einer 20 m breiten Störungszone mit der Annahme, dass Störungszone und Störungskern eine Blackbox sind und mit vereinheitlichten Parametern beschrieben werden können.

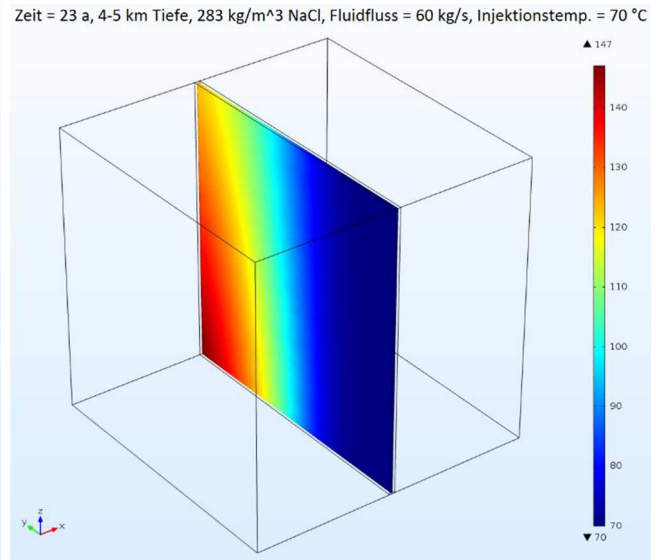


Abb. 5.5: Temperaturverteilung in einer 20 m dicken Störungszone im ORG nach 23 Jahren, mit Gesteinsdichte = 2700 kg/m^3 , spez. Wärmekapazität = $900 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ und spez. Wärmeleitung = $1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Die Temperatur im Modell wird mit Celsius angezeigt.

In die Berechnung gehen für das Fluid folgende Parameter ein:

- Anfangsdruck und Fluidichte des Modells in Abhängigkeit der Tiefe, der Temperatur (30 K/km) und der Salzkonzentration von 0, 130 oder $283 \text{ kg NaCl pro m}^3$. Iterativ berechnet nach ROWE & CHOU (1970). Für das Molassebecken z. B. wurden nur Modelle mit 0 oder 130 kg/m^3 Salz berechnet, obgleich ein Salzgehalt von 130 kg pro m^3 zu hoch ist. Aber um eine Betriebsdauer von 50 Jahren in einer Tiefe von 3-4 km zu erreichen, muss man diesen Wert nehmen, denn nach den Berechnungen ist in dieser Tiefe mit einem Salzgehalt von 0 kg/m^3 nur eine Betriebsdauer von 40 Jahren möglich, vgl. Tabelle im Anhang.
- Fluidichte in Abhängigkeit von den berechneten Modelltemperaturen, dem Anfangsdruck und des Salzgehaltes. Aufgrund der Dichteberechnung wird der Kompressionseffekt auf die Flüssigkeit ausreichend berücksichtigt.
- Viskosität in Abhängigkeit von dem Anfangsdruck, den berechneten Modelltemperaturen und des Salzgehaltes nach MEEHAN (1980).
- spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit von den Modelltemperaturen und des Salzgehaltes nach PHILLIPS et al. (1981).
- spezifische Wärmeleitfähigkeit des Fluides in Abhängigkeit von den Modelltemperaturen und des Salzgehaltes nach PHILLIPS et al. (1981). Für einen Salzgehalt von 283 kg/m^3 konnte nur eine Kennlinie für 19 % ($\sim 217 \text{ kg/m}^3$) erstellt werden, d. h. die Leitfähigkeit wird geringfügig etwas überschätzt.

Die Bestimmung der Parameter der Gesteine gestaltet sich schwieriger. Die Spannbreite der Werte ist sehr groß und hängt unter anderem von der Porosität, der Porenfüllung, der Temperatur und dem Druck ab. Nach EPELBAUM et al. (2014) kann diese Bandbreite bei Anwendung von Durchschnittswerten zu signifikanten Fehlern bei geo-

thermischen Berechnungen führen. Sie empfehlen u. a. die Verwendung von Daten von lokalen Gesteinen. Aus diesem Grund werden die Parameter nicht für einzelne Gesteine genommen, sondern die Werte der Parameter werden so variiert und die Modelle in verschiedenen Kombinationen berechnet, dass sie möglichst die Wertespannbreite der Gesteine abdecken, siehe ČERMÁK et al. (1982), d.h.

- Gesteinsdichte: 2,2; 2,7; 3,0 kg/m³.
- spezifische Wärmekapazität 700; 900; 1100 J/kg·K,
- spezifische Wärmeleitfähigkeit 1; 2,5; 5 W/ kg·K.

Die Ergebnistabellen für die geothermische Energie für Störungszonen der unterschiedlichen Regionen und Teufen befinden sich im Anhang.

Ergebnisse für die geothermische Potenzialabschätzung der Störungszonen in Deutschland

Das theoretische geothermische Potenzial der Störungen in Deutschland für eine Betriebsdauer von 50 Jahre beträgt $9,53 \cdot 10^{20}$ J bei Annahme eines, Fluidflusses von 15 kg/s und einem Salzgehalt von 130 kg/m³. Es ist damit 1,24 mal größer als die arithmetisch abgeschätzte Energie_{Lowell} = $7,68 \cdot 10^{20}$ J für 50 Jahre. In Tab 5.6 sind die verwendeten Ergebnisse für die einzelnen Teufenintervalle und Regionen aufgeführt. Die Koeffizienten sind den Tabellen im Anhang entnommen worden. Die Parameter der Gesteine sind in der Tabelle durch Ziffern repräsentiert und den Regionen vorangestellt. Die Energie wird in Petajoule (1 PJ = 10¹⁵ Joule) angegeben. Die berechnete Energie wird mit dieser Methode höher abgeschätzt, als mit den Methoden aus den vorherigen Abschnitten. Dies geht aber Hand in Hand mit einem höheren Aufwand und der Berücksichtigung von mehr Parametern einher. Durch die Aufstellung der Tabellen mit den berechneten Energiekoeffizienten, siehe Anhang, können jedoch unter Berücksichtigung vieler Parameter die Ergebnisse für individuelle lokale geologischen Situationen einfach abgelesen werden.

- (1) Dichte 2200 kg/m³, spez. Wärmekapazität 700 J/(kg·K), Wärmeleitkoeffizient 1 W/(m·K)
 (2) Dichte 2700 kg/m³, spez. Wärmekapazität 900 J/(kg·K), Wärmeleitkoeffizient 1 W/(m·K)
 (3) Dichte 2700 kg/m³, spez. Wärmekapazität 700 J/(kg·K), Wärmeleitkoeffizient 2,5 W/(m·K)
 (4) Dichte 3000 kg/m³, spez. Wärmekapazität 900 J/(kg·K), Wärmeleitkoeffizient 5 W/(m·K)
 Fluidfluss (Fl.) in [kg/s], Injektionstemp. = 70 °C, Produktionstemp. \geq 100 °C für x Jahre [a]

Salz 130 kg				
Teufe 3-4 km	Fl. 15	a	Störungslänge (km)	Regionale Energie (PJ)
	Energie (PJ)			
(1) Region 1	4,43	50	7687	34053,41
(1) Region 2	4,81	50	7337	35290,97
(1) Region 3	4,39	50	2989	13121,71
(1) Region 4	4,41	50	6338	27950,58
Teufe 4-5 km				
(2) Region 1	8,01	50	7687	61572,87
(2) Region 2	8,13	50	7337	59649,81
(2) Region 3	9,15	50	2989	27349,35
(2) Region 4	8,04	50	6338	50957,52
Teufe 5-6 km				
(3) Region 1	11,3	50	7687	86863,1
(3) Region 2	11,5	50	7337	84375,5
(3) Region 3	11,37	50	2989	33984,93
(3) Region 4	11,39	50	6338	72189,82
Teufe 6-7 km				
(4) Region 1	15,01	50	7687	115381,87
(4) Region 2	15,01	50	7337	110128,37
(4) Region 3	15,01	50	2989	44864,89
(4) Region 4	15,00	50	6338	95070
Gesamtenergie für 50 Jahre				9,528047·10²⁰ J

Tab. 5.6: Das geothermische Potenzial der Störungszonen für ganz Deutschland unterteilt in Regionen und Teufen für 50 Jahre.

Literatur:

- CHERUBINI, Y., CACACE, M., SCHECK-WENDEROTH, M. & NOACK, V. (2014): Influence of major fault zones on 3-D coupled fluid and heat transport for the Brandenburg region (NE German Basin). *Geothermal Energy Science*, 2, S. 1-20.
- CZERMAK, V.; HUCKENHOLZ, H. G.; RYBACH, L.; SCHMID, R.; SCHOPPER, J. R.; SCHUCH, M.; STÖFFLER, D. & WOHLBERG, J. (1982): Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik, Neue Serie, Gruppe V: Geophysik und Weltraumforschung, Band 1, Physikalische Eigenschaften der Gesteine, Teilband a, Springer-Verlag Berlin.
- EPPELBAUM, L., KUTASOV, I. & PILCHIN, A. (2014): *Thermal Properties of Rocks and Density of Fluids. Applied Geothermics*. Heidelberg, Springer-Verlag Berlin: 99-149.
- GRINGARTEN (1975): "Theory of Heat Extraction From Fractured Hot Dry Rock"; *Journal of Geophysical Research*, Vol.80, No. 8
- JUNG, R., RÖHLING, S., OCHMANN, N., ROGGE, S., SCHELLSCHMIDT, R., SCHULZ, R., THIELEMANN, T. (2002): Abschätzung des technischen Potenzials der geothermischen Stromerzeugung und der geothermischen Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in Deutschland. Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (Hannover); Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hannover); Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart.
- LOWELL (1976): Comments on "Theory of Heat Extraction From Fractured Hot Dry Rock"; *Journal of Geophysical Research*, Vol. 81, No. 2
- MEEHAN, D. N. (1980): A Correlation For Water Viscosity. *Petroleum Engineer International*, July 1980.

- MOECK, I. S. (2014): Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, S.867-882.
- NOACK, V., CHERUBINI, Y., SCHECK-WENDEROTH, M., LEWERENZ, B. HÖDING, T., SIMON, A. & MOECK, I. (2010): Assessment of the present-day thermal field (NE German Basin)-Inferences from 3D modelling. *Chemie der Erde*, 70, S3, S. 47-62.
- PHILLIPS, S. L., IGBENE, I., FAIR, J. A.; OZBECK, H. & TAVANA, M. (1981): A Technical Databook for Geothermal Energy Utilization. Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, LBL-12810, Berkley.
- ROWE, A & CHOU, J. (1970): Pressure-Volume-Temperature-Concentration Relation of Aqueous NaCl Solutions. *Journal of Chemical and Engineering Data*, Vol. 15, No. 1, S. 61-66.

6 Erweiterung der Datengrundlage und der Dateninfrastruktur

6.1 Entwicklung neuer Visualisierungs-Algorithmen für geologische Profilschnitte in GeotIS

Die interaktive Darstellung von geologischen Karten und Schnitten war von Beginn an eine der wichtigsten Funktionen des geothermischen Informationssystems (GeotIS). Grundlage der verwendeten Technik sind vom LIAG entwickelte und in Java programmierte Algorithmen, die aus orthogonalen 2½D Gitterflächen (2DGRID) georeferenzierte Bilder von Schnitten und Aufsichten generieren. Neben der Darstellung der Tiefenlage und Verbreitung geologischer Flächen kann auch der Temperaturverlauf auf Flächen und Schnitten dargestellt werden. Die Rasterdaten von max. 20 x 20 km großen Teilstücken geologischer Flächen (Kacheln) und die 3D-Rasterdaten der Untergrundtemperaturen werden über eine relationale Datenbank bereitgestellt. Allerdings hat diese Technik auch Nachteile. So können keine Aufschiebungen oder überkippte Strukturen dargestellt werden, da die Matrix einer 2½D Gitterfläche für jedes Koordinatenpaar (x, y) nur einen Tiefenwert (z) beinhalten kann. Auch enthält diese Datenstruktur keine Informationen über Störungen oder andere Grenzflächen. Diese Informationen werden in ESRI-Shape-Dateien gehalten und auf die interaktiv generierten Abbildungen projiziert.

Um die Funktionalität der interaktiven Schnitte und Aufsichten zu verbessern, wurden in diesem Projekt neue Visualisierungs-Algorithmen entwickelt, die nicht mehr nur orthogonale 2½D-Gitter sondern auch stratigraphische Volumengitter verarbeiten können. Geothermische Nutzhorizonte und Störungen können damit viel besser dargestellt werden. Aufschiebungen und komplexe Störungsflächen sind erst mit dieser neuen Technik darstellbar. Außerdem ermöglicht diese Technik Reservoirparameter (z. B. Fazies, hydraulische Durchlässigkeit etc.) mit 3D-Raumbezug in GeotIS zu integrieren. Die neuen Algorithmen setzen dabei auf das von der Software GOCAD/SKUA® verwendete Datenformat für stratigraphische Gitter (SGRID) auf. Hierbei werden alle wesentlichen Daten und Objektinformationen in zwei ASCII-Dateien und einer Binärdatei gespeichert. In GeotIS werden diese Daten in eine für die Visualisierung im Internet ideale Struktur gebracht und in einer Datenbank abgelegt.

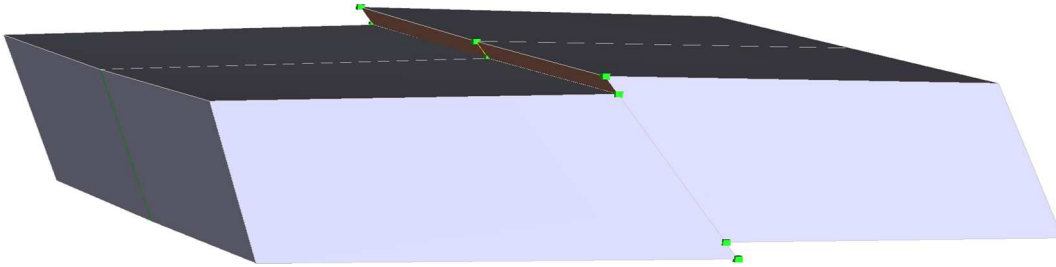


Abb. 6.1: SGRID aus vier Hexaedern (Zellen), die entlang einer Trennfläche gegeneinander versetzt wurden.

Ein SGRID-Volumenmodell besteht aus einer Vielzahl kleiner, beliebig geformter Hexaeder, die auch noch parametrisiert sein können (Abb. 6.1). Dabei werden Gesteinskörper nicht nur durch Basis- und Topflächen definiert, sondern auch durch weitere Grenzflächen wie z. B. Salzstöcke oder Störungen. Diese Grenzflächen werden dabei explizit als Teil des Volumengitters betrachtet und gespeichert. Der Detaillierungsgrad hängt maßgeblich von der Größe der Hexaeder ab. Anders als bei einem starren, orthogonalen Gitter (wie z. B. beim 3D-Temperaturmodell), kann die Größe der Zellen nicht direkt vorgegeben werden. Nur über die laterale Rasterweite und die Anzahl der Lagen kann indirekt der mögliche Detaillierungsgrad verändert werden. Beim SGRID-Modell von Hessen (Abb. 6.2) liegen die Volumina der Hexaeder zwischen 0 und 0,014 km³ bei einer mittleren Rasterweite von ca. 500 m.

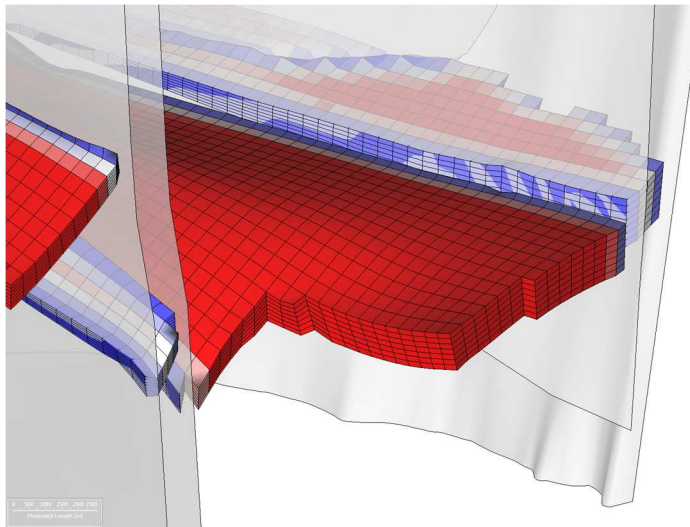


Abb. 6.2: Teilausschnitt eines SGRID-Modells vom Buntsandstein im nördlichen Oberrheingraben, Darstellung in Gocad/Skua®. In diesem Beispiel wurden die Zellen entsprechend ihrer Distanz zur nächsten Störung parametrisiert und farblich dargestellt.

Ein Nachteil der SGRIDs ist, dass der Detaillierungsgrad bei geringer Schichtmächtigkeit und für bestimmte tektonische Phänomene (z. B. Blumenstruktur) lokal unnötig hoch sein kann. Der Vorteil, geologische Strukturen, wie z. B. Abschiebungen oder Aufschiebungen, ohne Kompromisse abbilden zu können, überwiegt jedoch diesen Nachteil bei weitem. Im Gegensatz zu starren, orthogonalen Gittern entstehen in der Darstellung auch keine Treppenstufen, da die Ecken der Hexaeder auch unabhängig von angrenzenden Hexaedern im Raum verschoben werden können. Damit können die Gitterpunkte (Knoten) im SGRID an Störungen oder Horizontflächen angepasst werden. Für jeden Knoten mit dem Index-Triplet (u, v, w) werden daher zusätzlich die Koordinaten (x, y, z) gespeichert. Über die Indizierung der Knoten können die für einen

Vertikalschnitt benötigten Hexaeder gezielt abgerufen werden, was für eine schnelle Visualisierung wichtig ist.

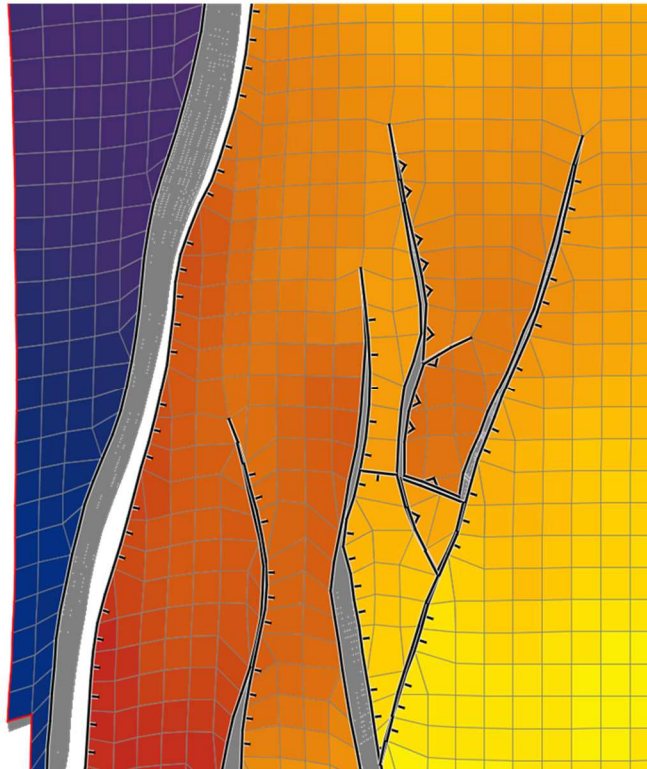


Abb. 6.3: Darstellung der Temperatur des Rotliegend-Horizonts im nördlichen Oberrheingraben auf Basis eines SGRID-Modells mit neuem Visualisierungs-Algorithmus. Der Algorithmus differenziert automatisch zwischen Auf- und Abschiebungen.

Die Abb. 6.3 zeigt an einem Beispiel aus dem Oberrheingraben das Resultat der Horizonttemperaturdarstellung durch die neuen Visualisierungsklassen ohne Nachbearbeitung. Die Umriss der Hexaeder sind als graues Gitter zu erkennen. Störungen werden durch schwarze Linien dargestellt, wobei Auf- und Abschiebungen unterschiedlich dargestellt werden. Die rote Linie am linken Rand markiert die Modellgrenze. Abb. 6.4 zeigt an einem weiteren Beispiel aus dem Oberrheingraben das Resultat der Vertikalschnittdarstellung durch die neuen Visualisierungsklassen ohne Nachbearbeitung. Hier sind die Hexaeder durch dünne schwarze Linien dargestellt. Die Störungsflächen sind durch rote Linien markiert.

Die neu entwickelten Visualisierungs-Algorithmen werden im Folgeprojekt „GeoFaces“ an die Anforderungen des Produktivsystems von GeotIS angepasst und implementiert.

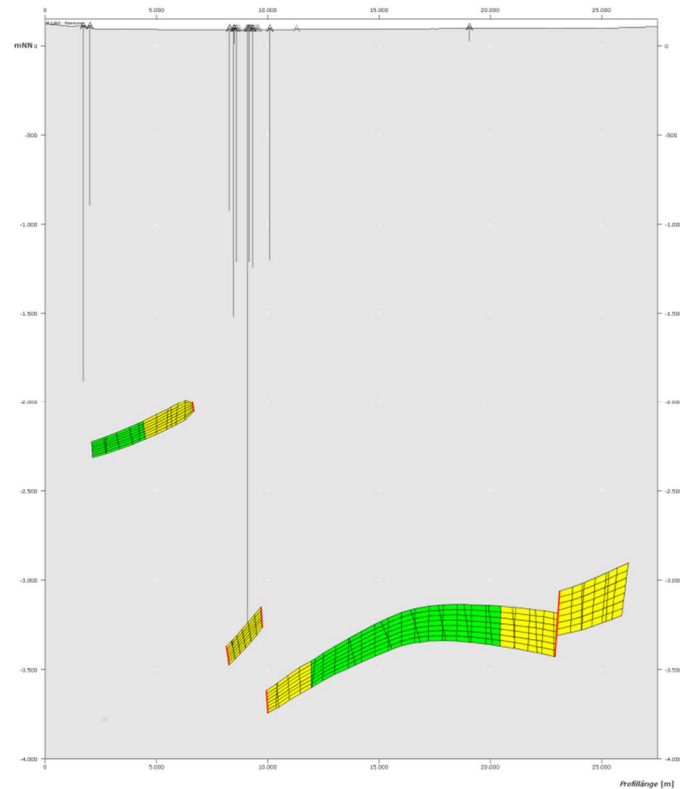


Abb. 6.4: Darstellung eines E-W ausgerichteten Vertikalschnitts im nördlichen Oberrheingraben auf Basis eines SGRID-Modells mit neuem Visualisierungs-Algorithmus. Auch in diesem Beispiel wurden die Zellen entsprechend ihrer Distanz zur nächsten Störung parametrisiert und farblich dargestellt.

6.2 Erweiterung und Anpassung des GeotIS

6.2.1 Allgemeines

Die Software-Entwicklung spielte innerhalb des Projektes wieder eine große Rolle, im Antragszeitraum wuchs der Programmcode (Java, JavaScript, PHP, HTML, CSS) durch Verbesserungen und Erweiterungen auf ca. 200.000 Zeilen. Dies beinhaltet die Webanwendung sowie die zahlreichen Werkzeuge zur Konvertierung und Darstellung der Daten.

Die grundlegende Architektur der GeotIS-Web-Anwendung wurde bereits in SCHULZ et al. (2013) beschrieben. Für die Weiterentwicklung der Anwendung und Bearbeitung der internen Arbeitsdaten wurde zusätzlich zu den vorhandenen Software-Werkzeugen Visual Studio für die PHP-Interpreter, Mapserver- und Mapscript-Kompilierung eingesetzt. Das Projekt wurde damit unabhängig von unregelmäßig erscheinenden und oft veralteten Mapserver- und Mapscript-Binär-Distributionen.

Bei den Datenbankservern fanden zwei Migrationen statt: ausgehend von Microsoft SQL-Server Version 2008 R2 auf Version 2012 und später auf Version 2014. PHP wurde auf den Zweig 5.6 und Mapserver auf Version 6.4 gebracht. Im Bereich der Java-Programmierung wurde auf Java 8 umgestellt, die Server von Tomcat 6 auf Tomcat 8 migriert und damit die Java Enterprise Edition 7 eingeführt.

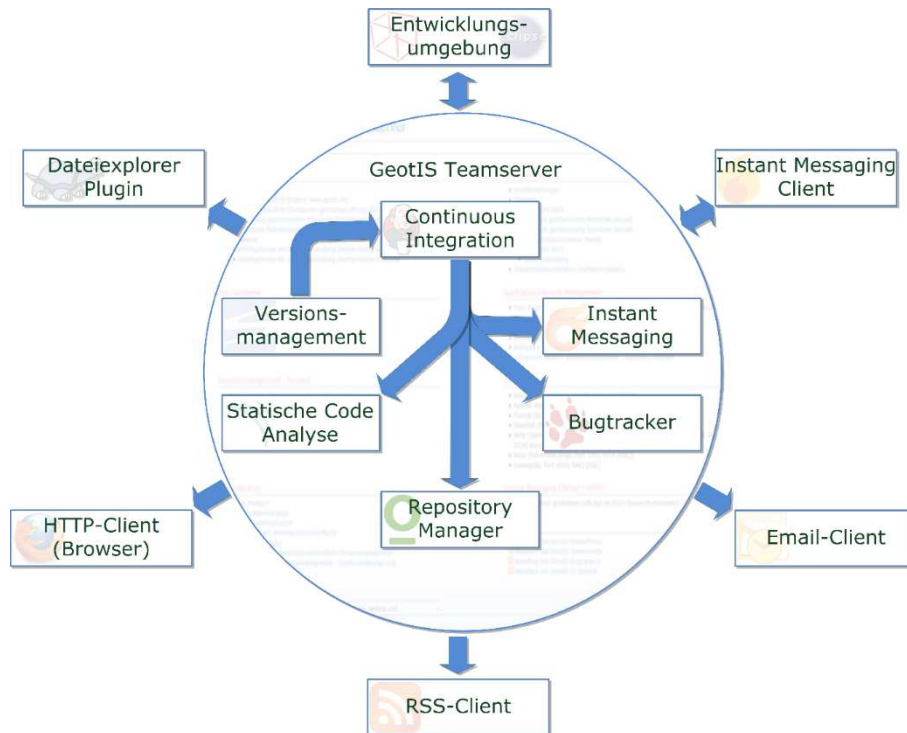


Abb. 6.5: Infrastruktur für die Software-Entwicklung

Die Infrastruktur zur Unterstützung der Software-Entwicklung (Abb. 6.5) wurde um zwei wichtige Komponenten erweitert: Die eine ist eine Plattform für die statische Codeanalyse (Sonarqube). Sie analysiert Java-, JavaScript- und PHP-Quellcode hinsichtlich verschiedener Qualitätskriterien bzw. Regeln und stellt die Ergebnisse browserbasiert dar, zusätzlich enthält sie Schnittstellen für die Entwicklungsumgebungen (Netbeans, Eclipse). Die andere ist ein sogenannter Repository-Manager (Artifactory) für Binärdaten. Nach der Umstellung auf Maven als Build-Management-System für die Java-Programmentwicklung lassen sich damit Abhängigkeiten leicht auflösen und es wird sichergestellt, dass alle Entwickler und der Continuous-Integration-Server des Projektes auf die gleichen Software-Bibliotheken zugreifen.

Die Datenbasis des Informationssystems wurde in halbjährlichen bis jährlichen Abständen überprüft und bei Bedarf mit neuen Daten aus folgenden Datensammlungen erweitert:

- Datenbankauszüge aus dem Kohlenwasserstoff-Fachinformationssystem (KW-FIS) des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) entsprechend der Vereinbarung mit dem Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie (BVEG e.V., ehemals WEG);
- Untergrundtemperaturen sowie Porositäts- und Permeabilitätsdaten aus dem Fachinformationssystem Geophysik (FIS GP) des LIAG;
- Jährliche Datenabfragen geothermischer Standorte (Wärme und Stromerzeugung) im Rahmen des GeotIS-Projektes;
- Einmalige Übernahme der im Rahmen des abgeschlossenen Geothermieatlas-Projektes gesammelten Daten zu tiefreichenden Störungen (SCHULZ et al. 2013, SUCHI et al. 2014).

6.2.2 Webanwendung, Datenbankstruktur und Software-Werkzeuge: Erweiterungen und Anpassungen

Anpassung und Erweiterung der GeotIS-Datenbankstruktur

Die wichtigste Erweiterung der Datenbankstruktur war die Schaffung eines neuen Subsystems für die Speicherung der Störungsdaten aus dem Bereich „Attributierung von Störungszonen“ (Kap. 3.1) im Datenmodell der GeotIS-Anwendung (25 neue Tabellen). Weitere Optimierungen zur Steigerung (Performance) und Effizienz der Datenbank - fanden im Bereich der Bohrlochdaten und, durch gespeicherte Prozeduren, für die Jahresstatistik der geothermischen Standorte statt.

Um eine bessere Vergleichbarkeit von Daten von Saigerteufen- zwischen der GeotIS-Datenbank und der des Fachinformationssystems Geophysik zu erreichen, wurden die Algorithmen zu ihrer Berechnung aufeinander abgestimmt. Die entwickelte Software ermöglicht durch einfache Integration von Softwaremodulen (sog. Plugins auch den Einsatz anderer Algorithmen für besondere Anwendungszwecke.

Aufnahme neu gewonnener Daten aus dem Bereich „Attributierung von Störungszonen“ und ihre Präsentation als Webservice

Für die Datenübernahme aus der proprietären Endnote®-Datenbank (Kap. 3.1) musste der Inhalt als XML-Dateien exportiert werden. Bei der Überführung dieses Formates in die GeotIS-Datenbank wurde XML-Datenbindung eingesetzt, d. h., die XML-Objekte wurden automatisch in Java-Objekte umgewandelt, die Inhalte anschließend transformiert und als neue Objekte mittels der Java Persistence API (JPA) in die Datenbank geschrieben („persistiert“). Das Persistieren von Objekten in eine Datenbank wird als objektrelationale Abbildung (ORM) bezeichnet. Die Shapefiles (Geometriedaten und Attribute der Störungen) wurden mit Hilfe von GeoTools, einer freien GIS-Bibliothek für Java, gelesen und konvertiert. Das Schreiben in die Datenbank erfolgte wiederum mittels JPA.

Die Präsentation dieser Daten wurde als Webservice realisiert, der die Daten im GeoJSON-Format ausliefert. Ihre Darstellung erfolgt in der Webanwendung als Kartenebene, zusätzlich lassen sich zu jeder Störungzone verschiedene Metadaten, Daten und Literaturangaben darstellen. Eine Abbildung dazu ist in Kap. 3.1 zu sehen.

Zur Realisierung dieses Webservices wurde eine Vielzahl von Techniken angewandt: Datenbindung zur Erzeugung des Ausgabeformats GeoJSON, JPA zum Erzeugen der Objekte aus der Datenbank, massives verteiltes Caching (realisiert mit Infinispan) zur Verminderung der Datenbank-Zugriffe und zur Steigerung des Durchsatzes, sowie Java API for RESTful Services (JAX-RS) als Basis für den Webservice. Die Zusammenarbeit dieser Komponenten wurde mittels CDI (Contexts and Dependency Injection) realisiert, d. h. sie sind lose gekoppelt und die Konfiguration von Objekten wird durch die Injektion von Abhängigkeiten ermöglicht.

Zusammenlegung der ursprünglich in der Benutzerschnittstelle getrennten Bereiche „geothermische Standorte“ und „geothermische Potentiale“

Die Zusammenlegung und Überarbeitung der beiden ursprünglich getrennten Module „Geothermische Standorte“ und „Geothermische Potentiale“ in einer einzelnen Kartendarstellung ist ein wesentliches Ergebnis des Projektes. Besonders hervorzuheben ist dabei der Einsatz von OpenLayers als modernes JavaScript-Framework zur Kartendarstellung. Die Karteninhalte werden zwar noch überwiegend vom Mapserver erzeugt, OpenLayers ermöglicht jedoch eine verstärkte clientseitige Entwicklung, in dem es typische Webmapping Elemente bereitstellt. Dadurch lassen sich einzelne Kartenebenen auch clientseitig einbinden, ein Beispiel dafür ist die Darstellung der weiter oben bereits erwähnten Störungszonen.

Anpassung und Erweiterung des Systems

Für die Darstellung der Jahresstatistiken geothermischer Standorte wurden Methoden erarbeitet um die zeitliche Entwicklung der Daten besser visualisieren zu können. Dem Benutzer wird ein hohes Maß an Interaktivität eingeräumt, Zeiträume und/oder Nutzungsarten können individuell ausgewählt werden.

GeotIS Informationen zu Bohrung Arendsee 10		
ID_1_11	64300330100	
Ansatz Nummer	1	
Rechtswert	3665699 m	
Hochwert	5862217 m	
Ansatzhöhe	33 müNN	
Endteufe ³	4338 muGOK	
Bohrungszeitraum	1982	
Verwendungszweck	Gas/Ölbohrung	
Temperatur	Messwerte vorhanden	
Temperaturmessung	BHT-Messungen mit zwei Werten in einer Tiefe	
Hydraulische Tests	Messwerte vorhanden	
Profilanzahl	1	
max. Profilteufe	4338 muGOK	
Geophysikalische Logs	keine Angaben	
3D-Modell	Modellgebiet Nordostdeutschland; angetroffene Modellhorizonte: <ul style="list-style-type: none"> ■ Unterkreide (Bückerberg-Formation bis Alb) ■ Mittl. Buntsandstein (Detfurth bis Solling) 	
Staat	Deutschland	
Bundesland	Sachsen-Anhalt	
Topographische Karte 1:25.000	3134 Arendsee (Altmark)	
Geologisches Landesamt	Landesamt für Geologie und Bergwesen	
Datenquelle	Fachinformationssystem Kohlenwasserstoffe	

Einheiten, Porositäts- und Permeabilitätsdaten

Einheit	Porosität	Permeabilität
Neogen	-	-
Paläogen	-	-
Oberkreide	-	-
Unterkreide	✓	-
Muschelkalk	-	-
Buntsandstein	✓	-
Zechstein	✓	-
Rotliegend	✓	✓

Abb. 6.6: Datenblatt zu einer Bohrung.

Die dargestellten Diagramme reagieren dynamisch auf die Auswahl und werden bei Änderungen clientseitig neu gezeichnet. Die technische Grundlage für diese Funktion bildet das JavaScript-Framework „Dojo-Toolkit“. Die Nutzung der überarbeiteten Darstellung der Karte „Gebiete hydrogeothermischer Nutzung“ (Abb. 6.7 und Abb. 6.8, orangefarbene Gebiete), erforderte umfangreiche Änderungen in der GeotIS-Anwendung – betroffen waren dabei das Bohrungsdatenblatt (Abb. 6.6), die zugehörigen Auswahlfilter und Datenbank-Skripte sowie die Programme zur Shapefile-Erzeugung.

Das System wurde um zahlreiche neue Kartenebenen erweitert, hier sind die Potenzialkarten des Geothermieatlasses (SCHULZ et al. 2013, SUCHI et al. 2014), die Kartenebene „3D-Seismik“ (mit Metadatenabfrage) und verschiedene Gitternetze (geographisches und kartesisches Gitter sowie Blattgitter der TK25 und TK 200) zu nennen. Ein fünftes 3D-Modellgebiet wurde im Bereich von Schleswig-Holstein hinzugefügt. Das Modell wurde im Rahmen des INTERREG Projekts „GeoPower“ vom Projektpartner LLUR erstellt und umfasst die Horizonte Dogger (Aalen bis Callov), Oberer Keuper (Rhät) und Mittlerer Buntsandstein (Volpriehausen bis Solling) im Norden Schleswig-Holsteins.

Implementierung einer leistungsfähigen Suchfunktion

Die Implementierung einer leistungsfähigen Suche, die mit einer einheitlichen Benutzerschnittstelle auf gespeicherte Dokumente (z. B. PDF-Dateien), Informationen auf den Seiten der Webanwendung und auf Informationen aus der Datenbank zugreifen kann, wurde als intern nutzbarer Prototyp realisiert. Dieser Prototyp basiert auf den Open-Source Suchserver Apache Solr in der aktuellen Version 6.2. Diese Suchfunktion wird nach weiteren Verbesserungen in GeotIS integriert werden und im Folgeprojekt „GeoFaces“ zur Verfügung stehen.

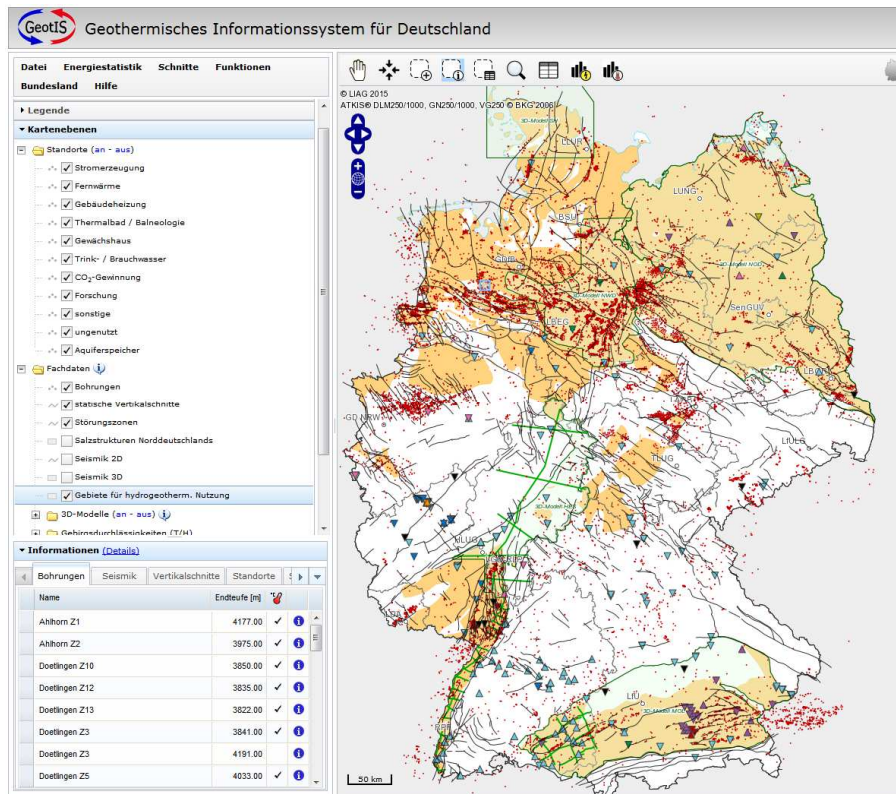


Abb. 6.7: Kartenansicht geothermische Standorte und geothermische Potentiale.

Einführung eines „Responsive Design“ (anpassungsfähiges Web-Layout)

Um die GeotIS Kartenanwendung (Abb. 6.7) auch mit kleinen mobilen Endgeräten, Zielplattform sind Tablets mit einer Diagonalen von 7 bis 10 Zoll (17,8 bis 25,4 cm), nutzen zu können, wurde eine neue Oberfläche mit einem einzelnen großen Kartenfenster, ausgeblendeten Menüs und größeren Eingabeelementen entwickelt (Abb. 6.8). Auf der Karte lassen sich durch „Touch-Bedienung“ Elemente auswählen, Flächen aufziehen oder auch Schnitte platzieren. Dieses neue Feature benötigt noch einige Optimierungen und wird im Folgeprojekt „GeoFaces“ fertiggestellt werden.

Eine noch weitergehende Umsetzung des Responsive-Design, das heißt die möglichst automatische angepasste Darstellung und Anordnung einzelner Elemente abhängig vom Endgerät für den gesamten GeotIS-Webauftritt, ist für das nachfolgende Projekt geplant. Damit ist auch eine vereinheitlichte, modernere und verbesserte barrierefreie Gestaltung des gesamten Webauftritts verbunden.

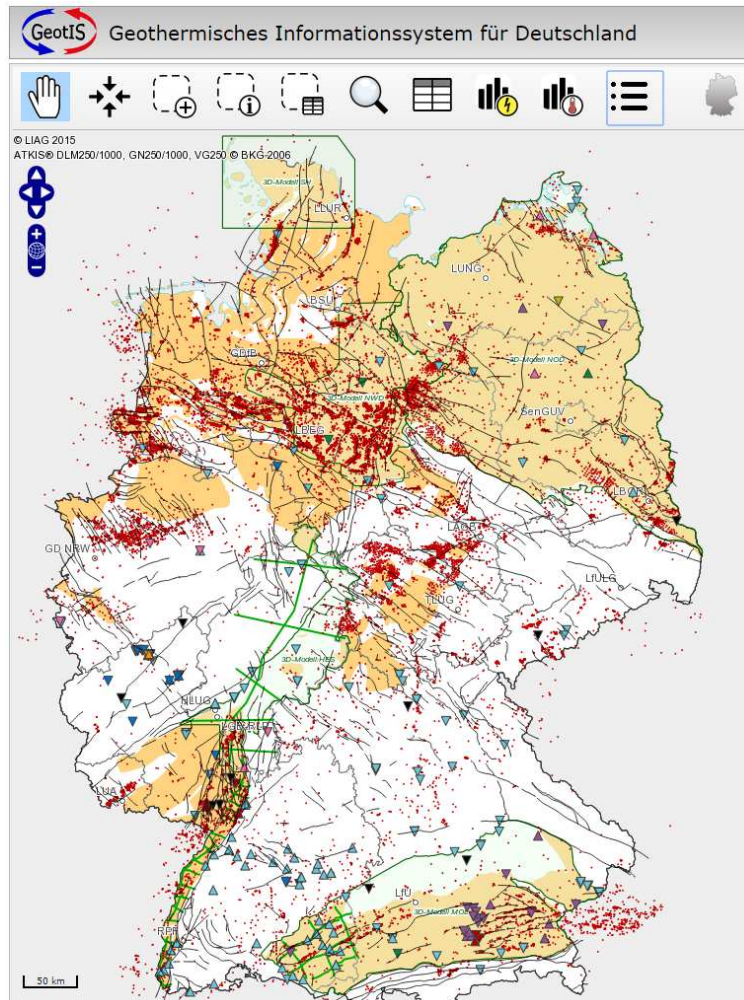


Abb. 6.8: GeotIS-Kartenansicht in typischer Tablet-Auflösung (768 * 1024 Pixel, Portrait).

6.2.3 Internet-Webanwendung, Infrastruktur

Die Infrastruktur der Webanwendung ist weiterhin in der „Demilitarized Zone“ (DMZ) des Geozentrum-Rechenzentrums installiert und nutzt die vorhandene Infrastruktur mit ihren Firewalls, Web-Application-Firewalls, Hardware-Loadbalancern und Datenbankservern in Failover-Konfiguration. Im Sicherheitsaudit eines externen Dienstleisters widerstand das System erfolgreich allen Penetrationsversuchen. Als redundant ausgelegtes System ist die Webanwendung derzeit auf zwei physikalischen Servern installiert. Ein Server wurde neu beschafft und zwei ausgemustert. Die Server sind mit 128 bzw. 192 GB RAM und Mehrkernprozessoren ausgestattet. Die RAM-Erweiterung wurde durch das neu implementierte 3D-Datenmodell nötig, welches auf einem strati-graphischen Gitter basiert (Kap. 6.1) und deutlich mehr Speicher als die zuvor ausschließlich benutzten Datenmodelle benötigt. Als Betriebssystem kommt Windows-Server-2012-R2 zum Einsatz. Webserver ist der integrierte Internet Information Service (IIS), PHP wird über die FastCGI Schnittstelle betrieben, 3 (später bis zu 5) Tomcat-Server sind über die ISAPI-Schnittstelle mit Lastverteilung angebunden.

6.3 Aktualisierung der Betriebsdaten geothermischer Anlagen

Seit 2011 werden jährlich Informationen zu den geothermischen Anlagen durch direkte Befragung der Betreiber eingeholt. Bei den Thermalbädern erwies sich die Aktualisierung aufgrund fehlender sachkundiger Ansprechpartner als zu zeitaufwändig. Da sich in vielen Fällen bei Thermalbädern nur wenig über die Jahre ändert und in GeotIS bei fehlenden Angaben die geothermische Wärmeproduktion automatisch aus Fließrate und Temperatur berechnet wird, bietet GeotIS mit der jährlichen Aktualisierung der Daten eine insgesamt gute Datengrundlage über die Nutzung der tiefen Geothermie. Zu jeder Anlage steht ein Datenblatt mit Informationen zur energetischen Nutzung, Temperatur, Fließrate, Tiefe der Bohrung bzw. des erschlossenen Nutzhorizonts zur Verfügung. Daten zur Erzeugung elektrischer Energie sind ab dem Jahr 2003 verfügbar, Daten zur Wärmenutzung reichen in teilweise aggregierter Form bis ins Jahr 1999 zurück. Damit kann sowohl eine jährliche Statistik erstellt als auch die Entwicklung der geothermischen Nutzung in Deutschland in den vergangenen Jahren dargestellt werden.

Ende 2015 lag die installierte thermische Leistung bei ca. 337 MWt, wovon etwa 85 % auf größere Heizwerke entfallen (2012: 217 MWt). Die produzierte Wärmemenge betrug im Betriebsjahr 2015 ca. 1.100 GWh (2012: 841 GWh).

Die Stromproduktion lag Ende 2015 bei 151 GWh bei einer installierten elektrischen Leistung von 34,5 MWe (davon 31,4 MWe in Betrieb), wobei sich dieser Wert durch den Start der Stromproduktion an den Standorten Taufkirchen und Traunreut im Laufe des Jahres 2016 weiter erhöhen wird (2012: 25,4 GWh, 11,1 MWe). Die Daten aus GeotIS leisten einen wichtigen Beitrag zur Erstellung von Statistiken über die Nutzung erneuerbarer Energien und fließen in Veröffentlichungen wie z. B. den Country Update Papers für den Welt- und Europäischen Geothermiekongress und dem jährlich erscheinenden „Trend Report“ des IEA Geothermal ein.

6.4 Literatur

- SCHULZ, R. (Hrsg.) (2013): Aufbau eines Internet basierten Informationszentrums für geothermische Energienutzung – Endbericht. – LIAG-Bericht, Archiv-Nr. 0131282; Hannover.
- SCHULZ, R., KNOPF, S., SUCHI, E. & DITTMANN, J. (2013): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und tiefer Geothermie – Endbericht. – LIAG u. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0131310; Hannover.
- SUCHI, E., DITTMANN, J., KNOPF, S., MÜLLER, C. & SCHULZ, R. (2014): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CO₂-Einlagerung (CCS) und Tiefer Geothermie in Deutschland. – ZDGG Band 165 Heft 3, 439–453.

Danksagung:

Wir bedanken uns beim Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG, ehemals WEG) für die Bereitstellung der Daten zu Forschungszwecken.

7 Informationszentrum für geothermische Energienutzung

7.1 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Ende 2010 übernahm das LIAG die Funktion eines Operating Agent im Rahmen des IEA Geothermal Implementing Agreement (GIA; oder IEA Geothermal). Dabei handelt es sich um ein internationales Netzwerk unter dem Dach der Internationalen Energieagentur (IEA) mit dem Ziel, die Nutzung der geothermischen Energie weltweit zu fördern und Forschungsvorhaben zu unterstützen. Für die Umsetzung der operativen Ziele ist ein Exekutivkomitee (ExCo) aus Vertretern der aktuell 13 Mitgliedsstaaten, der Europäischen Kommission sowie 3 sogenannten Sponsoren verantwortlich. Aufgaben und Ziele sind unter anderem die Förderung internationaler Kooperationen im Bereich der Forschung und Entwicklung, Wissenstransfer und Informationsaustausch, Handlungsempfehlungen für die Politik und die Unterstützung kooperativer Forschungsaktivitäten.

Die Umsetzung der Arbeitsprogramme erfolgt in Annexen, die jeweils von einem oder mehreren Annex Leadern geleitet werden. Die Leitung des bereits Ende 2010 initiierten Annex X – „Data Collection and Information“ wird im Projekt „StörTief“ von einem Mitarbeiter fortgeführt, der für die inhaltliche Umsetzung der Ziele verantwortlich ist. Dazu gehört die Sammlung von Daten über die Nutzung geothermischer Energie in den Mitgliedsländern (sowie einigen Nicht-Mitgliedsländern) nach einheitlichen Kriterien und die Veröffentlichung der Daten in Form des jährlich erscheinenden „Trend Reports“. Im Projektzeitraum wurden drei „Trend Reports“ für die Berichtsjahre 2011, 2012 und 2013 fertiggestellt, der Report für das Jahr 2014 befindet sich in Vorbereitung.

Außerdem übernahm das LIAG als Operating Agent im Mai 2015 die Leitung des neu geschaffenen Annex XIII – „Emerging Geothermal Technologies“. Der Annex Leader wird ebenfalls aus dem Projekt „StörTief“ gestellt. Im September 2015 wurde die Arbeit mit einem ersten Annex Meeting in Hannover mit Teilnehmern aus Deutschland, Japan, Neuseeland, Norwegen und der Schweiz aufgenommen. Mehrere Mitglieder des Annex XIII beteiligten sich an der Organisation und Durchführung des vom IEA Geothermal veranstalteten „Central and South American Workshop on Geothermal Energy“ in Cuernavaca, Mexiko im April 2016, an dem ca. 150 Experten und Interessierte aus 20 Ländern teilnahmen.

Im Rahmen der Tätigkeiten für das IEA Geothermal wurden außerdem folgende Arbeiten übernommen:

- Recherche internationaler Datenquellen
- Bereitstellung deutscher Daten für den Annex X Länderreport
- Teilnahme an ExCo-Meetings mit Berichten an das ExCo
- Vorbereitung und Leitung von Annex-Meetings
- Verfassung von Beiträgen für die IEA Geothermal Jahresberichte
- Teilnahme an Konferenzen und Erstellung von Präsentationen
- Umfangreiche internationale Korrespondenz
- Vernetzung mit weiteren internationalen Organisationen (z. B. IGA)
- Mitglied des GeoStat Advisory Boards (Angleichung internationaler Geothermie-Statistiken verschiedener Organisationen)

7.2 Neuauflage der Broschüre „Tiefe Geothermie“

Aufgrund des großen Erfolgs der deutschen Ausgabe der kostenfreien Broschüre „Tiefe Geothermie“ ist im September 2014 eine überarbeitete Neuauflage in englischer Sprache mit 3.000 Exemplaren gedruckt worden, um dieses Thema auch einem internationalen Publikum zugänglich zu machen.

Angesichts des weiterhin bestehenden großen Interesses an der deutsch- und englischsprachigen Auflage der Broschüre wurde im zweiten Halbjahr 2015 das Manuskript der deutschen Fassung überarbeitet. Anfang 2016 erfolgte die Fertigstellung und der Druck der nun 4. deutschen Auflage, die als LIAG-Publikation mit dem Titel „Tiefe Geothermie – Grundlagen und Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland“ erschienen ist. Die Fertigstellung einer 2. englischen und einer 1. spanischen Fassung hat sich aufgrund organisatorischer Probleme und Schwierigkeiten mit der spanischen Übersetzung leider verzögert und konnte nicht mehr im Rahmen des Projektes abgeschlossen werden. Die Druckkosten für beide Auflagen werden nun voraussichtlich aus dem Haushalt des LIAG bestritten.

8 Publikationen und Vorträge

Im Folgenden werden alle im Rahmen des Projektes erstellten Publikationen, Poster und Vorträge aufgelistet.

8.1 Publikationen

8.1.1 Zeitschriften

AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., GANZ, B., KUDER, J., KÜHNE, K., SCHUMACHER, S. & SCHULZ, R. (2014): The Geothermal Information System for Germany – GeotIS. - ZDGG, 165(2): 129-144.

AGEMAR, T., WEBER, J. & SCHULZ, R. (2014): Deep Geothermal Energy Production in Germany. - Energies, 7: 4397-4416.

- BUNESS, H.A., VON HARTMANN, H., RUMPEL, H.-M., KRAWCZIK, C. M. & SCHULZ, R. (2014): Fault imaging in sparsely sampled 3D seismic data using common-reflection-surface processing and attribute analysis – a study in the Upper Rhine Graben. - *Geophysical Prospecting*, 62: 443-452.
- KUDER, J., BINOT, F., HÜBNER, W., ORILSKI, J., WONIK, T. & SCHULZ, R. (2014): Für die Geothermie wichtige hydraulische Parameter von Gesteinen des Valangin und der Bückeberg-Formation (Wealden) in Nordwestdeutschland. - *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 165 (3): 455-467.
- MOECK, I., SUCHI, E., AGEMAR, T. & WEBER, J. (2016): Geothermie in Deutschland – Installierte Leistung und Potential. *Geothermische Energie*, Heft 84.
- SUCHI, E., DITTMANN, J., KNOPF, S. & SCHULZ, R. (2013): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. - *Geothermische Energie*, 77: 22-23; Berlin.
- SUCHI, E., DITTMANN, J., KNOPF, S., MÜLLER, C. & SCHULZ, R. (2014): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CO₂-Einlagerung (CCS) und Tiefer Geothermie in Deutschland. - *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 165 (3): 439-453.
- ### 8.1.2 Broschüren
- GANZ, B. & IEA-GIA (2013): Trends in Geothermal Applications. Survey Report on Geothermal Utilization and Development in IEA-GIA Member Countries in 2011, with trends in geothermal power generation and heat use 2000 - 2011. Publication of the International Energy Agency - Geothermal Implementing Agreement.
- STOBER, I., FRITZER, T., OBST, K. & SCHULZ, R. (2014): Deep Geothermal Energy - Application Possibilities in Germany. - 81 pages; Berlin (BMW).
- STOBER, I., FRITZER, T., OBST, K., AGEMAR, T. & SCHULZ, R. (2016): Tiefe Geothermie – Grundlagen und Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland. – 4. akt. Aufl., 87 Seiten; Hannover (LIAG).
- STOBER, I., FRITZER, T., OBST, K., AGEMAR, T. & SCHULZ, R. (2016): Deep Geothermal Energy – Principles and Application Possibilities in Germany. – 2. akt. Aufl., 87 Seiten; Hannover (LIAG, in Vorbereitung).
- STOBER, I., FRITZER, T., OBST, K., AGEMAR, T. & SCHULZ, R. (2016): Energía Geotérmica Profunda – Fundamentos y posibilidades de usos en Alemania. – 1. Aufl., 87 Seiten; Hannover (LIAG, in Vorbereitung).
- WEBER, J. & IEA-GIA (2014): Trends in Geothermal Applications. Survey report on geothermal utilization and development in IEA-GIA Member Countries in 2012, with trends in geothermal power generation and heat use 2000-2012. – Publication of the International Energy Agency, Geothermal Implementing Agreement.
- WEBER, J. & IEA-GIA (2015): Trends in Geothermal Applications. Survey report on geothermal utilization and development in IEA-GIA Member Countries in 2013, with trends in geothermal power generation and heat use 2000-2013. – Publication of the International Energy Agency, Geothermal Implementing Agreement.

WEBER, J. & IEA-GIA (2016): Trends in Geothermal Applications. Survey report on geothermal utilization and development in IEA-GIA Member Countries in 2014, with trends in geothermal power generation and heat use 2000-2014. – Publication of the International Energy Agency, Geothermal Implementing Agreement (in Vorbereitung).

8.1.3 Bücher

VON HARTMANN, H., BEILECKE, T., BUNESS, H., MUSMANN, P. & SCHULZ, R. (2015): Seismische Exploration für Tiefe Geothermie. Geologisches Jahrbuch, Reihe B, Heft 104, 270 S.; Hannover

WOLFGRAMM, M., FRANZ, M. & AGEMAR, T. (2014): Explorationsstrategie tiefer geothermischer Ressourcen am Beispiel des Norddeutschen Beckens. - In: BAUER, M., FREEDEN, W., JACOBI, H. & NEU, T. (Eds.): Handbuch Tiefe Geothermie: 451-493; Springer Spektrum.

8.2 Vorträge und Poster

8.2.1 Vortragsveröffentlichungen (Proceedings)

AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., GANZ, B., KUDER, J., KÜHNE, K. & SCHULZ, R. (2013): The Geothermal Information System GeotIS. - Proceedings European Geothermal Congress, 3.-7.6.2013; Pisa, Italy.

AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., KÜHNE, K., KUDER, J., SUCHI, E., WEBER, J. & SCHULZ, R. (2014): A New Approach to Estimating the Geothermal Potential of Faults in Germany. – Proceedings World Geothermal Congress 2015, 19.-25.04.2015; Melbourne, Australia.

GANZ, B. & SCHULZ, R. (2013): The GIA Trend Report, a new survey report about geothermal applications and developments with trends in power generation and heat use in IEA-GIA member countries. - Proceedings European Geothermal Congress 2013, 3.-7.6.2013: 5p; Pisa, Italy.

RÖHLING, H.-G., SCHÖNER, R., KUDER, J. & WONIK, T. (2013): Geothermal potential of the Bückeberg Formation (Berriasium, "German Wealden") and the Valangin of the Lower Saxony Basin. – In: ZAK, J., ZULAUF, G. & RÖHLING, H.-G. (HRSG.): Crustal evolution and geodynamic processes in Central Europe. - Proceedings of the joint conference of the Czech and the German geological societies held in Plzen (Pilsen). – Schriftenr. Deutsch. Ges. Geowiss., 82: 91-92; Hannover.

VON HARTMANN, H. & KADNER, C. (2016): SEISVIZ3D: System zur Interpretation seismischer Daten in einer stereoskopischen Umgebung. - Geothermische Energie, Bundesverband Geothermie, 83: 22-23.

WEBER, J., GANZ, B., SCHELLSCHMIDT, R., SANNER, B. & SCHULZ, R. (2015): Geothermal Energy Use in Germany. – Proceedings World Geothermal Congress 2015, 19.-25.04.2015; Melbourne, Australia.

WEBER, J., GANZ, B. & SCHULZ, R. (2015): The GIA Trend Report, an Annual Survey Report on Geothermal Applications and Developments. – Proceedings World Geothermal Congress 2015, 19.-25.04.2015; Melbourne, Australia.

WEBER, J., GANZ, B., SANNER, B. & MOECK, I. (2016): Geothermal Energy Use, Country Update for Germany. – Proceedings European Geothermal Congress 2016, 19.-24.09.2016; Strasbourg, France (in Vorbereitung).

8.2.2 Poster

- AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., ARNDT, D., BÄR, K., FRITSCH, J.-G., GANZ, B., HOPPE, A., KRACHT, M., KUDER, J., SASS, I. & SCHULZ, R. (2013): Implementierung von „Hessen 3D“ im geothermischen Informationssystem GeotIS. - 8. Hessisches Tiefengeothermie Forum, 01.10.2013; Darmstadt.
- AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., GORLING, L., GRAMENZ, J., KADNER, C., KUDER, J., SUCHI, E., TRIBBENSEE, K., WEBER, J. (2015): Geothermisches Informationssystem für Deutschland. Norddeutsche Geothermietagung, 07.10.2015, Hannover.
- AGEMAR, T., ALTEN, J. A., GRAMENZ, J., KÜHNE, K., KUDER, J., ÖZER, G., SUCHI, E., WEBER, J. & SCHULZ, R. (2014): Geothermisches Informationssystem für Deutschland. - Poster, LIAG-Austauschsitzung, 05.-06.11.2014; Hannover.
- VON HARTMANN, H. BOGEN, M., RILLING S. & THOMAS R. (2015): SEISVIZ3D: Stereoskopische Darstellung seismischer Daten – Interpretation und Immersion. -75. Tagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, 23.-26.03.2015; Hannover.
- WEBER, J., GANZ, B., SCHULZ, R. & WISSING, L. (2013): Das LIAG als Partner im internationalen Netzwerk des IEA-GIA. – Poster, LIAG-Austauschsitzung, 06.-07.11.2013; Geozentrum Hannover.

8.2.3 Vorträge

- AGEMAR, T. (2014): GeotIS – aktueller Stand / Projekt StörTief / Gocad-Formate für GeotIS. - Gocad-Anwendertreffen, 17./18.3.2014; Freiberg (Sachsen).
- AGEMAR, T. (2014): 3D-Temperaturmodell Deutschland. – Informationsaustausch, TU-München, 12.03.2014.
- AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., GANZ, B., KUDER, J., KÜHNE, K. & SCHULZ, R. (2013): GeotIS – Übersicht und aktueller Stand der Entwicklung. – Der Geothermiekongress 2013, 12.-14. November 2013, Extended Abstract F12.3; Essen.
- AGEMAR, T., ALTEN, J. A., GANZ, B., ÖZER, G., GRAMENZ, J., KÜHNE, K., KUDER, J., ÖHLSCHLÄGER, D., TRIBBENSEE, K., SUCHI, E., WEBER, J., & SCHULZ, R. (2013): Geothermisches Informationssystem Deutschland – Aktueller Stand, LIAG-Seminar, 29.10.2013; Hannover.
- AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., GORLING, L., KUDER, J., SUCHI, E., WEBER, J. (2015): GeotIS – aktueller Stand der Entwicklung. Kommunikationsforum 3D der Geologischen Dienste, 16.-17.09.2015, Einbeck/Grubenhagen.
- AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., GORLING, L., KUDER, J., SUCHI, E., WEBER, J. (2015): GeotIS – aktueller Stand der Entwicklung. LIAG-Austauschsitzung, 04.-05.11.2015, Hannover.
- AGEMAR, T., ALTEN, J. A., KÜHNE, K., KUDER, J., SUCHI, E., WEBER, J. & SCHULZ, R. (2014): Das geothermische Potenzial tieferreichender Störungszonen in Deutschland. – Der Geothermiekongress 2014, 11.-13.11.2014; Essen.
- AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., KÜHNE, K., KUDER, J., SUCHI, E., WEBER, J. & SCHULZ, R. (2015): Das geothermische Potenzial tieferreichender Störungszonen in Deutschland, Gocad-Anwendertreffen, 18.-19.03.2015; Freiberg.
- AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., KÜHNE, K., KUDER, J., SUCHI, E., WEBER, J. & SCHULZ, R. (2015): A New Approach to Estimating the Geothermal Potential of Faults in

- Germany. World Geothermal Congress 2015, 19.-25.04.2015; Melbourne, Australia.
- AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., KUDER, J., SUCHI, E., WEBER, J. & GORLING, L. (2016): Updates 2016: Darstellungen von 3D Strukturen im GeotIS. GeoTHERM 2016, Offenburg.
- VON HARTMANN, H. (2014): Tectonic Models for Geothermal Reservoir Evaluation - Workshop VRGeo, 09.-10.12.2014; Sankt Augustin.
- VON HARTMANN, H. (2014): Tektonik, Fazies und Karst: Processing und Interpretation - Workshop Explorationsstrategien im Malm - Seismisches Processing und Interpretation, 27.07.2014; München.
- VON HARTMANN, H., BOGEN, M., RILLING S. & THOMAS R. (2015): SEISVIZ3D: Stereoscopic system for the representation of seismic data - Interpretation and Immersion. - Assembly of the European Geoscience Union 2015, 12.-17.04.2015; Vienna, Austria.
- VON HARTMANN, H., DUSSEL, M. & BUNESS, H. (2014): Analyse und Bewertung von Karststrukturen im Bayerischen Molassebecken für hydrothermale Reservoirs. - Geofrankfurt, 21.-24.09.2014; Frankfurt.
- VON HARTMANN, H., KADNER C. LÜSCHEN E. & RILLING S. (2015): SEISVIZ3D: System zur Interpretation seismischer Daten in einer stereoskopischen Umgebung. - Tagung der Deutschen Geothermischen Vereinigung, 02.-04.11.2015; Essen.
- VON HARTMANN, H., KADNER C. LÜSCHEN E. & RILLING S. (2015): SEISVIZ3D: System zur Interpretation seismischer Daten in einer stereoskopischen Umgebung. – 05.11.2015 im Rahmen LIAG-Austauschsitzung, 04.-05.11.2015, Hannover.
- VON HARTMANN, H., KADNER C., LÜSCHEN E., ZIESCH, J. & THOMAS, R. (2016): Virtuelle Realität am Arbeitsplatz: Stereoskopische Visualisierung für die seismische Interpretation. - Vortrag in der 41. Sitzung des Kuratoriums, 17.3.2016; Hannover.
- VON HARTMANN, H., TANNER, D. C. & SCHUMACHER, S. (2014): Tektonisches Modell der Störungsentwicklung im alpinen Vorlandbecken als Grundlage zur Bewertung hydrothermalen Reservoirs. Der Geothermiekongress 2014, 11.-13.11.2014; Essen.
- VON HARTMANN, H., TANNER, D. C., SCHUMACHER, S. & BUNESS, H. (2014): Konjugierte Störungssysteme im Bayerischen Molassebecken: Seismikinterpretation, Tektonik, Modellierung. - LIAG-Seminar, 08.07.2014; Hannover.
- WEBER, J. (2014): IEA-GIA, Annex X – Data collection and information, Achievements 2013/14. - Bericht an das Exekutivkomitee, 31. GIA ExCo Meeting, 07.04.2014; Paris.
- WEBER, J. (2014): IEA-GIA, Annex X – Data collection and information, Achievements 2014. - Bericht an das Exekutivkomitee, 32. GIA ExCo Meeting, 15.10.2014; Tokio.
- WEBER, J. (2015): IEA-GIA, Annex X – Data collection and information, Achievements 2014. - Bericht an das Exekutivkomitee, 33. GIA ExCo Meeting, 30.04.2015; Taupo, Neuseeland.
- WEBER, J. (2015): Annex X – Data collection and information, Work progress report 2015. - Bericht an das Exekutivkomitee, 34. IEA-GIA ExCo Meeting, 27.10.2015; Genf, Schweiz.

- WEBER, J. (2015): Annex XIII – Emerging Geothermal Technologies, Work progress report 2015. - Bericht an das Exekutivkomitee, 34. IEA-GIA ExCo Meeting, 27.10.2015; Genf, Schweiz.
- WEBER, J. (2016): Annex X – Data Collection and Information, Work progress report 2015/16. - Bericht an das Exekutivkomitee, 35. IEA Geothermal ExCo Meeting, 14.04.2016; Cuernavaca, Mexiko.
- WEBER, J. (2016): Annex XIII – Emerging Geothermal Technologies, Work progress report 2015/16. - Bericht an das Exekutivkomitee, 35. IEA Geothermal ExCo Meeting, 14.04.2016; Cuernavaca, Mexiko.
- WEBER, J. & GANZ, B. (2013): IEA-GIA, Annex X - Data Collection and Information. Achievements 2013. - Bericht an das Exekutivkomitee im Rahmen des 30. GIA ExCo Meetings, 19.09.2013; Tagaytay, Philippinen.
- WEBER, J., GANZ, B., SCHELLSCHMIDT, R., SANNER, B. & SCHULZ, R. (2015): Geothermal Energy Use in Germany. – World Geothermal Congress 2015, 19.-25.04.2015; Melbourne, Australia.
- WEBER, J., GANZ, B. & SCHULZ, R. (2015): The GIA Trend Report, an Annual Survey Report on Geothermal Applications and Developments. – World Geothermal Congress 2015, 19.-25.04.2015; Melbourne, Australia.
- WEBER, J., SCHELLSCHMIDT, R., SCHULZ, R. & GIA REPRESENTATIVES (2014): Das LIAG als Partner im Internationalen Netzwerk von EERA und IEA-GIA. – LIAG Austauschsitung, 05.11.2014; Hannover.

8.3 Berichte

- SCHULZ, R. (2014): Verbundvorhaben StörTief: Die Rolle von tiefreichenden Störzonen bei der geothermischen Energienutzung, Teilprojekt A. - 1. Zwischenbericht, LIAG-Bericht, Archiv-Nr. 131510: 3 S.; Hannover.
- SCHULZ, R. (2014): Verbundvorhaben StörTief: Die Rolle von tiefreichenden Störzonen bei der geothermischen Energienutzung, Teilprojekt A. - 2. Zwischenbericht, LIAG-Bericht, Archiv-Nr. 131734: 6 S.; Hannover.
- SCHULZ, R. (2014): Verbundvorhaben StörTief: Die Rolle von tiefreichenden Störzonen bei der geothermischen Energienutzung, Teilprojekt A. - 3. Zwischenbericht, LIAG-Bericht, Archiv-Nr. 132081: 6 S.; Hannover.
- KUDER, J. & SCHULZ, R. (2015): Verbundvorhaben StörTief: Die Rolle von tiefreichenden Störzonen bei der geothermischen Energienutzung, Teilprojekt A. - 4. Zwischenbericht, LIAG-Bericht, Archiv-Nr. 132333: 7 S.; Hannover.
- KUDER, J. & KÜHNE, K. (2015): Verbundvorhaben StörTief: Die Rolle von tiefreichenden Störzonen bei der geothermischen Energienutzung, Teilprojekt A. - 5. Zwischenbericht, LIAG-Bericht, Archiv-Nr. 132802: 7 S.; Hannover.
- KUDER, J. & GORLING, L. (2016): Verbundvorhaben StörTief: Die Rolle von tiefreichenden Störzonen bei der geothermischen Energienutzung, Teilprojekt A. - 6. Zwischenbericht, LIAG-Bericht, Archiv-Nr. 133360: 7 S.; Hannover.
- KUDER, J. & GORLING, L. (2016): Verbundvorhaben StörTief: Die Rolle von tiefreichenden Störzonen bei der geothermischen Energienutzung, Teilprojekt A. - 7. Zwischenbericht, LIAG-Bericht, Archiv-Nr. 133862: 7 S.; Hannover.

8.4 Öffentlichkeitsarbeit

8.4.1 Veranstaltungen

IEA GEOTHERMAL TEAM & WEBER, J. (2016): Vorbereitung und Durchführung des „Central and South American Workshop on Geothermal Energy“ vom 18.04. – 19.04.2016 in Cuernavaca, Mexiko.

STÖRTIEF-TEAM (2013): Hannover Messe, Gemeinschaftsstand von BGR, LBEG und LIAG mit Exponaten und Präsentationen zum Thema Geothermie, im Standbereich Energieland Niedersachsen. Weitere Standfläche im Kompetenzzentrum Geothermie. 8.-12.04.2013, Hannover.

STÖRTIEF-TEAM (2013): 6. Norddeutsche Geothermietagung Hotspot Hannover, 23.-24.10.2013; Geozentrum Hannover.

STÖRTIEF-TEAM (2013): GeotIS-Messestand auf der GeoT Expo, 12.-14.11.2013; Essen.

STÖRTIEF-TEAM (2014): 7. Norddeutsche Geothermietagung, 15.-16.10.2014; Geozentrum Hannover.

STÖRTIEF-TEAM (2014): Messestand bei der Geo-T Expo und Geothermiekongress 2014, 11.-13.11.2014; Essen.

STÖRTIEF-TEAM (2015): Roll-Up-Poster & Audiowalk „Geothermie + GeotIS“. Gemeinschaftsstand mit dem LBEG, International Conference on Climate Action (Kommunaler Klimagipfel), 01.-02.10.2015, Hannover.

STÖRTIEF-TEAM (2015): Präsentation SeisViz3D, Norddeutsche Geothermietagung, 07.10.2015, Hannover.

STÖRTIEF-TEAM (2015): Präsentation SeisViz3D, Tagung der Geothermischen Vereinigung, 3.11. – 4.11.2015, Essen.

STÖRTIEF-TEAM (2015): Präsentation SeisViz3D, LIAG-Austauschsitzung, 04.-05.11.2015, Hannover.

STÖRTIEF-TEAM (2015): Präsentation SeisViz3D, Eröffnung der Jahrestagung der Leibniz-Gemeinschaft in der Niedersächsischen Landesvertretung in Berlin, 25.11.2015, Berlin.

STÖRTIEF-TEAM (2016): GeotIS-Messestand auf GeoTHERM expo & congress, 24.02.-26.02.2016; Offenburg.

WEBER, J. (2015): Beteiligung am Messe-Stand des IEA-GIA im Rahmen des World Geothermal Congress 2015, 19.-25.04.2015; Melbourne, Australia.

WEBER, J. (2013): IEA-GIA, Annex X - Data Collection and Information. – Durchführung des Annex X Meeting, 30. GIA ExCo Meeting, 18.09.2013; Tagaytay, Philippinen.

WEBER, J. (2014): IEA-GIA, Annex X - Data Collection and Information. – Durchführung des Annex X Meeting, 31. GIA ExCo Meeting, 04.04.2014; Paris, Frankreich.

WEBER, J. (2014): IEA-GIA, Annex X - Data Collection and Information. – Durchführung des Annex X Meeting, 32. GIA ExCo Meeting, 13.10.2014; Tokio.

WEBER, J. (2015): IEA-GIA, Annex XIII – Emerging Geothermal Technologies – Organisation und Durchführung des 1. Annex XIII Meetings, 08.-10.09.2015; Hannover.

WEBER, J. (2016): IEA-GIA, Annex XIII – Emerging Geothermal Technologies – Durchführung des Annex XIII Meetings, 13.04.2016; Cuernavaca, Mexiko.

8.4.2 Pressemitteilungen und Internet

Pressemitteilung zur 1. englischen Auflage der Broschüre „Tiefe Geothermie“:

<https://idw-online.de/de/news616635> (deutsch)

<https://idw-online.de/de/news616660> (englisch)

Darstellung der Zusammenarbeit mit dem IAIS: <http://www.seisviz3d.de/>

Website des Projektes: <http://www.geotis.de>

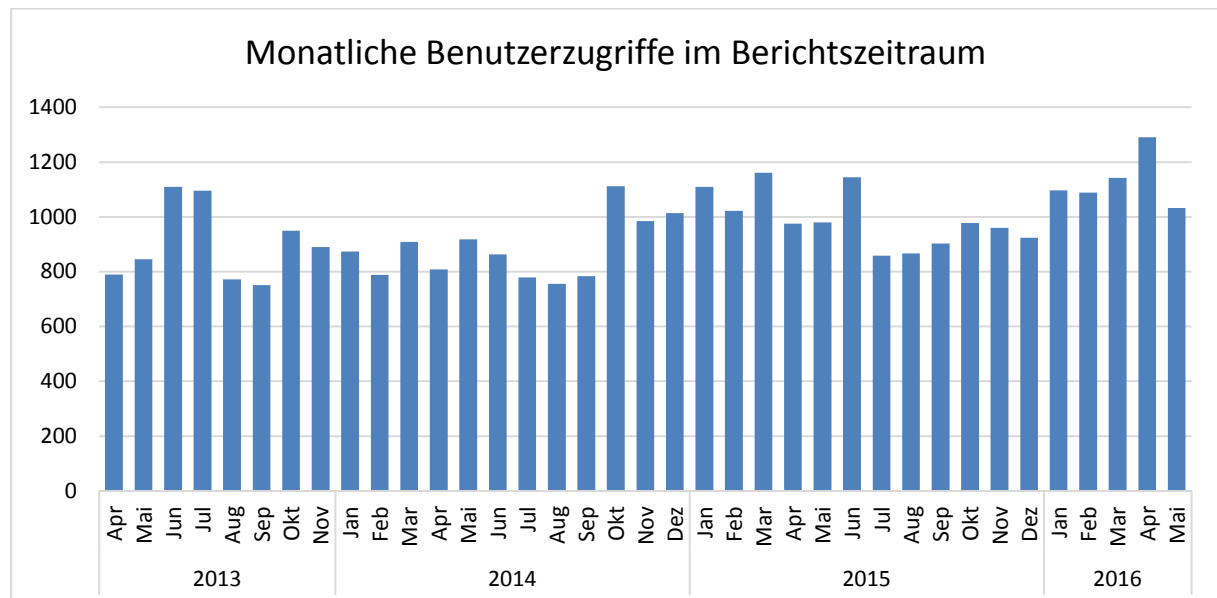


Abb. 8.1: Benutzerzugriffe auf die GeotIS-Anwendung.

9 Anhang

9.1 Ergebnisse für die geothermische Potenzialabschätzung der Störungszonen in Deutschland

In den Tabellen wird die Salzkonzentration für die entsprechende Region und der Fluidfluss angegeben sowie die Lebensdauer, wenn die Produktionstemperatur größer oder gleich 100 °C ist. Den Tabellen vorangestellt sind die Parameter der Gesteine, dabei werden maximal bis zu vier unterschiedliche Parameterkombinationen pro Tiefenintervall berechnet.

Region 1 (Norddeutschland), **2** (Oberrheingraben), **4** (Mitteldeutschland); **3** (Süddeutsche Molasse);
Teufe 1, 3-4 km

Energie wird in Petajoule (1 PJ = 10¹⁵ Joule) angegeben. Angabe unter Fl. xx.

(1) Dichte 2200 kg/m³, spez. Wärmekapazität 700 J/(kg·K), Wärmeleitkoeffizient 1 W/(m·K)

Fluidfluss (Fl.) in [kg/s], Injektionstemperatur = 70 °C, Produktionstemp. >= 100 °C für x Jahre [a]

	Salz 0 kg		Salz 130 kg						Salz 283 kg					
	Fl. 15	a	Fl. 15	a	Fl. 60	a	Fl. 100	a	Fl. 15	a	Fl. 60	a	Fl. 100	a
(1) Region 1	4,39	43	4,43	50	3,18	8	3,02	4	4,08	50	3,19	9	3,17	5
(1) Region 2	5,54	50	4,81	50	5,92	16	5,34	8	4,34	50	6,82	21	6,66	12
(1) Region 4	4,21	41	4,41	50	3,16	8	2,89	4	4,06	50	3,17	9	3,15	5

	Salz 0 kg						Salz 130 kg					
	Fl. 15	a	Fl. 60	a	Fl. 100	a	Fl. 15	a	Fl. 60	a	Fl. 100	a
(1) Region 3	4,11	40	2,84	6	2,74	3	4,39	50	2,91	7	3,26	5

Region 1, 2, 4; 3; Teufe 2, 4-5 km

Energie wird in Petajoule (1 PJ = 10¹⁵ Joule) angegeben. Angabe unter Fl. xx.

(1) Dichte 2200 kg/m³, spez. Wärmekapazität 900 J/(kg·K), Wärmeleitkoeffizient 5 W/(m·K)

(2) Dichte 2700 kg/m³, spez. Wärmekapazität 900 J/(kg·K), Wärmeleitkoeffizient 1 W/(m·K)

(3) Dichte 2200 kg/m³, spez. Wärmekapazität 900 J/(kg·K), Wärmeleitkoeffizient 1 W/(m·K)

(4) Dichte 2700 kg/m³, spez. Wärmekapazität 700 J/(kg·K), Wärmeleitkoeffizient 2,5 W/(m·K)

Fluidfluss (Fl.) in [kg/s], Injektionstemperatur = 70 °C, Produktionstemp. >= 100 °C für x Jahre [a]

	Salz 130 kg						Salz 283 kg					
	Fl. 15	a	Fl. 60	a	Fl. 100	a	Fl. 15	a	Fl. 60	a	Fl. 100	a
(1) Region 1	8,11	50	21,58	50	17,63	24	7,3	50	21,16	50	17,05	26
(1) Region 2	8,13	50	27,79	50	38,63	50	7,3	50	26,72	50	39,34	50
(1) Region 4	8,12	50	22,12	50	16,88	23	7,3	50	21,42	50	19,22	30
(2) Region 1	8,01	50	9,21	16	8,43	8	7,25	50	11,75	27	8,48	9
(2) Region 2	8,13	50	24,87	50	35,58	50	7,3	50	25,11	50	37,72	50
(2) Region 4	8,04	50	12,02	25	10,4	12	7,27	50	10,89	23	11,29	15
(3) Region 2	8,13	50	24,87	50	35,58	50	7,30	50	24,11	50	36,53	50
(4) Region 4	8,05	50	14,07	32	9,69	11	7,28	50	16,13	42	13,57	20

	Salz 0 kg						Salz 130 kg					
	Fl. 15	a	Fl. 60	a	Fl. 100	a	Fl. 15	a	Fl. 60	a	Fl. 100	a
(1) Region 3	9,45	50	21,78	45	15,00	17	8,10	50	21,77	50	15,72	21
(2) Region 3	9,15	50	11,37	20	8,71	7	9,15	50	8,46	15	8,87	10

Region 1, 2, 4; 3; Teufe 3, 5-6 km

Energie wird in Petajoule (1 PJ = 10¹⁵ Joule) angegeben. Angabe unter Fl. xx.

(1) Dichte 2700 kg/m³, spez. Wärmekapazität 700 J/(kg·K), Wärmeleitkoeffizient 2,5 W/(m·K)

(2) Dichte 3000 kg/m³, spez. Wärmekapazität 1100 J/(kg·K), Wärmeleitkoeffizient 1 W/(m·K)

(3) Dichte 2700 kg/m³, spez. Wärmekapazität 900 J/(kg·K), Wärmeleitkoeffizient 2,5 W/(m·K)

Fluidfluss (Fl.) in [kg/s], Injektionstemperatur = 70 °C, Produktionstemp. >= 100 °C für x Jahre [a]

	Salz 130 kg						Salz 283 kg					
	Fl. 15	a	Fl. 60	a	Fl. 100	a	Fl. 15	a	Fl. 60	a	Fl. 100	a
(1) Region 1	11,3	50	24,48	50	17,68	20	10,27	50	24,06	50	19,83	26
(1) Region 2	11,5	50	35,32	50	49,64	50	10,33	50	36,66	50	55,44	50
(1) Region 4	11,39	50	25,34	50	19,62	23	10,25	50	25,63	50	29,14	42
(2) Region 1	11,48	50	23,53	43	16,24	12	10,3	50	24,84	50	22,67	26
(2) Region 2	11,51	50	37,18	50	52,82	50	10,33	50	38,43	50	58,48	50
(2) Region 4	11,48	50	25,87	49	20,99	22	10,31	50	26,80	50	30,61	41

	Salz 0 kg						Salz 130 kg					
	Fl. 15	a	Fl. 60	a	Fl. 100	a	Fl. 15	a	Fl. 60	a	Fl. 100	a
(1) Region 3	13,19	50	27,85	50	18,47	18	11,37	50	25,81	50	20,7	24
(2) Region 3	13,34	50	27,3	44	22,24	19	11,48	50	24,04	44	16,84	13
(3) Region 3	13,36	50	27,85	50	26,58	27	11,47	50	27,60	50	23,33	27

Region 1, 2, 4; 3; Teufe 4, 6-7 km

Energie wird in Petajoule (1 PJ = 10^{15} Joule) angegeben. Angabe unter Fl. xx.

(1) Dichte 3000 kg/m³, spez. Wärmekapazität 900 J/(kg·K), Wärmeleitkoeffizient 5 W/(m·K)

Fluidfluss (Fl.) in [kg/s], Injektionstemperatur = 70 °C, Produktionstemp. ≥ 100 °C für x Jahre [a]

	Salz 130 kg						Salz 283 kg					
	Fl. 15	a	Fl. 60	a	Fl. 100	a	Fl. 15	a	Fl. 60	a	Fl. 100	a
(1) Region 1	15,01	50	44,35	50	55,26	50	13,41	50	43,37	50	56,1	50
(1) Region 2	15,01	50	53,33	50	75,06	50	13,40	50	52	50	81,61	50
(1) Region 4	15,00	50	44,8	50	55,7	50	13,41	50	43,96	50	57,66	50

	Salz 0 kg						Salz 130 kg					
	Fl. 15	a	Fl. 60	a	Fl. 100	a	Fl. 15	a	Fl. 60	a	Fl. 100	a
(1) Region 3	17,91	50	48,7	50	57,79	50	15,01	50	44,11	50	52,49	50