

## **Identifikation horizontaler Blattverschiebungen im Untergrund des Molassetrogs – neue Interpretationsergebnisse auf Grundlage von 2D-Seismik**

**Christoph Krämer**  
GeoEnergy GmbH

**Keywords:** 2D-Seismik, Blattverschiebungen, Horizontalverschiebungen, Flower-structures, Riedel-shears, Bayern, Molasse

### **Zusammenfassung**

Die Firma GeoEnergy GmbH ist Inhaberin der Aufsuchungskonzession für Erdwärme in drei aneinander grenzenden Aufsuchungsfeldern, die entlang des Südrandes der Süddeutschen Westmolassezone liegen und eine Gesamtfläche von ca. 600 km<sup>2</sup> umfassen. Der tiefere Untergrund der Aufsuchungsfelder wurde mit Hilfe mehrerer 2D-Seismikprofile aus der früheren Kohlenwasserstoffexploration erkundet, mit dem Ziel, das Störungsinventar und das vorherrschende Spannungsregime in ersten exploratorischen Schritten für etwaige Tiefengeothermie-Projekte zu erfassen.

Interpretationen der Seismikprofile im Raum Wessobrunn – Hohenpeißenberg lassen den Schluss zu, dass in diesem Untersuchungsgebiet neben schon seit längerem bekannten und publizierten zum Alpenrand parallel streichenden syn- und antithetischen Abschiebungen, deren Anlage vermutlich im Oberoligozän (ca. 25 Ma) erfolgte, jüngere SSW-NNE verlaufende Störungssysteme auftreten. Diese jüngeren Systeme werden aufgrund ihrer charakteristischen strukturellen Ausbildung als horizontale Verschiebungszonen gedeutet. Diese Blattverschiebungen stehen genetisch im Zusammenhang mit ansteigenden tektonischen Spannungen aus dem Alpenraum, deren Betrag und Richtung sich seit dem Obermiozän (vor etwa 10 Ma) grundlegend änderten. Die Horizontalverschiebungen haben sich in Ihrer Ausrichtung ältere Bruchzonen im Untergrund zunutze gemacht und diese reaktiviert.

Die an Blattverschiebungszonen gebundenen Scherbrüche („Riedel-Shears“) erzeugen bei fortschreitender Deformation offene Bruchsysteme. Untersuchungen an zahlreichen Geothermieprojekten weltweit haben gezeigt, dass Blattverschiebungen oftmals einen wesentlichen Beitrag für die Ergiebigkeit von Thermalwasservorkommen liefern und somit für einen Projekterfolg wesentliche Strukturelemente sind. Aufgrund der mit hoher Wahrscheinlichkeit hydraulischen Kommunikation zwischen den verschiedenen sich schneidenden Störungssystemen wird auch in der hier beschriebenen Struktur die Höffigkeit für die tiefengeothermische Erschließung als sehr günstig bewertet.

### **1. Einleitung**

GeoEnergy GmbH ist Inhaberin dreier aneinander grenzender Aufsuchungsfelder entlang des Südrandes der Süddeutschen Westmolassezone und erkundet dort geeignete tektonische Strukturen und Standorte für geothermische Kraftwerke. Im Folgenden soll über erste Ergebnisse der Interpretation reprozessierter 2D-seismischer Profile in einem Feld im Raum Wessobrunn – Hohenpeißenberg berichtet werden, welche das dortige Störungsinventar dokumentieren und Rückschlüsse auf das vorherrschende Spannungsregime ermöglichen.

Die Erschließung und Nutzung tiefer hydrothermaler Geothermievorkommen ist im südlichen Bayern seit einigen Jahren im Aufschwung, was nicht zuletzt auf die günstigen geologisch-tektonischen und hydrologischen Voraussetzungen des sog. „Molasse-Beckens“ zurückzuführen ist. Als Unterlage dieses tertiären Sedimentbeckens taucht eine wasserführende Kalksteinschicht des Oberen Jura (Malm), auch „Malmkarst“ oder „Malmtafel“ genannt, von der Donau alpenwärts in mehrere tausend Meter Tiefe unter das Alpenorogen hinab (Bay. Geol. Landesamt, 1996). Diese verkippten Kalksteine nehmen nach Süden bis auf > 600 m Mächtigkeit zu, wo in einer Tiefe von z.T. mehr als 4.000 m Temperaturen von 120° C und mehr erwartet werden (Bay. Staatsministerium, 2004). Aus diesem geologischen Horizont lassen sich große Mengen Thermalwasser fördern, da die Karbonate Verkarstungsprozessen unterliegen (Lösung der Karbonate durch CO<sub>2</sub>), wodurch sich eine erhöhte Permeabilität der Gesteinsschicht ergibt und hohe Förderraten möglich sind. Eine wirtschaftliche hydrothermale Stromerzeugung ist allerdings erst dann möglich, wenn sichergestellt ist, dass die Fördervolumina sehr groß sind (Dorsch, 2009), wobei eine Verkarstung im Gebirge allein hierfür in der Regel nicht ausreichend ist (Zimmer, 2006). Idealerweise müssen Zerrüttungszonen angebohrt werden, in denen stark erhöhte Wasserwegsamkeiten angetroffen werden. Diese zu erschließen bedarf einer intensiven geologischen Vorerkundung des tieferen Untergrunds der Aufsuchungsfelder, wobei die Analyse und Interpretation 2D-seismischer Linien der Kohlenwasserstoffindustrie in der Regel den ersten exploratorischen Arbeitsschritt darstellt. Die seismischen Linien erlauben eine Einschätzung und Charakterisierung des vorhandenen Störungsinventars und der Lagerungsverhältnisse der Gesteine. Abhängig vom Störungstyp und der Ausrichtung zum rezenten tektonischen Spannungsfeld können diese Strukturen sehr gut bis nicht durchlässig sein. Um solche Störungszonen hinsichtlich ihrer hydraulischen Eigenschaften besser bewerten zu können, ist daher das Wissen um das derzeit herrschende Spannungsfeld von entscheidender Bedeutung (Moeck et al., 2008), denn es bestimmt die Orientierung des zu erwartenden strukturgeologischen Inventars, also auch, ob Störungszonen extensiven oder kompressiven Charakter haben.

## **2. Regionalgeologischer Überblick**

Das nordalpine Molasse-Becken erstreckt sich über eine Länge von mehr als 1.000 km vom Gebiet des Genfer Sees über das Schweizer, Bayerische und Österreichische Alpenvorland bis zum westlichen Vorland der Karpaten (Walter, 1992). Das Sedimentbecken wurde ab dem Obereozän mit dem Abtragungsschutt der sich hebenden und nach Norden vorrückenden Alpendecken aufgefüllt. Es treten im Wechsel brackisch-marine Flachwasser-Serien (Meeresmolasse; UMM und OMM in Abb. 1) neben fluvio-terrestrischen und limnischen Gesteinen (Süßwassermolasse; USM und OSM in Abb. 1) als Beckenfüllung auf (Bay. Geol. Landesamt, 1996; Richter, 1992). Das Becken ist aufgrund der Auflast der alpinen Deckenstapel und der tertiären Beckenfüllung – insbesondere im Südteil – ständiger Subsidenz unterworfen. Daher erreicht die Molasse sehr hohe Mächtigkeiten, die am Südrand der Molasse-Zone, also am Nordrand der Alpen auf mehr als 4.000 m ansteigen. Profilschnitte zeigen heute das Bild eines asymmetrischen Beckens, das weit nach Süden unter den Deckenstapel der Alpen reicht (Abb. 1).

Die Folge des Vorrückens des alpinen Deckenstapels und zunehmender sedimentärer Auflast ist zudem die flexurartige Abbiegung der Tertiärbasis der Molasse-Zone, also auch des Malm, und damit einhergehend die Dehnung und das Aufreißen der europäischen Platte. Dies äußert sich in becken- oder alpenrandparalleler Bruchzonen (WSW-ENE), die sich girlandenförmig aneinander reihen oder fiedrig ablösen (Boigk, 1981). Antithetische Abschiebungen sind dabei häufiger als synthetische. Der Versatz der 50-60° steilen Abschiebungen beträgt oft nur einige Zehner Meter, kann jedoch in Einzelfällen auf mehr als 200 m ansteigen (Boigk, 1981).

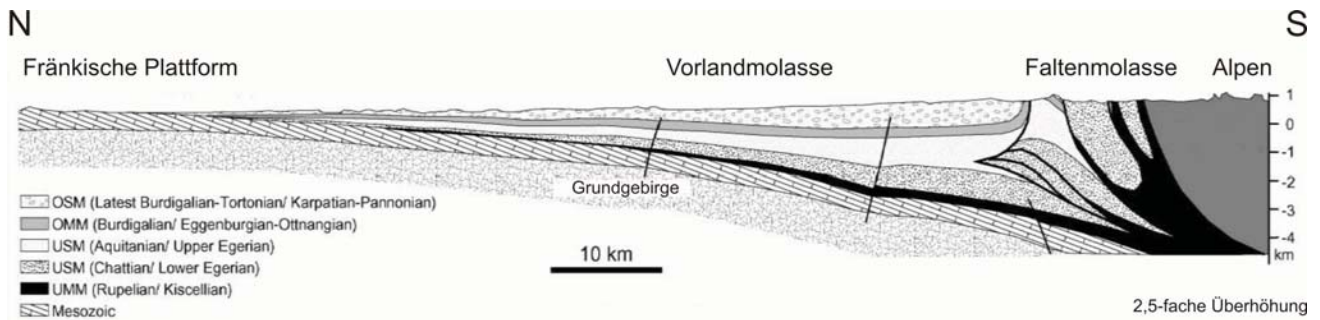


Abb. 1: Schematisches Geologisches Profil durch die Bayerische Molassezone. Zu sehen ist die Asymmetrie des Molassetroges, das Abtauchen des prätertiären Untergrundes (Grundgebirge, Trias, Jura, Kreide) unter den Deckenstapel der Alpen, die Unterteilung in steilstehende Faltenmolasse und subhorizontale Vorlandmolasse und alpenrandparallele, vorwiegend nordvergente Abschiebungen im Untergrund der Vorlandmolasse. (aus Kuhlemann und Kempf, 2002, nach Bayerisches Geologisches Landesamt, 1996).

Der durch die Subsidenz des Beckens bedingten Extensionstektonik steht eine Transpressionstektonik durch zunehmenden von Süden kommenden Druck der Alpen gegenüber. Spätestens seit dem Spätmiozän (ca. 10 Ma) veränderte sich dadurch das Spannungsfeld im Molasseraum grundlegend. Aus der jüngeren Einengung resultieren das Auftreten von kleineren Aufschiebungen, Transversalstörungen sowie das Auftreten von flachen Aufwölbungen vor der Faltenmolasse (Boigk, 1981). Abb. 2 illustriert am Blockbild die Raumlagen der tektonischen Hauptspannungsrichtungen und der daraus resultierenden Verwerfungen für die alpenrandparallelen Abschiebungen (links) und der Transversalstörungen (rechts).

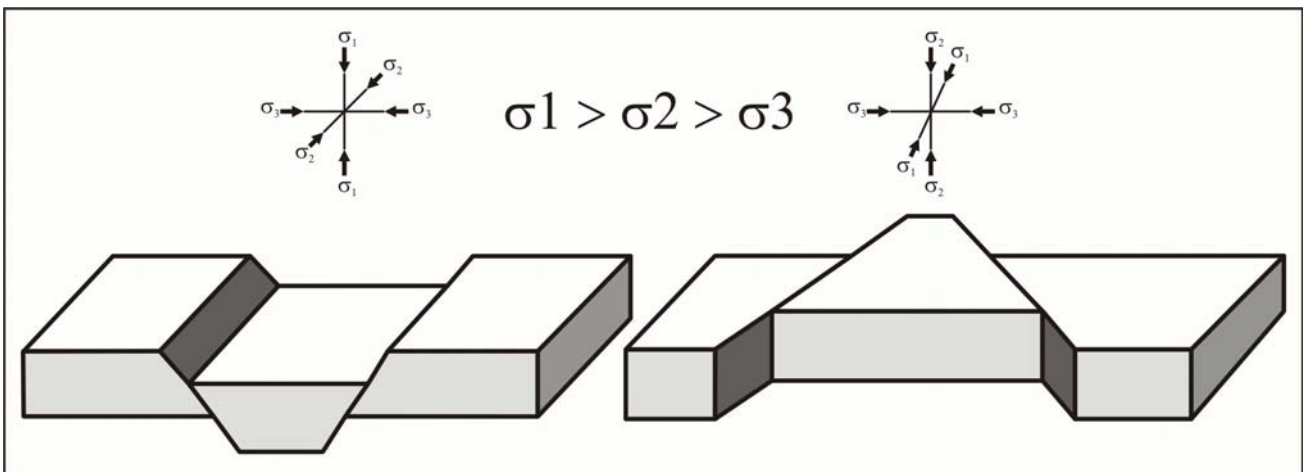


Abb. 2: Raumlagen der tektonischen Hauptspannungsrichtungen und der daraus resultierenden Verwerfungen (verändert nach Zolnai, 1991).  $\sigma_1$  ist die größte Spannung. Links ist  $\sigma_1$  „oben-unten“ orientiert was die Ausbildung von Abschiebungen zur Folge hat.  $\sigma_1$  entspricht hier der zunehmenden Auflast auf die Molassebasis. Im rechten Bild entspricht  $\sigma_1$  dem zunehmenden von Süden kommenden Druck der Alpen. Größte Spannung und kleinste Spannung ( $\sigma_3$ ) liegen in einer horizontalen Ebene was die Ausbildung von Blattverschiebungen zur Folge hat.

Das Molassebecken wird tektonisch unterschieden in die Vorlandmolasse im Norden und die Faltenmolasse im Süden. Die Faltenmolasse ist nach Norden der Vorlandmolasse aufgeschoben und wird als nördlichstes Bauelement der Alpen angesehen. Ihre Gesteine stehen steil, sind gefaltet und von zahlreichen Störungen durchzogen. Im Gegensatz dazu erscheint die ungefaltete

Vorlandmolasse als einfache, gering zum Alpenrand hin einfallenden Platte, die von der alpidischen Kompression weit geringer betroffen ist. Störungen innerhalb der Molasse sind hier selten. Der Südrand des Untersuchungsgebietes verläuft im Grenzbereich von Vorland- zu Faltenmolasse (s. Abb.3).

### 3. Interpretation und Ergebnisse

Im Raum Wessobrunn – Peißenberg, ca. 60 km südwestlich von München, wurden fünf seismische Linien für die detaillierte Interpretation ausgewählt, die allesamt von der ExxonMobil Production Deutschland GmbH stammen (Abb. 3). Die Surveys sind jeweils 12-18 km lang. Vier der fünf Linien verlaufen NNW-SSE und annähernd parallel mit einem Abstand von 2-4 km zueinander. Eine Linie verläuft WNW-ESE und schneidet die anderen Vier ungefähr im 45°-Winkel. Die Lage zueinander und die Position der im Folgenden beschriebenen Blattverschiebung sind Abb. 3 zu entnehmen.

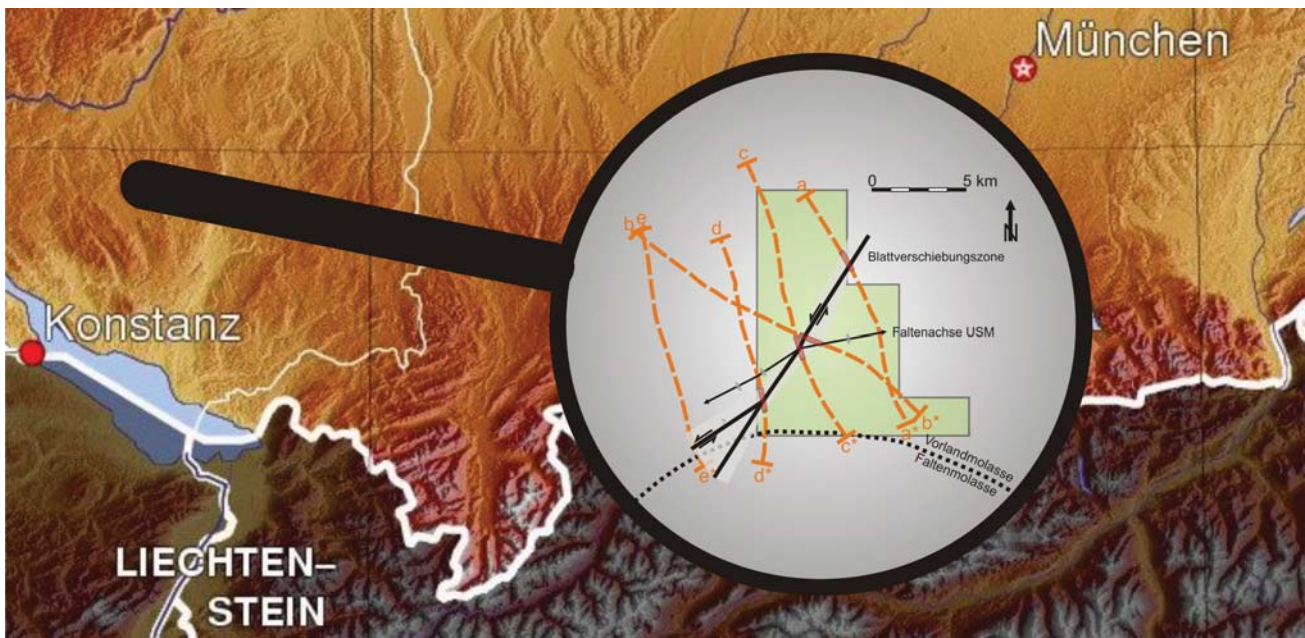


Abb. 3: Übersichtskarte. Das Untersuchungsgebiet (grün) liegt ca. 60 km südwestlich von München unmittelbar nördlich der Grenze von Vorlandmolasse zu Faltenmolasse. Für die Untersuchung stehen fünf seismische Linien zur Verfügung die allesamt von der ExxonMobil Production Deutschland GmbH stammen.

#### 3.1 Seismische Marker

Aus Schichtenverzeichnissen nahe gelegener Tiefenbohrungen der KW-Industrie konnten die seismischen Marker stratigraphisch zugeordnet werden. Es sind mehrere markante Leithorizonte erkennbar, die sich in allen Profilen wieder finden und gut korrelieren lassen (Abb. 4). Der Horizont „TopKreide“ ist aufgrund eines diskordanten Lithologiewechsels (Kalkmergel zu Sandstein) einer der auffälligsten Reflektoren in allen Profilen. Er entspricht der Basis der Molassesedimente. Die Kreide ist im Untersuchungsgebiet nur geringmächtig vertreten (< 100 m) und wird wegen ihrer faziellen Ähnlichkeit mit dem Malm mit diesem zu einem Paket zusammengefasst, so dass auch für die Interpretation der Horizont „TopKreide“ zur Ermittlung der Malmoberkante herangezogen wird. Der tiefste aufzulösende Reflektor ist „TopDogger“ welcher gleichbedeutend die Basis des Malm ist. Der Malm ist damit seismisch gut zwischen diesen beiden Horizonten abgebildet. Weitere seismische Marker sind die jüngeren Reflektoren „TopBau“, „TopEg“ und „TopUSM“ innerhalb der

tertiären Molassesedimente (Abb. 4c). Dabei steht „Bau“ für Bausteinschichten, Sande die sich an der Grenze Unter- zu Oberligozän (ca. 30 Ma) abgelagerten, „Eg“ steht für Eger, eine regionale stratigraphische Stufe die das Chatt und Aquitan umfasst (ca. 30-22 Ma) und „USM“ steht für Unteres Süßwassermolasse.

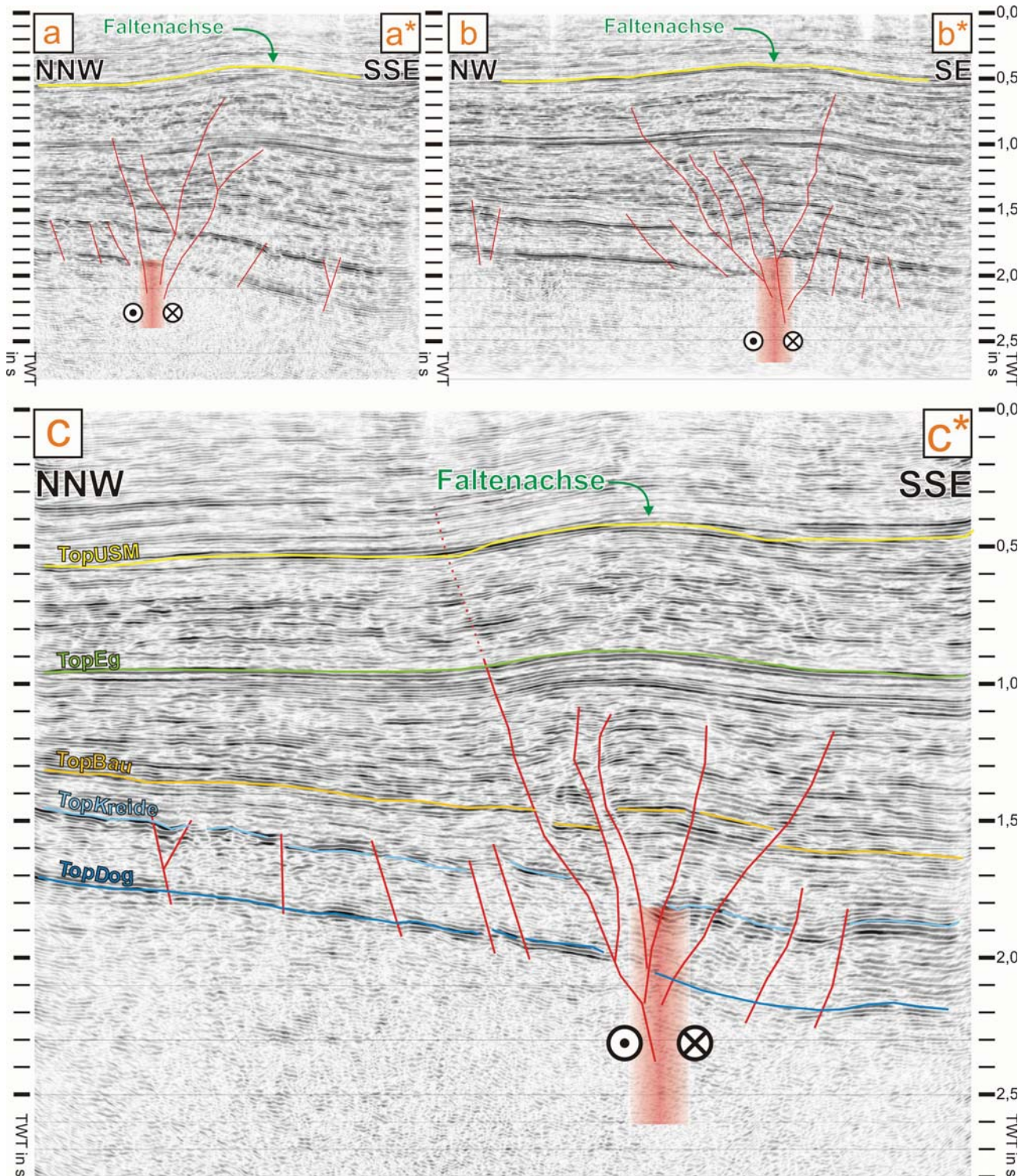


Abb. 4: Bildunterschrift siehe nächste Seite.

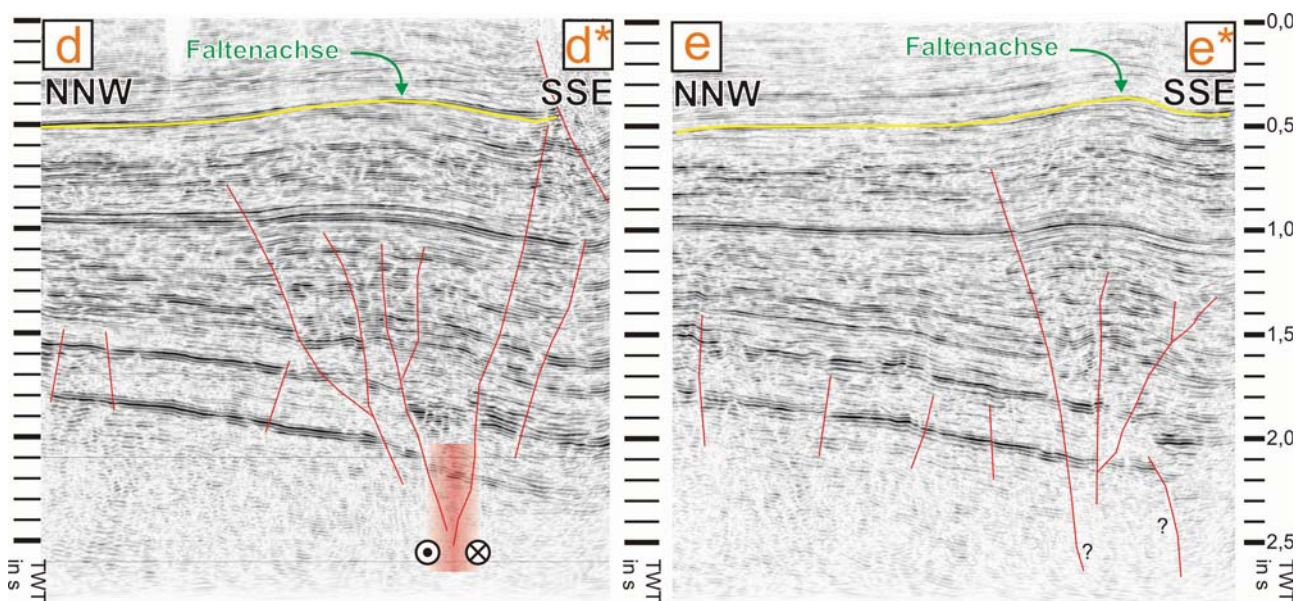


Abb. 4 (Fortsetzung): Interpretation der seismischen Linien. Die Lage der einzelnen Linien zueinander ist Abb. 3 oder Abb. 5a zu entnehmen. Profil c ist exemplarisch größer dargestellt als die anderen Linien um etwas zu erkennen. Eingezeichnet sind die wichtigsten Reflektoren „TopUSM“, „TopEG“, „TopBau“, „TopKreide“ und „TopDog“. Der Malm liegt zwischen „TopKreide“ und „TopDog“. Zudem ist die Lage einer Faltenachse im Horizont „TopUSM“ und das vorhandene Störungsinventar (vereinfacht) dargestellt. Weitere Diskussion siehe Text.

### 3.2 Lagerungsverhältnisse

Am Südrand (rechte Seite) der Profile d und e verläuft die Grenze zwischen autochthoner Vorlandmolasse und Faltenmolasse, welche an einer auffälligen Überschiebungsbahn im Profil d gut zu erkennen ist. Der prätertiäre Molasseuntergrund zeigt das typische Bild einer größeren Versenkung nach Süden hin und das Abtauchen der Malmtafel unter die Alpen. Die Molassebasis liegt im Norden des Untersuchungsgebietes rund 1.000 m höher als im Süden. Die Mächtigkeit des Malm von ca. 600 m bleibt dabei relativ konstant. Die Reflektoren ab „TopEg“ und jünger finden sich von Norden nach Süden allerdings in seichteren Tiefen und weisen somit einen dem Malm entgegen gesetzten Trend der Versenkungstiefe auf (s. Abb. 4c).

Die tertiären Molassesedimente zeigen eine auffällige Zunahme der Schichtmächtigkeiten um mehrere 100 m nach Süden hin. Diese Mächtigkeitszunahme ist kontinuierlich, scheint aber im Nordwesten der Profile nicht so ausgeprägt zu sein wie im Südosten nahe der Faltenmolasse. Die Mächtigkeit nimmt insbesondere im Unteren (Lattorf) und Mittleren Oligozän (Rupel) bis zur Grenze Oligozän – Miozän zwischen den Reflektoren „TopKreide“, „TopBau“ und „TopEg“ zu. In diesem Bereich sind zum Teil abrupte Mächtigkeits sprünge beiderseits von Störungen in den Profilen beobachtbar. Die Sedimente im Hangenden des „TopEg“ bleiben in Ihrer Mächtigkeit wieder relativ konstant. In allen Profilen ist als augenscheinlichste Struktur eine Antiklinale (Sattel) in den höheren Molasseeinheiten zu erkennen (siehe grüne Pfeile in den Profilen). Ihr Verlauf ist WSW-ENE und somit in etwa alpenrandparallel (siehe Abb. 3 oder Abb. 5a). Diese Faltung belegt, dass es in der Vorlandmolasse zu einer von der alpinen Deckenstirn ausgehenden Kompression des Oberbaues kam, die im Gegensatz zu den tieferen Stockwerken die Möglichkeit hatte, zum Hangenden auszuweichen (Bay. Staatsministerium, 2004).

### 3.3 Störungsinventar

Eine Übersicht über die identifizierten Störungen ist ebenfalls Abb. 4 zu entnehmen. Die vorhandenen Störungen zeigen zwei verschiedene Generationen von Störungen im Untergrund an:

Zum einen treten eine Vielzahl von kleinen Störungen im Niveau des Malm zwischen „Top Dogger“ und „Top Kreide“ auf. Sie zeigen keinen oder nur geringen Versatz bis zu 50 m und sind entweder nordvergent (antithetisch) oder südvergent (synthetisch) orientiert. Diese Störungen sind nicht mehr aktiv, denn sie reichen bis maximal zum Marker „TopBau“. Die Entstehung dieser Störungen steht mit der oben beschriebenen flexurartigen Abbiegung der Tertiärbasis der Molasse-Zone und damit einhergehender Dehnung und Aufreißen der europäischen Platte im Zuge des Vorrückens des alpinen Deckenstapels in Zusammenhang. Nach den gängigen Vorstellungen sind sie annähernd beckenparallel, also W-E orientiert, vorwiegend antithetisch und im Streichen auf 50 und mehr Kilometer zu verfolgen (Walter, 1992; Boigk, 1981). Ihre Anlage ist nicht jünger als Mittleres bis Oberes Oligozän (ca. 30-25 Ma), da die Störungen nicht in jüngere Horizonte zu verfolgen sind.

Zum anderen wird das Untersuchungsgebiet von einer horizontalen Verschiebungszone durchzogen, welche jüngeren Ursprungs ist, da die Bruchdeformationen wesentlich weiter in auflagernde Molassesedimente hineinragen. Diese Blattverschiebungszone wird von einer prominenten nach S einfallenden Hauptstörung im Norden und einer nach N einfallenden Hauptstörung im S begrenzt, von denen weitere Nebenstörungen abzweigen. Die Störzone wird als positive „Blumenstruktur“ interpretiert, welche als gehobenes Gebiet erscheint und neben einer vertikalen Komponente eine Aufschiebungskomponente erfordert (Sylvester, 1988). Man erkennt solche Strukturen in seismischen Schnitten senkrecht zu größeren transpressiven Blattverschiebungssystemen. Die beteiligten Störungen laufen alle in einem Bereich im prätertiären Basement in einer Hauptstörzone zusammen (rote Balken in den Profilen in Abb. 4). Dadurch lässt sich der Verlauf des Störungssystems mit SSW-NNE bestimmen. Im vorliegenden Profil e lässt sich die Blattverschiebungszone nicht exakt bestimmen.

In den Profilen b und c ist die bereits erwähnte Faltenachse der hangenden Molassesedimente nahezu senkrecht über der Blattverschiebungszone, in Profil a liegt die Faltenachse südlich und in im Profil d nördlich der Blattverschiebungszone. Dadurch ergibt sich ein Winkel von ca. 40° des Verlaufs des Störungssystems zur Faltenachse.

Die Störungen durchstoßen den Malm an einer auffälligen synthetischen Abschiebung, haben Ihren Ursprung aber in noch älteren Stockwerken, die von der Seismik nicht mehr deutlich abgebildet werden. Diese Abschiebung ist besonders deutlich in den Profilen b und c zu sehen. Sie versetzt die südlichen Einheiten des Beckenuntergrundes um ca. 200 m und ihre Anlage ist früher als die der Blattverschiebungszone: Die gesamte Störungszone im tieferen Bereich vom Dogger bis ungefähr zum Reflektor „TopBau“ weist Abschiebungen auf, im Hangenden jedoch Aufschiebungen. Diese unterschiedlichen Charakteristika sind häufig entlang von durchgehenden Störungsflächen festzustellen. Die Blattverschiebungszone hat sich bei Ihrer Entstehung durch den zunehmenden von S kommenden Druck ab dem Spätmiozän (ca. 10 Ma) ältere vorgegebene Schwächezonen zu Nutzen gemacht, diese reaktiviert und in Ihrem Verlauf durchstoßen.

Neben der Geometrie der Störungen gibt es weitere Hinweise, welche die Interpretation dieser Hauptstörungszone als Blattverschiebung stützen: Im ehemaligen Peißenberger Kohlebergbau unmittelbar südlich des Untersuchungsgebietes wird das Vorhandensein von lateralen Versätzen dokumentiert (Gillitzer, 1955). Auch aus großregionaler Sicht betrachtet erfordert der sigmoidale Verlauf der Grenze Vorland- zu Faltenmolasse (s. Abb. 3) laterale tektonische Ausgleichsbewegungen. Zudem können die beobachteten sprunghaften Mächtichkeitsänderungen

für gleiche stratigraphische Horizonte beiderseits von Störungen innerhalb der Molassesedimente am besten mit Blattverschiebungen erklärt werden.

#### 4. Diskussion

Zahlreiche Geothermieprojekte haben gezeigt, dass Blattverschiebungen oftmals einen wesentlichen Beitrag zur Ergiebigkeit von Thermalwasservorkommen liefern und somit für einen Projekterfolg wesentliche Strukturelemente sind (z.B. Faulds et al., 2005; Wolfgramm et al., 2007). Allerdings haben die Störungen meist extensiven Charakter, d.h. sie sind so zum tektonischen Spannungsfeld orientiert, dass sie neben einer lateralen auch eine abschiebende Bewegungskomponente aufweisen und sich somit tendenziell öffnen. In dem betrachteten Untersuchungsgebiet steht das Blattverschiebungssystem unter Kompression. Davon zeugen sowohl die Aufschiebungen innerhalb der positiven Blumenstruktur und auch eine Antiklinale direkt vor der Faltenmolasse bzw. oberhalb der Blumenstruktur. Die Orientierung der linkslateralen Störzone zum derzeit vorherrschenden Spannungsfeld und die damit zu erwartenden tektonischen Strukturen sind in Abb. 5A und 5B gezeigt. Die Hauptspannungsrichtung ist NNW-SSE. Senkrecht dazu kommt es zur Ausbildung von Falten und Aufschiebungen und parallel dazu zu Abschiebungen. Aufschiebungen und Aufwölbungen ergeben sich aus der Seismik.

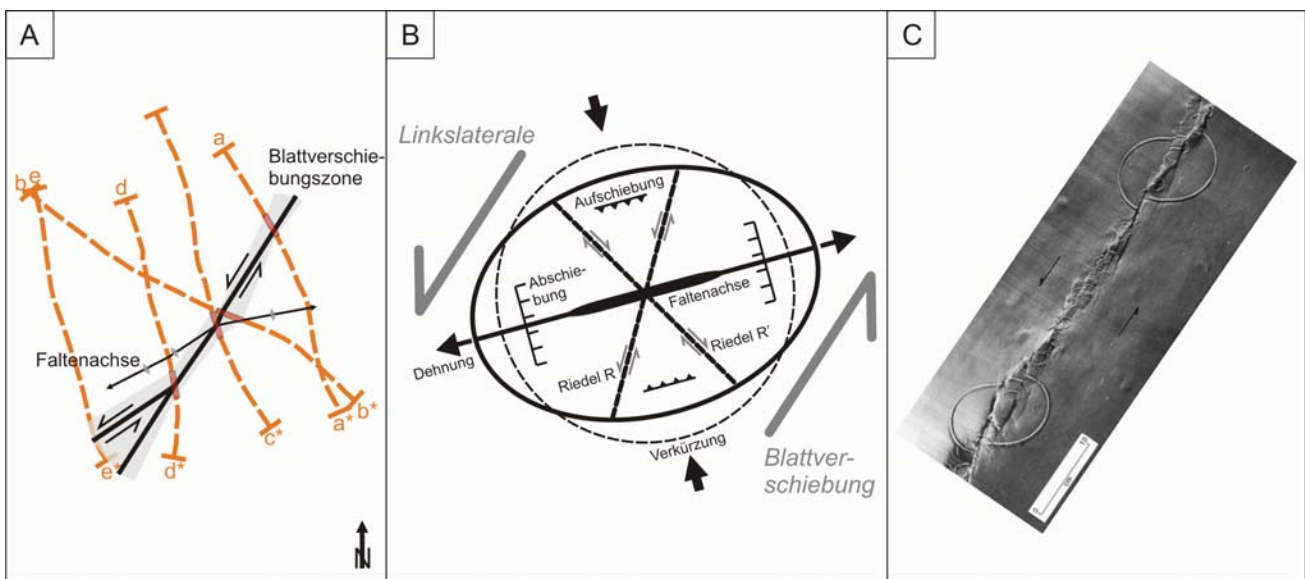


Abb. 5: A: Lage der seismischen Linien und der interpretierten Blattverschiebung (NNE-SSW). B: Geometrische Beziehungen von Falten, Ab- und Aufschiebungen sowie Riedel-shears in einer linkslateralen Blattverschiebungszone (verändert nach Harding, 1974). Die Spannungsellipse ist gemäß des Verlaufs der Blattverschiebungszone in A orientiert. C: R-Riedelscherflächen im Ton-Modell (aus Wilcox et al., 1973). Gut erkennbar ist das die synthetischen Riedel-shears Zugrisse sind und die Störungszone auflockern.

Innerhalb von Scherzonen kommt es zur Ausbildung kleinerer Scherbrüche, die unter dem Namen Riedelscherbrüche oder „Riedel-shears“ bekannt sind (Abb. 5B und 5C). Die Ausbildung von „Riedel-shears“ wurde sowohl großdimensional als Folge von „strike-slip“-Bewegungen durch Erdbeben, Störungen im Grundgebirge und intrakontinentalen Scherungen aber auch in kleineren Maßstäben in unterschiedlichen Gesteinen und geologischen Beanspruchungen dokumentiert (Katz et al., 2002). Bei fortschreitender Deformation können „Riedel-shears“ ein zusammenhängendes anastomosierendes Netzwerk von Scherbrüchen in Bruchzonen bilden (Richard et al., 1995) und somit die Klüftigkeit im Gebirge signifikant erhöhen. Die beiden markantesten Vorzugsrichtungen

der Riedelscherflächen werden mit R und R' bezeichnet (Abb. 5B). R-Riedelscherflächen sind die ersten sekundären Scherstörungen die entlang einer Blattverschiebung entstehen. Sie treten in der Regel en echelon angeordnet, d.h. gestaffelt hintereinander unter einem spitzen Winkel zur Hauptverwerfung auf. Da sie synthetisch sind, d.h. denselben Schersinn wie die Gesamtbewegung aufweisen, handelt es sich um Zugrisse (Abb. 5C). R-Riedelscherflächen lockern also die Scherzone auf, deswegen sind sie von besonderem Interesse für die hydrothermale Geothermie. Die Blattverschiebungszone auf solche internen Strukturen hin zu analysieren werden die folgenden Schritte der Analyse des Untergrundes des Untersuchungsgebietes sein, mit dem Ziel, genauere Aussagen über die Permeabilität innerhalb der Störungszone und somit über die potenzielle Ergiebigkeit von Thermalwasser treffen zu können.

## **5. Schlussfolgerungen**

Das Untersuchungsgebiet wird von zwei sich schneidenden Störungssystemen unterschiedlicher Orientierung durchzogen, was für die geothermische Energiegewinnung optimal ist: Zum einen sind dies die häufig in der Literatur erwähnten alpenrandparallelen Abschiebungen, die auf eine flexurartige Verbiegung der Molassebasis zurückzuführen sind und deren Anlage im Untersuchungsgebiet vermutlich nicht jünger als Oberoligozän ist. Zum anderen ist dies eine SSW-NNE verlaufende Blattverschiebungszone. Die jüngeren Blattverschiebungen haben sich bei Ihrer Entstehung durch die immer stärker werdende S-N gerichtete Druckbeanspruchung ab dem Spätmiozän (ca. 10 Ma) vorhandene Schwächezonen, also ältere alpenrandparallele Abschiebungen, zu Nutze gemacht, diese reaktiviert und in Ihrem Verlauf versetzt. An diesen Schnittstellen kann davon ausgegangen werden, dass die Gesteine intensiv zerrüttet sind. Die hydraulische Kommunikation entlang sich schneidender Störungssysteme innerhalb von Reservoirgesteinen ist erhöht, so dass eine solche Zone als ein geeignetes Ziel für die hydrothermale Geothermie angesehen wird. Da ein Korrelieren der Störungssysteme auf benachbarte Profilen hier allerdings aufgrund der zu großen Profilabstände schwierig ist, sind die Schnittstellen der beiden Störungssysteme mit der vorhandenen 2D-Seismik nicht eindeutig zu bestimmen.

Die Klüftigkeit innerhalb der Störungszone wird durch die Ausbildung von „Riedel-shears“ erhöht, denn diese sekundären Scherbrüche erzeugen offene Extensionsklüfte. Die synthetischen R-Riedelscherflächen laufen im Untersuchungsgebiet annähernd N-S. Diese lassen sich daher mit den vorhandenen 2D-seismischen Linien bisher nicht sicher erfassen.

Geplante 3D-seismische Messungen im Untersuchungsgebiet können diese Probleme lösen und einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung des Fündigkeitsrisikos liefern. Der Verlauf der Störungssysteme kann mit großer Genauigkeit bestimmt werden und somit deren Schnittpunkte als günstige Zielstrukturen. Darüber hinaus wird die Bestimmung seismischer Attribute, wie beispielsweise die Kohärenz-Analyse, das gesamte Störungsinventar innerhalb der Blattverschiebungszone erfassen.

## **6. Danksagung**

Die hier gezeigten seismischen Daten sind Eigentum der ExxonMobil Production Deutschland GmbH. Ich danke der Gesellschaft für die Erlaubnis, im Rahmen dieses Kongresses die erworbenen seismischen Profile zeigen zu dürfen.

## Quellenangaben

- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1996): *Geologische Karte von Bayern 1:500.000*. 4. Auflage, München.
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, INFRASTRUKTUR, VERKEHR UND TECHNOLOGIE (2004): *Bayerischer Geothermieatlas*. 104 S., München.
- BOIGK, H. (1981): *Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland*. Enke, Stuttgart.
- DORSCH, K. (2009): Tiefengeothermie im Alpenvorland. *Wissensportal Baumaschine.de*, 2(2009).
- FAULDS, J.E., HENRY, C.D. und HINZ, N.H. (2005): Kinematics of the northern Walker Lane: An incipient transform fault along the Pacific-North American Plate Boundary. *Geology*, 33(6):505-508.
- GILLITZER, G. (1955): *Geologische Neuaufnahme des Peißenberger Kohlereviere*. Bayer. Geologisches Landesamt (Hrsg.), München.
- HARDING, T.P. (1974): Petroleum Traps Associated with Wrench Faults. *AAPG Bulletin*, 58(7):1290-1304.
- KATZ, Y., WEINBERGER, R. und AYDIN, A. (2002): Geometry and kinematic evolution of Riedel shear structures, Capitol Reef National Park, Utah. *Journal of Structural Geology*, 26:491-501.
- KUHLEMANN, J. und KEMPF, O. (2002): Post-Eocene evolution of the North Alpine Foreland Basin and its response to Alpine tectonics. *Sedimentary Geology*, 152:45-78.
- MOECK, I., SCHANDELMEIER, H., ZIMMERMANN, G., KWIATEK, G. und HUENGES, E. (2008): Die Bestimmung des in-situ Spannungsfeldes – Ein Schlüsselthema für die Entwicklung tiefer geothermischer Reservoirs. Kongressband *Der Geothermiekongress 2008*, Karlsruhe, S. 67-73.
- RICHARD, P.D., NAYLOR, M.A. und KOOPMAN, A. (1995): Experimental models of strike-slip tectonics. *Petroleum Geoscience*, 1:71-80.
- RICHTER, D. (1992): *Allgemeine Geologie*. 4. Auflage, de Gruyter, Berlin, New York.
- SYLVESTER, A.G. (1988): Strike-slip faults. *Geological American Society Bulletin*, 100:1666—1703.
- WALTER, R. (1992): *Geologie von Mitteleuropa*. 5. Auflage, Schweizerbarth'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- WILCOX, R.E., HARDING, T.P. und SEELY, D.R. (1973): Basic Wrench Tectonics. *AAPG Bulletin*, 57(1):74-96.
- WOLFGRAMM, M., BARTELS, J., HOFFMANN, F., KITTL, G., LENZ, G., SEIBT, P., SCHULZ, R., THOMAS, R., UNGER, H.J. (2007): Unterhaching geothermal well doublet: structural and hydrodynamic reservoir characteristic; Bavaria (Germany). *Proceedings European Geothermal Congress 2007 in Unterhaching*, S. 1-6.
- ZIMMER, R. (2007): Ausbau der Tiefengeothermie in Bayern, In: *Der Bergbau in der Bundesrepublik Deutschland 2006*. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.), 37-43.
- ZOLNAI, G. (1991): *Continental wrench-tectonics and hydrocarbon habitat*. American Association of Petroleum Geologists, Education Dept., Tulsa, USA.

Christoph Krämer, GeoEnergy GmbH, Blücherstr. 20, 76185 Karlsruhe, Germany  
E-Mail: C.Kraemer@geoEnergy.de