

## **Die Strukturentwicklung des Malm in Unterhaching (Bayern) aus 3D-seismischen Daten**

**Ingmar Budach<sup>1</sup>, Markus Wolfgramm<sup>1</sup>, Inga Moeck<sup>2</sup> und Ewald Lüschen<sup>3</sup>**

Geothermie Neubrandenburg GmbH<sup>1</sup>, Technische Universität München/Helmholtz Zentrum Potsdam GFZ<sup>2</sup>, Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik Hannover<sup>3</sup>

**Keywords:** 3D-Seismik, Malm, Bayern, Molassebecken, Störungen, Störungsversatzanalyse

### **Zusammenfassung**

Der Malm des bayrischen Molassebeckens zählt zu den wirtschaftlich bedeutendsten geothermischen Aquiferen Mitteleuropas. Insbesondere der Großraum München war in der Vergangenheit das Ziel von intensiver geothermischer Exploration und Bohrungsaktivitäten. Störungzonen sind dabei ein bevorzugtes Ziel geothermaler Bohrungen, da sie mit einer erhöhten hydraulischen Durchlässigkeit assoziiert werden. Der Untersuchung des Strukturbaus potentieller Reservoirs kommt daher eine zentrale Rolle in der geothermischen Exploration zu.

Das Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) hat im Sommer 2009 3D-seismische Messungen am Standort Unterhaching durchgeführt. Das Messgebiet umfasste eine Fläche von etwa 27 km<sup>2</sup> und befand sich im Umfeld von mehreren Geothermiebohrungen, mit der Bohrung Unterhaching Gt 2 im Zentrum des Messgebiets.

Der Fokus bisheriger Untersuchungen an der 3D-Seismik Unterhaching lag in der Analyse von seismischen Attributen, seismischen Geschwindigkeiten und Strukturen sowie der Kartierung unterschiedlicher Faziesbereiche mit dem Ziel, geothermisch hoffige Bereiche im Aquifer zu identifizieren. Im Rahmen des vom BMWi finanzierten Forschungs- und Verbundvorhabens „Malmfazies“ wurde eine weitergehende Interpretation der seismischen Daten durchgeführt, um das Störungs- und Strukturinventar mit seiner tektonischen Entwicklung am Standort Unterhaching strukturgeologisch zu erfassen. Die prominenteste der so neu erfassten Strukturen besteht aus drei Störungen, die spitz aufeinander zulaufen und einen V-förmigen Horst bilden.

Zwei kinematische Modelle wurden entwickelt, die die Bildung dieser Strukturen erklären können. Ein Modell geht von einer Horizontalverschiebung mit positiver Blumenstruktur infolge einer lokalen Transpression aus, während ein alternatives Modell sich kreuzende, konjugierte Abschiebungen in einem Extensionsregime zugrunde legt.

Mittels einer Analyse von Störungsversätzen und Schichtmächtigkeitsänderungen wurden Phasen der Störungsaktivität und ihr relatives Alter in einem geodynamischen Kontext untersucht. Die Qualität beider Modellvorstellungen wurde anhand der somit gewonnenen Erkenntnisse diskutiert. Die strukturgeologische, zeitlich eingeordnete Entwicklung von Störungen ist für die Hoffigkeitsprognose deswegen relevant weil (I) aus der Hydrogeologie Störungzonen als hydraulisch besonders wirksame Zonen bekannt sind, (II) weil Störungen, die bereits in der Kreide – der Verlandungs- und Verkarstungsperiode – aktiv waren, eine hohe Wahrscheinlichkeit zur Verkarstung aufweisen und (III) weil Störungen, die häufig reaktiviert wurden, eine geringere Wahrscheinlichkeit haben, verheilt zu sein.

### **1. Einleitung**

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Geothermische Charakterisierung von karstig-klüftigen Aquiferen im Großraum München“, durchgeführt vom Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik Hannover (LIAG) und dem bayrischen Landesamt für Umwelt (LfU) wurden im Bereich um die Geothermiebohrung Unterhaching Gt 2 3D-seismische Messungen im Jahre 2009 durchgeführt

(Lüschen et al. 2011). Neben der erhöhten Strukturauflösung des Malm-Aquifers und dessen Charakterisierung zur geothermischen Erschließung hatten diese Messungen das Ziel, zusammen mit weiteren verfügbaren 2D-seismischen Profilen in ein Großraum-Strukturmodell eingebunden zu werden. Dieses Modell war Grundlage einer hydraulisch/thermischen Simulation der Veränderungen durch Produktions- und Reinjektionsbohrungen im Modellgebiet (Abb. 1, Schulz und Thomas, Eds. 2012).

Neben den tertiären Molasse-Schichten treten besonders der Lithothamnienkalk (Ober-Eozän), Purbeck/Top Malm und die Basis Malm (evtl. über dünnem Dogger, sonst Kristallin) als durchgehende und gut kartierbare Reflexionshorizonte auf. Der Malm-Aquifer ist teils durch chaotische seismische Signale geprägt, sonst durch stückweise lagenartige Reflexionen, die durch die Becken/Lagunen-Fazies interpretiert werden können. Die Bereiche chaotischer Struktur sind ansonsten durch relative Transparenz, hohe seismische Frequenzen bei entsprechender spektraler Dekomposition, "Downlap"-Strukturen am Rand und durch Aufwölbungen in ihrem Oberbau gekennzeichnet und können als Riff/Massen-Fazies angesprochen werden. Die Riff/Massen-Fazies ist für die geothermische Exploration von Interesse, da sie mit Dolomitisierung und erhöhter Porosität verbunden sein kann. Weitere geothermisch relevante Explorationsziele wurden identifiziert mit "Relay"-Rampen (hier Extension!) in einem staffelförmigen, ca. 70°E streichenden Abschiebungssystem, weiteren Hauptstörungen 45°E (von Uha-Gt2 durchbohrt) und 25°E streichend, kreisförmigen Strukturen (Dolinen, Verkarstung) und Zonen geringer seismischer Geschwindigkeit, die auch mit Störungszonen korrelieren (Lüschen et al. 2014).

Diese Eigenschaften lassen auf erhöhte bruchhafte Auflockerung schließen und damit auf eine erhöhte Kluftporosität. Auf "subseismischer" Skala lassen sich durch azimut-selektives Spezialprocessing Bereiche mit Vorzugsrichtungen der Klüftigkeit identifizieren (Lüschen et al., 2014). Auf eine weitere kinematische Interpretation wurde wegen der kleinen Größe (ca. 27 km<sup>2</sup>) zunächst verzichtet. Diese soll nun im vorliegenden Artikel versucht werden.

## **2. Regionale Geologie**

Das Untersuchungsgebiet (UG) befindet sich im bayerischen Molassebecken des nördlichen Alpenvorlandes. Dessen Strukturentwicklung und die wichtigsten, aus Bohrungen bekannten, lithologischen Einheiten werden im Folgenden kurz vorgestellt.

### **2.1. Strukturentwicklung des Molassebeckens**

Im Zuge der variszischen Orogenese kommt es im Perm und Karbon zur Entwicklung mehrerer, vor allem NE gerichteter, Tröge, die sich im kristallinen Grundgebirge öffnen. Durch diese Zerrungstektonik werden Schwächezonen angelegt, die später zu den Hauptbewegungslinien tektonischer Aktivität im bayerischen Molassebecken werden (Freudenberger & Schwerd 1996).

Ab der Obertrias bis zur Unterkreide öffnet sich der Penninische Ozean entlang einer, ebenfalls NE streichenden, Riftzone. Dieser hat bis in die Oberkreide Bestand und wird durch die beginnende Kollision zwischen der Afrikanischen und Europäischen Platte zum Ende des Mesozoikums geschlossen (Bachmann et al. 1987).

Zwischen Oberjura und Oberkreide erfolgt die wesentliche tektonische Prägung des südostbayerischen Raums. Die Schwächezonen entwickeln sich zu Lineamenten, welche erstmals als Bewegungszonen in Erscheinung treten. Ab dem Unterjura kommt es zu intensiver transpressiver Aufschiebungstektonik. Bis ins frühe Tertiär werden das Böhmisches Massiv und das Landshut-Neuöttinger Hoch entlang NW streichender Schrägaufschiebungen aufgeschoben (Bachmann et al. 1987). Die Hauptbewegungen und größten Sprunghöhen folgen ab der Oberkreide, also nach Ablagerung von Malm und Purbeck (siehe Tabelle 1).

Im Coniac/Santon (Oberkreide) kommt es als Fernwirkung der alpidischen Orogenese zu erhöhter tektonischer Unruhe im gesamten Molassebecken, mit synsedimentärer Absenkung, allgemeiner Erhöhung der Sprungbeträge und der Anlegung nordfallender, antithetischer Sekundärbrüche (Freudenberger & Schwerd 1996). Infolge der zunehmenden Absenkung des Molassebeckens unter die Alpen verschiebt sich die regionale Tektonik von einem transpressiven, von Aufschiebungen dominierten System hin zu einem von lokaler Abschiebungstektonik dominiertem System. Dies führt zur Entwicklung von beckenparallelen, antithetischen und synthetischen Abschiebungen (Bachmann et al. 1987).

Die tektonische Unruhe dauert im Tertiär etwa bis zum Eger an und es kommt zu einer weiteren Erhöhung der Sprungbeträge an den Hauptbewegungslinien und Sekundärbrüchen. Durch die westlich bis südwestlich orientierte Bewegung der Böhmisches Masse wird das bisherige tektonische Geschehen überprägt und die präexistente Lineamente (z.B. das Landshut-Neuöttinger Hoch) durch seitlichen Druck verformt (Freudenberger & Schwerd 1996).

Die tektonische Unruhe scheint gegen Ende des Oberligozäns beendet zu sein und eine relative Ruhephase folgt, welche bis zum Ende des Mittelmiozäns reicht.

Eine letzte Phase tektonischer Aktivität folgt im Mittel- bis Obermiozän mit erneuter Erhöhung der Sprunghöhen an den Hauptbewegungslinien (Freudenberger & Schwerd 1996).

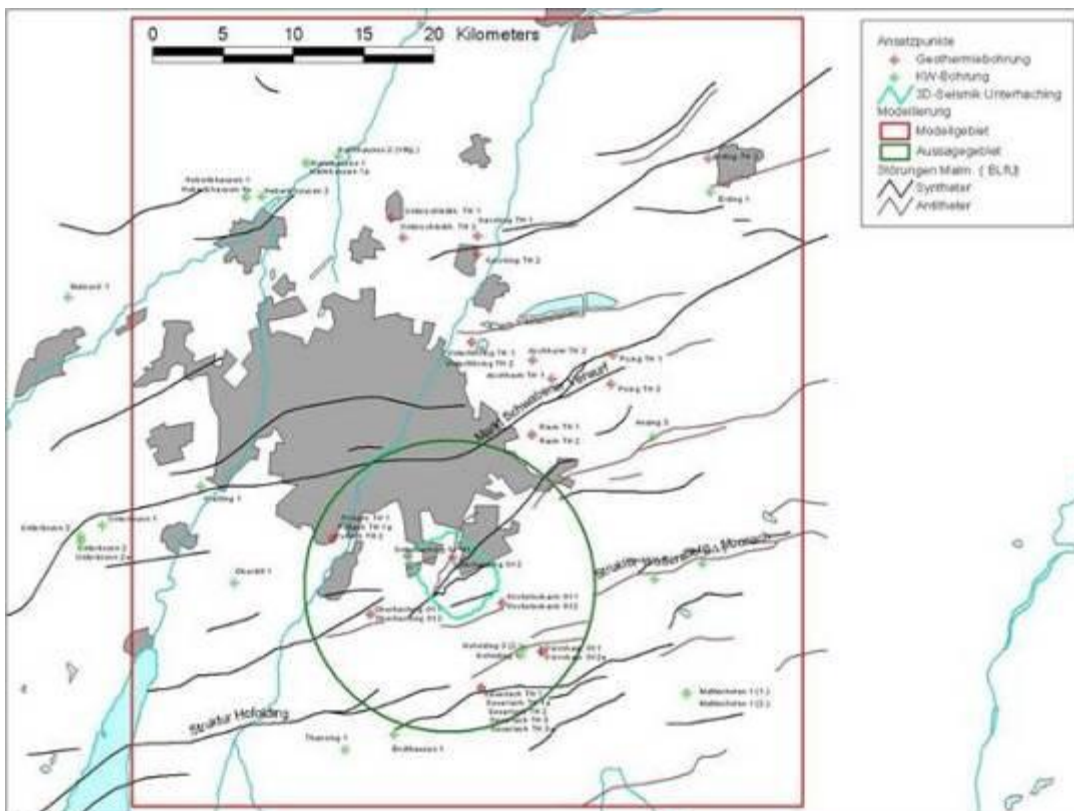


Abb.1: Umriss der 3D-Seismik: Unterhaching ist bis jetzt nur ein Platzhalter. Ich habe mit Kirsten gesprochen und sie wird noch eine neue Karte erstellen, die vor Abgabe des Artikels eingefügt wird.

### 2.3. Relevante lithologische Einheiten

Die im Zentrum des UG befindliche Bohrung Unterhaching Gt 2/06 erbohrte den Malm in einer Endteufe von 3590 m TVD (*total vertical depth*). Ein Kurzschichtenverzeichnis der Bohrung ist in Tabelle 1 gegeben.

Tabelle 1: Kurzsichtenverzeichnis der Bohrung Unterhaching Gt 2/06 (dick gestrichelt: Schichtlücke, dicke mit dünner Linie: Transgressions – Regressionsdiskordanz), MD: Bohrungslänge (*measured depth*), TVD: vertikale Tiefe (*total vertical depth*), nach Wolfgramm et al. (2007)

Stratigraphie				Tiefe	Lithologie	
				[m u. GOK] TVD		
Abteilung		Formation				
Quartär/Pleistozän				20	Kies. Sand	
Tertiär	Unter-Miozän	O.Eger/Aquitän	inkl. Nantesbuchsst.	1685.0	Sandstein	
	Ober-Oligozän	U. Eger/Chatt	Hangen. Tonmergel	1730.0	Tonmergel	
			Sandserie/Bausandstein	2385.6	Bausandstein	
			Liegende Tonmergel	2503.5	Tonmergel	
	Unter-Oligozän	Kiscell/Rupel	Bändermergel	2777.2	Kalkmergel	
	Ober-Eozän	Priabon	Lithothamnienkalk	2839.4	Kalkstein	
Kreide	Ober-Kreide	Turon	Kalkmergelstein	2906.5	Kalkmergel	
	Unter-Kreide	Alb. Gault	Gaultsandstein	2934.9	Sandstein	
		Valangis-Hauterive		2939.4	Kalkmergel/ Tonmergel	
		Berrias Purbeck	Schuttlage		2945.0	Brekzie
			Kalkfeinsandstein Kalkstein		2956.5	Sandstein
					2967.1	(dol.) Kalkstein
					2977.6	beigegr. Kalkst.
	Jura	Malm	Thiton Kimmeridge	Riffkalke. Plattenkalke?	3590.0 (ET)	Kalkstein/De- Dolomite

### 3. 3-D Seismik Unterhaching

#### 3.1. Interpretierte Horizonte

Die Interpretation der acht in Abb. 2 gezeigten Horizonte erfolgte anhand von Reflexionsmustern, wie sie bereits aus anderen Gebieten des Molassebeckens bekannt waren (siehe z.B. Schulz und Thomas 2012) sowie durch Vergleich mit Lithomarkern der Bohrung Unterhaching Gt 2/06. Die untersten sechs davon (Basis Malm – Bausteinschichten) wurden für die vorliegende Arbeit verwendet. Der Lithothamnienkalk ist durch einen deutlichen Reflektor unterhalb des Oligozän gekennzeichnet und dient häufig als Leithorizont bei der Interpretation seismischer Daten im Molassebecken (Lüschen et al. 2011). Das Unter-Oligozän fällt als breiter Bereich von nur schwach ausgeprägten Reflektoren auf, was in den geringen Impedanzunterschieden innerhalb der Kalkmergel des Kiscell begründet liegt (siehe Tabelle 1). Die Basis des etwa 100-150 m breiten Bereiches unterhalb des Lithothamnienkalks wird oft als Purbeck oder Top Malm angesprochen. Beide Horizonte weisen im Gegensatz zu den hangenden Schichten die deutlichsten Sprunghöhen auf. Die Basis Malm ist etwas weniger glatt ausgeprägt als Lithothamniumkalk und Purbeck/Top

Malm, was wahrscheinlich an der vermehrten Streuung des seismischen Wellenfeldes innerhalb des Malm liegt, weist aber einen deutlichen Kontrast zum Liegenden (Kristallin) auf (Abb. 2).

Die Interpretation von Bausteinschichten, Chatt-Sanden und Nantesbucht-Sandstein erfolgte mit Hilfe von Lithomarkern der Bohrung Unterhaching Gt 2/06. Anhand der Bausteinschichten ist hierbei der Übergang von den Kalkmergeln des Unter-Oligozän hin zu den kompakten Sandsteinen der Bausteinschichten deutlich erkennbar. Die Horizonte Unter-Oligozän 01 und Unter-Oligozän 02 wurden keinem speziellen Lithomarker zugewiesen, stattdessen wurde nach gut nachverfolgbaren Reflektoren im Unter-Oligozän gesucht. Da sich in dieser Zeit der Hauptteil des flexurhaften Abbiegens des Molassebeckens unter die Alpen vollzog, sind Horizonte in dieser Schicht wichtig für das Verständnis der kinematischen Entwicklung in Unterhaching.

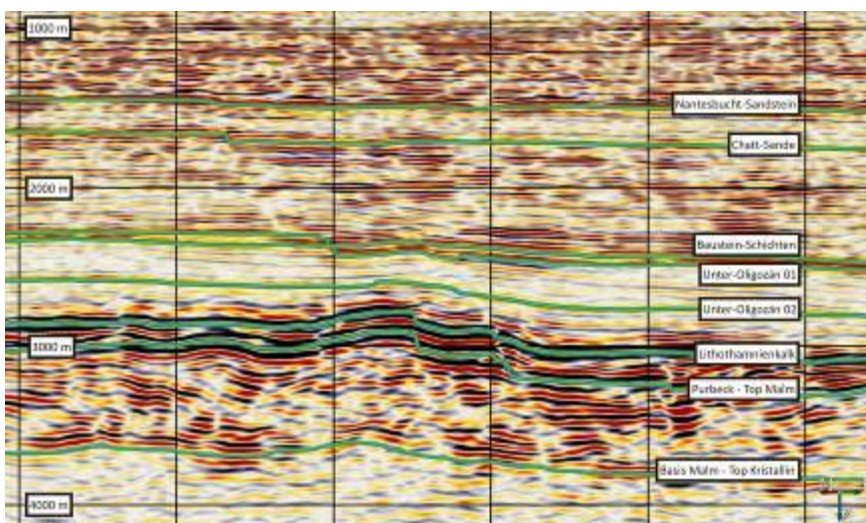


Abb.2: Übersicht interpretierter Horizonte, keine vertikale Überhöhung

### 3.2. Strukturbau und Störungen

Der Malm Unterhachings ist von zahlreichen Störungen durchzogen, welche bis ins Untere Tertiär reichen. Zur Veranschaulichung ist in Abb. 3 die Topographie des Top Lithothamnienkalk abgebildet und die wichtigsten strukturellen Elemente farblich eingetragen.

Die prominenteste Struktur ist ein deutlicher Tiefenabsatz entlang einer 45° streichenden Störung, die eine Sprunghöhe von 100 m im SW und bis zu etwa 250 m im NE aufweist. Eine horstartige Struktur wird zwischen dieser Störung und einer 25° streichenden Störung sichtbar. Die Sprunghöhe beträgt etwa 80 m. Eine weitere 70° streichende Störung setzt sich aus mehreren Teilstörungen zusammen, die durch *en Echelon* gestaffelte Rampen miteinander verbunden sind, wobei die Sprunghöhen der einzelnen Teilstörungen zwischen 100 m und 180 m liegen. Lüschen et al. (2011, 2014) folgend werden diese drei Störungen hier entsprechend ihrer Streichrichtung als 25°-Störung, 45°-Störung und 70°-Störung bezeichnet. Sie vereinigen sich im Südwesten des Messgebietes.

Zusätzlich gibt es noch zwei weitere 70° streichende Störungen: die Westham-Störung im NW und die Kirchstockach-Störung im SE. Die Sprunghöhe der Westham-Störung beträgt ca. 80 m, die der Kirchstockach-Störung etwa 100 m, verteilt auf zwei Stufen.

### 4. Methodik

Zwei Methoden zur Rekonstruktion der Störungshistorie wurden angewandt: (i) Störungsversatzanalyse und (ii) die strukturelle Rekonstruktion durch *horizon flattening*.

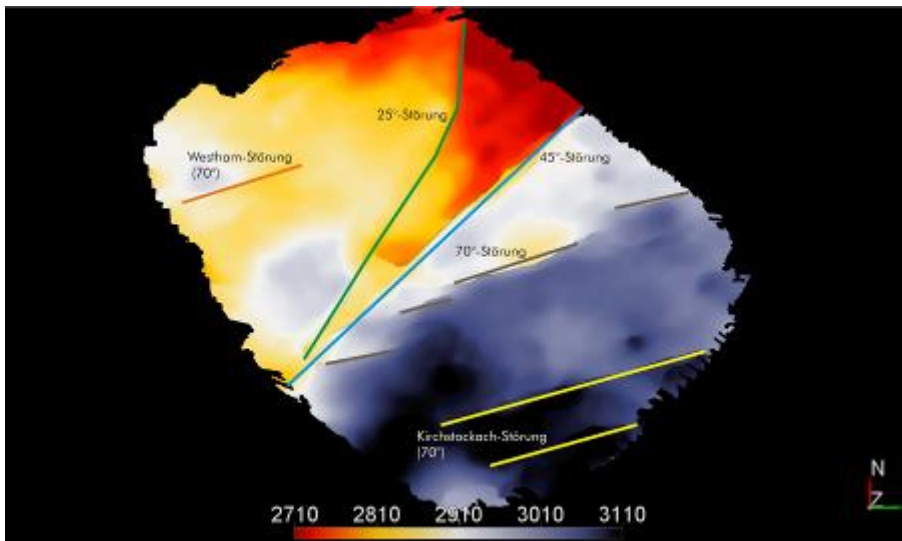


Abb.3: Blick auf Lithothamnienkalk, Farbskala gibt die Tiefe in m an, von flach (rot) zu blau (tief)

#### 4.1. Störungsversatzanalyse (SVA)

Eine Möglichkeit besteht darin, die Entwicklung der Störungsversatzmagnituden über den Verlauf der Störung hinweg zu untersuchen. Hierfür werden ab dem Horizont, ab dem die ersten Versätze einsetzen, die Versatzbeträge gemessen. Die Störung wird sukzessive bis zum untersten Horizont, auf welchem noch deutliche Störungsversätze erkennbar sind, untersucht. Anschließend wird der Störungsversatz für jeden Horizont vom Versatz des darüber liegenden Horizonts abgezogen. Man erhält damit den quantitativen Störungsexpansionsindex (*quantitative fault expansion index* – QFEI). Der QFEI gibt an, um welchen Betrag sich die Störung zu welcher Zeit bewegt hat. Ein ähnlicher Ansatz wurde bereits von Moeck et al. (2015) und Tvedt et al. (2013) erfolgreich angewandt.

Ein Beispiel für die Bestimmung der QFEIs in Unterhaching ist in Abb. 5 gegeben. Während in den Bausteinschichten noch kein Störungsversatz erkennbar ist, kann ein deutlicher Versatz von 110 m im Kiscell (Rupel) ausgemacht werden. Dieser Betrag wurde ebenfalls am Lithothamnienkalk gemessen. Ab dem Turon und bis zum Oberen Malm beträgt der Versatz 150 m (siehe Abb. 5 links).

In Abb. 5 sind die QFEIs sowie der kumulative, an der Störung aufgebaute, Versatz graphisch dargestellt. Die schwarze Linie und die untere X-Achse geben den gesamten, kumulativen Versatz an, die QFEIs werden durch graue Balkendiagramme und die obere X-Achse repräsentiert.

Im gezeigten Beispiel lässt sich erkennen, dass die 45°-Störung im Zeitraum zwischen Malm (Zeta) und Bausteinschichten mindestens zwei Aktivitätsphasen hatte: eine im Turon (ca. 93,5 – 89,0 Mio Jahre) und eine im Kiscell (33,7 – 28,5 Mio Jahre).

#### 4.2. Strukturelle Restauration durch *horizon flattening*

*Horizon flattening* ist eine schnelle, einfache und weit verbreitete Methode, um strukturelle Besonderheiten abzubilden, die in herkömmlichen Seismogrammen verborgen blieben und ist ein Standardwerkzeug in den meisten seismischen Interpretationsprogrammen (Jamaludin et al. 2015).

Seismische Horizonte enthalten nicht nur räumliche, sondern auch zeitliche Informationen, da sie zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Vergangenheit abgelagert wurden. Durch *horizon flattening*



können deshalb signifikante geologische Besonderheiten einer bestimmten Zeit zum Vorschein gebracht werden (Bland et al. 2006).

Bei der strukturellen Restauration wird das gesamte seismische Volume auf einen Horizont abgeflacht und der Abstand zum liegenden Horizont untersucht. Zwei Grundannahmen müssen für die Anwendung dieser Methode getroffen werden: (i) Bewegung fand immer nur vertikal statt, nicht horizontal und (ii) der Horizont, auf welchen das 3D-Volumen „abgeflacht“ wurde, wurde selbst horizontal und ungestört abgelagert.

Im Bereich aktiver Störungen sollten sich dann Variationen in der Horizontmächtigkeit feststellen lassen. So sollten die Sedimentmächtigkeiten in einem sich entwickelnden Graben zunehmen (z.B. Tvedt et al. 2013) und entlang einer aktiven Abschiebung abnehmen. In Abb. 6 sind drei Beispiele für eine Rekonstruktion durch *horizon flattening* dargestellt. Auf der linken Seite ist jeweils der Horizont abgebildet, wie er auf den hangenden Horizont rekonstruiert wurde. Auf der rechten Seite sieht man den „originalen“, nicht rekonstruierten Horizont. Die Farbskala gibt jeweils die Mächtigkeit zum hangenden Horizont (links) oder die Tiefe (rechts) an. Die Farben reichen dabei von Rot (gering mächtig bzw. flach) bis Blau (mächtig bzw. tief). In den rechten oberen Ecken der Abbildungen sind Histogramme der Tiefenverteilung abgebildet.

### 4.3. Ergebnisse von SVA und struktureller Restauration

Aufgrund des chaotischen Reflektionsverhaltens im Malm wird eine Störungsanalyse erschwert. Die Rekonstruktion der Basis Malm auf den Lithothamnienkalk (Abb. 7a) zeigt jedoch eine deutliche Störungsaktivität entlang der zentralen 70°-Störung und den anderen beiden Störung mit 70° Streichrichtung (Kirchstockach- und Westham-Störung) sowie teilweise auch entlang der 45°-Störung. Die Rekonstruktion des Purbeck (Top Malm) auf den Lithothamnienkalk legt nahe, dass die 45°-Störung vor allem in der Zeit zwischen Ablagerung des Purbeck und des Lithothamnienkalks aktiv war. Die Hauptaktivität zur Zeit der Ablagerung des Malm und der späteren Verlandungsphase geht somit auf die 70°-Störung zurück. Diese Beobachtung ist in guter Übereinstimmung mit der Streichrichtung des sich von der Obertrias bis zur Oberkreide bestehenden Penninischen Ozeans.

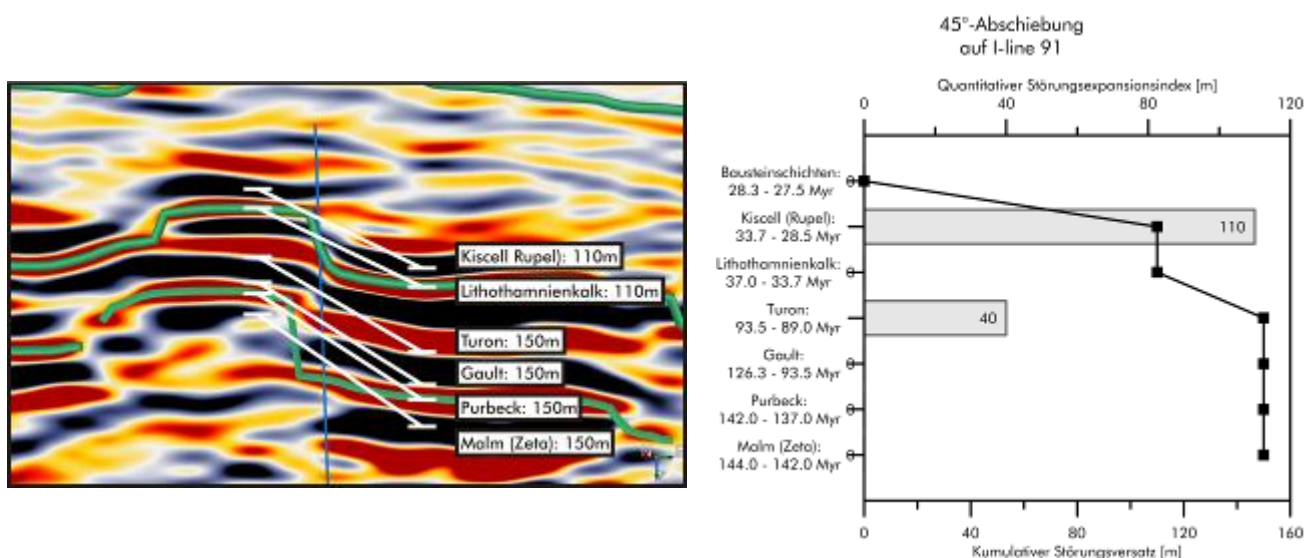


Abb.4: Störungsversatzanalyse für 45°-Störung auf I-line 91, (links) Verwendete Horizonte und gemessene Versätze, (rechts) Quantitativer Störungsexpansionsindex zeigt Störungsaktivität in zwei Phasen an

Gegen Ende des Mesozoikums und zum Beginn des Tertiärs verlagerte sich die Vorzugsrichtung der Störungsaktivität und eine deutliche Aktivität entlang der 45°-Störung zu Beginn des Unter-Oligozän ist erkennbar. Die in 70°-Richtung streichenden Störungen sind weiterhin aktiv und im weiteren Verlauf des Unter-Oligozäns setzt Störungsaktivität auch entlang der 25°-Störung ein. Das spätere Einsetzen der Störungsaktivität entlang der 25°-Störung war auch in der SVA deutlich erkennbar. Während alle übrigen Störungen QFEIs > 0 m im Turon und Kiscell aufwiesen, gab es entlang der 25°-Störung nur Aktivität im Kiscell. Die Zunahme der Störungsversätze im Turon (Oberkreide) deckt sich mit der aus früheren Studien bekannten tektonischen Unruhe in dieser Zeit (siehe Abschnitt 2.1.).

Die zeitlich versetzten Aktivitätsphasen sprechen somit eher für das Modell der sich kreuzenden, konjugierten Störungen. Im Falle einer positiven Blumenstruktur hätte zumindest die beiden Störungen, die den V-förmigen Horst begrenzen, zeitlich aktiv sein müssen. Strukturelle Restauration und SVA deuten jedoch darauf hin, dass zumindest die 25°-Störung deutlich später aktiv war als die 70°-Störung.

## **5. Diskussion**

### **5.1. Mögliche Entstehungsgeschichten**

In Abb. 7 sind zwei mögliche Entwicklungsszenarios für die in Abschnitt 3.2. gezeigten Strukturelemente abgebildet. Hypothese A geht von einer positiven Blumenstruktur aus, während Hypothese B konjugierte, sich kreuzende Abschiebungen zum Inhalt hat. Beide Modellvorstellungen werden im Folgenden kurz beschrieben.

Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei beiden Hypothesen um Modellvorstellungen handelt, die in erster Linie darauf abzielen, die charakteristische, V-förmige Horststruktur im Zentrum des Untersuchungsgebiets zu erklären. Es ist durchaus denkbar, dass die tatsächliche tektonische Entwicklung in Unterhaching Elemente beider Hypothesen enthält.

#### **5.1.1. Hypothese A: positive Blumenstruktur**

Die charakteristische Störungsgeometrie mit V-förmigem Horst könnte eine positive Blumenstruktur darstellen. Sie entstehen an konvergenten Blattverschiebungszonen und bilden im Profilschnitt senkrecht zur Blattverschiebung komplexe bivergente Überschiebungsstrukturen aus, die an eine Blume erinnern (Eisbacher 1991). Eine mögliche Entstehungsgeschichte könnte vier tektonische Phasen umfassen (siehe Abb. 7 links):

In Phase I existierte ein Lineament entlang der heutigen 45°-Störung. Dieses könnte während der Öffnung des Penninischen Ozeans vor etwa 165 Mio Jahren (Schuster & Stüwe 2010) angelegt worden sein.

In Phase II erfolgte eine Transpression infolge der beginnenden Kollision zwischen der Afrikanischen und Europäischen Kontinentalplatten während der späten Kreide. Diese Transpression führte zur Ausbildung einer positiven Blumenstruktur entlang des präexistente Lineaments. In dieser Phase wurde die in Abb. 3 zu sehende, V-förmige Horststruktur angelegt und die 25°- und 70°-Störungen bildeten sich.

Mit fortschreitender Kollision der beiden Kontinentalplatten und den sich auftürmenden Alpen wurde die Europäische Platte zunehmend nach unten gedrückt und das tektonische Regime entwickelte sich in Phase III hin zu einem Abschiebungsregime. In der Folge bildeten sich die Westham-Störung und Kirchstockach-Störung aus. Entlang der 45°-Störung wurde der gesamte SE Block



abgeschoben. Entlang der übrigen Abschiebungen bildeten sich vertikal konjugierte, sich kreuzende Abschiebungen aus.

Mit fortschreitender alpidischer Orogenese kam es lokal zur Ausbildung einer dextralen Blattverschiebung (Phase IV). Diese führte dazu, dass sich die 70°-Störung in mehrere, durch *Relay Ramps* bzw. *step-overzones* verbundene, Abschiebungen aufteilte.

### 5.1.2. Hypothese B: horizontal konjugierte, sich kreuzende Abschiebungen

Der charakteristische V-förmige Horst aus Abb. 3 könnte auch mit horizontal konjugierten, sich kreuzenden Abschiebungen erklärt werden. Diese sind häufig in Sedimentbecken anzutreffen und bestehen aus Abschiebung, die in entgegengesetzten Richtungen einfallen (Ferrill et al. 2009). Stehen zwei solcher Abschiebungen in einem Winkel zueinander, können sie eine ähnliche V-förmige Horststruktur stehen lassen, wie wir sie in Unterhaching beobachten. Eine vier tektonische Phasen umfassende Entwicklungsgeschichte könnte folgendermaßen aussehen (siehe Abb. 7 rechts):

In Phase I herrschte ein Abschiebungsregime mit SH in Richtung 70° vor. In der Folge kam es zu Abschiebungen entlang der 70° streichenden Störungen (70°-Störung, Westham-Störung, Kirchstockach-Störung).

In Phase II kam es lokal zur Rotation der SH Richtung gegen den Uhrzeigersinn und die 45°-Störung bildete sich aus. Eventuell wurden die existierenden Störungen reaktiviert.

In Phase III bildete sich in einem Winkel zur 70°-Störung eine horizontal konjugierte Abschiebung aus, die die 70°-Störung kreuzte. In dieser Phase bildete sich der charakteristische V-förmige Graben aus Abb. 3 heraus. Am Ende der tektonischen Entwicklung wurde das Abschiebungsregime von einer leichten Blattverschiebungskomponente überlagert, welche zur Ausbildung der *step-overzones* an der 70°-Störung führten. Im weiteren Verlauf kam es zudem zur Bildung von vertikal konjugierten, sich kreuzenden Abschiebungen entlang der bestehenden Abschiebungen (gestrichelte Linien in Abb. 7).

### 5.2. Stellung der Störungen im Spannungsfeld und ihre Relevanz für die Geothermie

Aufgrund der mit ihnen verbundenen, erhöhten hydraulischen Durchlässigkeit stellen Störungszonen einen potentiell besonders hoffigen Bereich in der geothermischen Exploration dar. Die zusätzliche Analyse ihrer zeitlichen Entwicklung hat vor allem zwei Gründe: (I) Störungen, die zur Zeit der Verlandung im Jura aktiv waren, haben eine größere Wahrscheinlichkeit für Verkarstung und (II) Störungen, die über einen langen Zeitraum hinweg aktiv waren, weisen eine geringe Wahrscheinlichkeit auf, verheilt zu sein.

Während der Unter-Kreide zog sich das Meer zurück und das Gebiet des heutigen Molassebeckens verlandete. Durch das zu dieser Zeit herrschende, tropische Klima kam es zu intensiver Verkarstung während der Verlandungsphase (Bachmann et al. 1987). Entlang bestehender Störungen konnte die Verkarstung deutlich effektiver ansetzen als in ungestörten Bereichen. Diese Bereiche erhöhter, primärer Verkarstung sollten auch eine höhere Wahrscheinlichkeit sekundärer Verkarstung aufweisen. Bereiche um diese Störungen sollten somit eine insgesamt höhere Durchlässigkeit aufweisen und das Fündigkeitsrisiko an diesen Stellen reduziert sein.

Durch zunehmende Kompaktion und Mineralausfällung im Klufbereich ist es möglich, dass die Durchlässigkeit einer Störungszone im Laufe der Zeit wieder abnimmt, man spricht davon, dass die Störung „verheilt“. Ist die Störungszone über einen längeren Zeitraum aktiv bzw. wird sie zu einer späteren Zeit reaktiviert, kann dieser Heilungsprozess unterbrochen werden und bereits verheilte

Bereiche können abermals aufbrechen und die hydraulische Durchlässigkeit kann dadurch wieder erhöht werden. Entsprechend ist das Fündigkeitsrisiko an solchen Störungen reduziert. Im Beispiel Unterhaching erfüllt die 70°-Störung beide Kriterien. Sie war sehr wahrscheinlich bereits im Jura aktiv und wurde bis ins Unter-Oligozän mehrfach reaktiviert. Es ist somit zu erwarten, dass es in ihrem Umfeld zu erhöhter Verkarstung gekommen ist, was auf eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit schließen lässt.

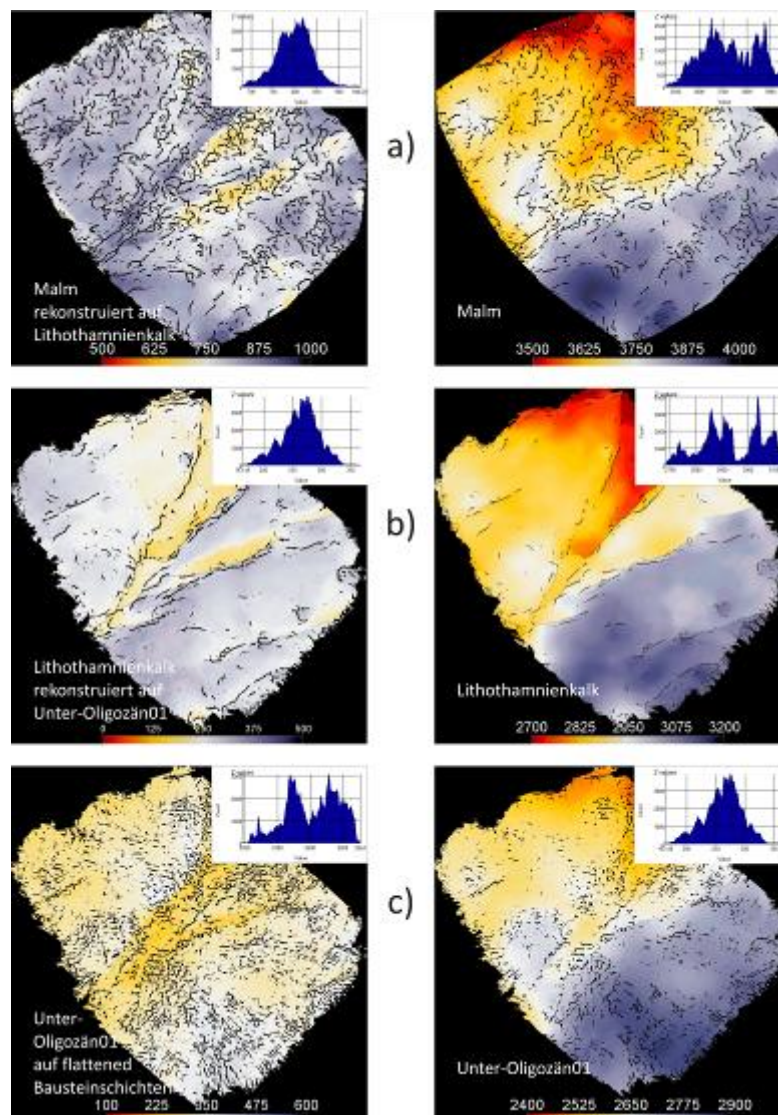


Abb. 6: Flattenedhorizons links und originale Horizonte rechts. Farbskala der Z-Werte von flach (rot) bis tief (blau). Histogramme für Z-Werte in linker, oberer Ecke jeder Abbildung.

Neben der Analyse der kinematischen Entwicklung in der Vergangenheit, ist auch eine Betrachtung des Störungsinventars hinsichtlich des rezenten Spannungsfelds wichtig. Störungen, die in einem Winkel von 30-45° zur maximalen Hauptspannung orientiert sind, haben eine größere Wahrscheinlichkeit, reaktiviert zu werden und weisen meist ein höhere Durchlässigkeit durch Scherklüfte auf, da das Verhältnis von Scher- zu Normalspannung auf ihren Störungsflächen erhöht ist. Eine Analyse des Spannungszustandes ist heute eine etablierte Methode in der geothermischen Exploration (z.B. Moeck et al. 2009).

Das rezente Stressfeld im UG weist eine Vorzugsrichtung der maximalen Horizontalspannung SH um N-S auf (Reinecker et al. 2010). Deshalb sollte die 25°-Störung, und insbesondere deren nördlicher Teil, eine erhöhte Wahrscheinlichkeit aufweisen, reaktivierbar zu sein und eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit zu haben.

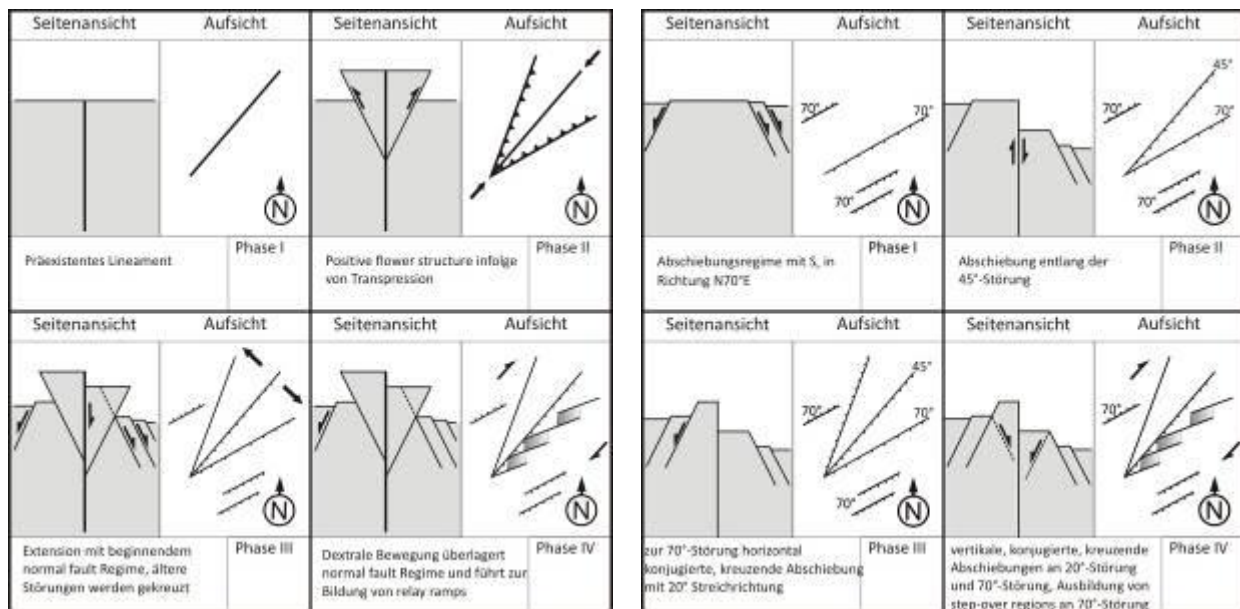


Abb.7: Zwei mögliche kinematische Entwicklungsmodelle für Unterhaching – (links) positive Blumenstruktur oder (rechts) konjugierte sich kreuzende Abschiebungen

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Die strukturelle Entwicklung des Malm in Unterhaching wurde anhand 3D-seismischer Daten untersucht und zwei unterschiedliche kinematische Modelle vorgestellt, die die zu beobachtenden Strukturen erklären können. Ein Modell geht von einer positiven Blumenstruktur aus, das andere von konjugierten, sich kreuzenden Abschiebungen.

Um die Qualität beider Modelle bewerten zu können, wurden zwei Methoden angewandt, die Einblicke in die zeitliche Entwicklung von Störungssystemen ermöglichen: die strukturelle Rekonstruktion durch *horizon flattening* und die Störungsversatzanalyse.

Im Ergebnis scheinen die verschiedenen Störungen zu unterschiedlichen Zeiten aktiv gewesen zu sein. Tektonische Aktivität setzte zunächst während des Jura an den Störungen mit 70° Streichrichtung ein und ging im zeitlichen Verlauf über zu den Störungen mit 45° Streichrichtung (Kreide) und später 25° Streichrichtung (frühes Tertiär). Diese Beobachtung ist ein Indiz für das Modell der konjugierten Abschiebung und spricht gegen das Modell der positiven Blumenstruktur, da in diesem Fall alle beteiligten Störungen zeitgleich aktiv gewesen sein müssten. Im Falle von sich kreuzenden, konjugierten Abschiebungen sollte sich im SW des UG ein V-förmiger Graben finden lassen. Aufgrund der mangelhaften Verfügbarkeit seismischer Messungen in diesem Gebiet bleibt diese Vermutung bis jetzt jedoch reine Spekulation. Zukünftige seismische Messungen im SW von Unterhaching könnten dahingehend neue Erkenntnisse liefern und das kinematische Entwicklungsmodell verbessern.

Strukturelle Rekonstruktion und Störungsversatzanalyse erwiesen sich als hilfreiche Methoden, die zeitliche Entwicklung eines komplexen Störungssystems zu rekonstruieren. Da sich Kenntnisse über den zeitlichen Verlauf der Störungsaktivität für die Höffigkeitsprognose nutzen lassen (z.B. aufgrund von Paläoverkarstung, das Verteilungspotential von Störungen etc.), ist die Anwendung

dieser Methoden von praktischer Bedeutung bei der Interpretation seismischer Daten für die geothermische Exploration.

### **Danksagung**

Diese Arbeit entstand im Rahmen des FuE-Verbundvorhabens „Malmfazies“, welches durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert wird (FKZ: 0325673A). Die Interpretation der 3D-seismischen Daten erfolgte mit Hilfe der Open Source Software *OpenTect* der Firma dGB Earth Sciences, Enschede.

### **Quellenangaben**

- BACHMAN, G.H., MÜLLER, M., WEGGEN, K.: Evolution of the Molasse Basin (Germany, Switzerland), *Tectonophysics*, 137, (1987), 77-92.
- BLAND, S., GRIFFITHS, P., HODGE, D., RAVAGLIA, A.: Restoring the Seismic Image, *Geohorizons*, (2006)
- EISBACHER, G.H.: Einführung in die Tektonik, *Ferdinand Enke Verlag Stuttgart*, Stuttgart, (1991).
- FERRILL, D.A., MORRIS, A.P., MC GINNIS, R.N.: Crossing conjugate normal faults in field exposures and seismic data, *AAPG Bulletin*, 93(11), (2009), 1471-1488.
- FREUDENBERGER, W., SCHWERD, K.: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000.- 4. Aufl., *Bayerisches Geologisches Landesamt*, München, (1996), 329 S.
- JAMALUDIN, S.N.F., LATIFF, A.H.A., GOSH, D.P.: Structural Balancing vs Horizon Flattening on Seismic Data: Example from Extensional Tectonic Setting, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 23, (2015), 1-6.
- LÜSCHEN, E., DUSSEL, M., THOMAS, R., SCHULZ, R.: 3D seismic survey for geothermal exploration at Unterhaching, Munich, Germany, *first break*, 29, (2011), 45-54.
- LÜSCHEN, E., WOLFGRAMM, M., FRITZER, T., DUSSEL, M., THOMAS, R., SCHULZ, R.: 3D seismic survey explores geothermal targets for reservoir characterization at Unterhaching, Munich, Germany, *Geothermics*, 50, (2014), 167-179.
- MOECK, I., KWIATEK, G., ZIMMERMANN, G.: Slip tendency analysis, fault reactivation potential and induced seismicity in a deep geothermal reservoir, *Journal of Structural Geology*, 31, (2009), 1174-1182.
- MOECK, I., MRAZ, E., LOSKE, B., JENTSCH, A., UHLIG, S., HILD, S.: Analysis of multiphase fossil normal faults for geothermal exploration in the Bavarian Molasse Basin, (2015), in press
- REINECKER, J., TINGAY, M., MÜLLER, B., HEIDBACH, O.: Present-day stress orientation in the Molasse Basin, *Tectonophysics*, 482, (2010), 129-138.
- SCHULZ, R. & THOMAS, R. (HRSG.): Geothermische Charakterisierung von karstig-klüftigen Aquiferen im Großraum München – *Endbericht. LIAG-Bericht* (2012), Archiv-Nr. 130 392, 98S, Hannover.
- SCHUSTER, R. & STÜWE, K.: Die Geologie der Alpen im Zeitraffer, *Mitteilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*, 140, (2010), 5-21.
- TVEDT, A.B.M., ROTEVATN, A., JACKSON, C.A.-L., FOSSEN, H.: Growth of normal faults in multilayer sequences: A 3D seismic case study from the Egersund Basin, Norwegian North Sea, *Journal of Structural Geology*, 55, (2013), 1-20.
- WOLFGRAMM, M., BARTELS, J., HOFFMANN, F., KITTL, G., LENZ, G., SEIBT, P., SCHULZ, R., THOMAS, R., UNGER, H.J.: Unterhaching geothermal well doublet: structural and hydrodynamic reservoir characteristic; Bavaria (Germany), *Proceedings European Geothermal Congress 2007*, (2007).

Geothermie Neubrandenburg GmbH, Seestraße 7 A, 17033 Neubrandenburg  
Ingmar.Budach@gtn-online.de