

**Leibniz-Institut für
Angewandte Geophysik
Hannover**

**Einsatz von 3D-Seismik zur Reduzierung des
Fündigkeitsrisikos bei Geothermieprojekten**

– Endbericht –

Projektleiter:	Dr. Rüdiger Schulz, Dir. u. Prof. Dr. Hermann Bunes, Wiss. Ang.
Auftraggeber:	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Projektträger Jülich (PTJ-EEN)
Förderkennzeichen:	0327630
Laufzeit des Vorhabens:	01.11.2006 – 30.06.2011
Berichtsdatum:	22.12.2011
Archivnummer:	0130496

Autoren

Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG):

BEILECKE, T. (Kap. 2.2, 3, 4)

BUNESS, H. (Herausgeber, Kap. 1, 2, 4)

VON HARTMANN, H.. (Kap. 2.1, 4)

MUSMANN, P. (Kap. 2.3.2)

SCHULZ, R. (Herausgeber, Kap. 1)

HarbourDom

BAUER, S.

DONATH, A.

RÜTER, H.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
1 Projektbeschreibung.....	5
2 Bearbeitung und Interpretation von seismischen Datensätzen und deren Bewertung	6
2.1 <i>Süddeutsches Molassebecken</i>	6
2.1.1 Datenakquisition, Bearbeitung und Interpretation	6
2.1.2 Bewertung.....	8
2.2 <i>Nordwestdeutschland</i>	9
2.2.1 Datenakquisition, Bearbeitung und Interpretation	9
2.2.2 Bewertung.....	10
2.3 <i>Oberrhingraben</i>	11
2.3.1 Datenakquisition, Bearbeitung und Interpretation	11
2.3.2 2D-Messungen im Oberrhingraben.....	13
2.3.3 Bewertung.....	14
3 Entwicklung einer VSP-Sonde.....	15
4 Dissemination.....	16
5 Publikationen und Vorträge	17
5.1 Zeitschriften.....	17
5.2 Vorträge und Poster	17
5.2.1 Vortragsveröffentlichungen (Proceedings).....	17
5.2.2 Poster	19
5.2.3 Vorträge.....	20
5.3 Berichte	21

Zusammenfassung

Die hydrothermale Geothermie besitzt ein großes Potenzial für die Energieversorgung in Deutschland. Ein wesentliches Hemmnis, das der kommerziellen Nutzung entgegensteht, ist das Fündigkeitsrisiko. Die notwendigen Tiefbohrungen für eine geothermische Anlage erfordern eine finanzielle Investition von mehreren Mio. €, ohne dass die für die Energieversorgung erforderlichen Schüttungsraten und Temperaturen hundertprozentig garantiert werden können. Eine Risikominderung kann durch den Einsatz seismischer Verfahren erreicht werden, die von der Kohlenwasserstoff (KW)-Industrie entwickelt wurden.

Im Vorhaben „Einsatz von 3D-Seismik zur Reduzierung des Fündigkeitsrisikos bei Geothermieprojekten“ wurden drei 3D-Datensätze im Norddeutschen Becken, im Oberrheingraben sowie im Süddeutschen Molassebecken analysiert. In die Bewertung wurden auch seismische 2D-Profile sowie Informationen aus Bohrungen einbezogen.

Alle Datensätze wurden neu prozessiert und unter Berücksichtigung der Fragestellung interpretiert. Spezielle Auswertetechniken wurden selbst durchgeführt, wie z.B. seismische Attributanalysen, teilweise auch an externe Firmen vergeben, wie eine CRS (Common Reflection Surface) -Bearbeitung und eine spektrale Dekomposition. Zur Simulation einer kostensparenden Erfassung einer 3D-Seismik wurden Datensätze mit verminderter Datendichte erzeugt, neu bearbeitet und interpretiert.

Die 3D-Datensätze ermöglichten eine flächenhafte Analyse mit unterschiedlichen seismischen Attributen. Hierdurch war es möglich, geologische Bedingungen für eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit im Bereich der Aquifere abzuleiten. Zu diesen geologischen Bedingungen zählen das Störungsmuster einschließlich kleinerer Störungselemente, Unterschiede in der Sedimentation (Fazies), die durch verschiedene Ablagerungsräume bedingt sind und Karstformationen.

Die Störungssysteme sind in allen Untersuchungsgebieten räumlich stark heterogen und zeigen eine mehrphasige tektonische Entwicklung. Diese Heterogenität und die zugrundeliegende geologische Entwicklung wurden durch die bisher vorhandenen Informationen nicht erfasst; sie können nur mit 3D seismischen Messungen abgebildet werden.

Infolge der hohen Ansprüche an die Voraussage der geologischen Bedingungen an einer Bohrlokation und der nicht ausreichend geklärten geologischen Entwicklungen in Bezug auf die Porosität und Permeabilität in den Untersuchungsgebieten, sind 3D seismischen Untersuchungen der Vorzug gegenüber 2D-Messungen zu geben.

Die spektrale Dekomposition hat sich als hilfreich zur Faziesanalyse im Bereich geringmächtiger geschichteter Sedimente erwiesen. Dies trifft vor allem auf die Analyse des Oberen Jura im Süddeutschen Molassebecken zu, in der trotz der hohen Heterogenität eine fazielle Zonierung ermöglicht wurde. Die Zonierung bildet die Grundlage für die Unterscheidung von Gebieten mit erhöhter hydraulischer Durchlässigkeit.

Die CRS-Bearbeitung ergab durchweg eine Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses im Bereich der Zielhorizonte. Besonders stark ist die Verbesserung in Gebieten, die einen geringen seismischen Überdeckungsgrad aufweisen. Während im Datensatz „Oberrheingraben“ die Sichtbarkeit von Strukturen, deren Dimensionen an der Grenze der seismischen Auflösung liegen, im gesamten Datensatz verbessert wurde, trifft dies im Datensatz „Süddeutsche Molasse“ für die Schichten oberhalb des Zielhorizontes zu, während es im Zielhorizont zwar zu einer Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses kommt, aber teilweise Abbildungsdetails nicht mehr sichtbar sind. Eine CRS-Bearbeitung sollte daher immer als Ergänzung zu einer konventionellen Bearbeitung angesehen werden. Die CRS-Bearbeitung ermöglichte in allen Fällen eine zuverlässigere Bestimmung der Stapelgeschwindigkeiten.

Die Parameter der Datenakquisition sollten gegenüber dem in der KW-Industrie geltenden Standard nicht wesentlich zur Kostenreduktion eingeschränkt werden. Mit der Reduktion der Datendichte gehen Details im seismischen Abbild verloren, die gerade für eine geothermische Nutzung von Bedeutung sein können. Ob diese Details für die Beschreibung eines Reservoirs wesentlich sind, ist im Vorfeld einer Exploration kaum zu entscheiden, zumal eine möglichst detaillierte Kenntnis des Reservoirs neben der Festlegung der Bohrpfade auch für die Betriebsphase hilfreich ist. Eine Reduzierung der Datendichte mit anschließender CRS-Bearbeitung, wie sie in den vergangenen Jahren vorgeschlagen wurde, erscheint nicht sinnvoll, da gerade die für die Geothermie wichtigen Störungen mit relativ kleinen Versatzbeträgen nicht mehr abgebildet werden.

Der Einsatz von hochauflösender 2D-Seismik zur Erkundung des oberflächennahen Störungsmusters stellt einen effizienten Weg dar, die kinematische Entwicklung von Störungssystemen zu erkennen und 3D-Messungen zu ergänzen. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, noch aktive Störungen mit einer möglicherweise erhöhten hydraulischen Durchlässigkeit zu erkunden. Bei der Korrelation des Alters der Aktivität mit der Durchlässigkeit einer Störung und bei der seismischen Erkundung mit Scherwellen besteht weiterhin Forschungsbedarf.

Für VSP (Vertical Seismic Profile) -Messungen in tiefen geothermischen Bohrungen wurde eine 3-Komponentensonde entwickelt, die den hohen Temperaturen und Drücken in solchen Bohrungen angepasst ist. In einer Geothermiebohrung in Norddeutschland wurde die Sonde getestet und ein VSP-Profil registriert. Die Sonde steht für zukünftige VSP-Messungen in tiefen Geothermiebohrungen zur Verfügung.

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes werden in einem Handbuch zusammengefasst. Das Buch soll einen Leitfaden für die seismische Exploration von geothermischen Reservoirs liefern. Damit wird öffentlichen Geldgebern und privaten Investoren ein Instrument in die Hand gegeben, die Vorerkundung qualitativ zu bewerten und Grundlagen für das Fündigkeitsrisiko besser einzuschätzen.

1 Projektbeschreibung

Die hydrothermale Geothermie besitzt ein großes Potenzial für die Energieversorgung in Deutschland. Ein wesentliches Hemmnis, das der kommerziellen Nutzung entgegensteht, ist das Fündigkeitsrisiko. Die notwendigen Tiefbohrungen für eine geothermische Anlage erfordern eine finanzielle Investition von mehreren Mio. €, ohne dass die für die Energieversorgung erforderlichen Schüttungsraten und Temperaturen hundertprozentig garantiert werden können.

Eine Risikominderung kann durch den Einsatz seismischer Verfahren erreicht werden, die von der Kohlenwasserstoff (KW)-Industrie entwickelt wurden. Dort ist der Einsatz moderner Verfahren, wie beispielsweise die dreidimensionale (3D) Seismik und Analyse seismischer Attribute, mittlerweile zum Standard geworden. Es wurde in diesem Projekt untersucht, ob und wie die entsprechenden Techniken der Datenakquisition, des Processings und der Interpretation übernommen und angepasst werden können. Das Vorhaben „Einsatz von 3D-Seismik zur Reduzierung des Fündigkeitsrisikos bei Geothermieprojekten“ wurde durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Zeitraum vom 01.03.2007 bis zum 30.06.2011 unter dem Förderkennzeichen 0327630 gefördert.

Entsprechend der geologischen Heterogenität der hydrogeothermischen Reservoirs in Deutschland wurden die Untersuchungen an drei unterschiedlichen Standorten durchgeführt (Kap. 2):

- (a) „Süddeutsches Molassebecken“ (SE München),
- (b) „Norddeutsches Becken“ (N Celle),
- (c) „Oberrheingraben“ (W Offenburg).

Für die oberflächennahe Untersuchung von Störungszonen mittels hoch auflösender Reflexionsseismik wurden im Untersuchungsgebiet „Oberrheingraben“ zwei hoch auflösende Datensätze vom LIAG neu gewonnen; es wurden 2 Profile mit 1,6 bzw. 3,0 km sowohl mit P-Wellen als auch mit S-Wellen vermessen. Ein weiterer Test dieser Methodik fand in einem zweiten Gebiet E von Neustadt a.d.Weinstraße statt. Ein weiteres 3,0 km langes hoch auflösendes Profil wurde dort registriert, sowie ein 3D-Datensatz von der Firma GeoEnergy GmbH übernommen.

Die Bearbeitung und Interpretation aller 3D-Datensätze sowie der 2D-Seismik wurde am LIAG vorgenommen. Für spezielle Aufgaben, deren Technik sich noch nicht in der allgemein verwendeten Methodik niedergeschlagen hat, sind externe Aufträge vergeben worden: ein CRS(Common Reflection Surface) -Processing an die Firma TEEC und eine spektrale Dekomposition an KJT Enterprises Inc.. Für die Mithilfe bei der Erstellung einer Handlungsanweisung wurde ein Auftrag an eine geowissenschaftliche Beratungsfirma (HarbourDom) erteilt.

Zur Bewertung des Einsparpotenzials wurde die Datendichte jedes 3D-Datensatzes reduziert. In den Datensätzen „Süddeutsche Molasse“ und „Norddeutsches Becken“ wurde dies durch Eliminierung jedes zweiten Schusspunktes realisiert, im Datensatz „Oberrheingraben“ durch Eliminierung jeden zweiten Schuss- und Geophonpunktes. Die solchermaßen reduzierten Datensätze wurden nach Bestimmung der Stapelgeschwindigkeiten und der Reststatik, einer erneuten externen CRS-Bearbeitung unterzogen.

Die Entwicklung und der Bau einer Geophonsonde für Geothermiebohrungen, die eine hohe Temperaturbeständigkeit aufweisen muss, wurden europaweit ausgeschrieben; den Zuschlag bekam die Firma Antares, bei der die Geophonsonde gebaut wurde (Kap.3).

Der ursprünglich beantragte Projektzeitraum war der 01.11.2006 - 30.10.2009. Das Projekt wurde zweimal kostenneutral verlängert, zunächst um ein Jahr bis zum 30.10.2010, danach bis zum 30.06.2011. Die Gründe dafür waren ein spät eingegangener Zuwendungsbescheid, Schwierigkeiten bei der Personalgewinnung (erst am 15.08.07 waren alle Stellen besetzt, am 01.09.09 verließ eine Mitarbeiterin das Projekt), die länger als geplant dauernde Freigabe, Übermittlung und Beschaffung von seismischen Daten durch Industriefirmen, sowie technische Schwierigkeiten der Geophonsonde, die wiederholte Testmessungen in einer tiefen Geothermie-Bohrung erforderten.

2 Bearbeitung und Interpretation von seismischen Datensätzen und deren Bewertung

2.1 Süddeutsches Molassebecken

2.1.1 Datenakquisition, Bearbeitung und Interpretation

Von der ExxonMobil Production GmbH (EMPG) und der Wintershall GmbH wurde der Datensatz „Süddeutsches Molassebecken“ mit einer Grundfläche von ca. 8x18 km² aus dem Jahre 1984 zur Verfügung gestellt. Da sich die Bereitstellung der ungestapelten Daten verzögerte, wurde zunächst auf einen beim Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover, vorhandenen gestapelten und migrierten Datensatz zurückgegriffen. Die Positionen der Rohdaten, bestehend aus ca. 6.000 Schusspunkten und 17.000 Empfängerpositionen, mussten mangels digitaler Schuss-Empfänger-Zuordnungen per Hand aus den Feldprotokollen eingegeben werden. Eine Qualitätskontrolle deckte Unstimmigkeiten mit den vorliegenden Daten sowie Fehler in den Protokollen auf. Weiterhin wurden sechs 2D-Linien der EMPG der Datenbasis hinzugefügt. Drei im Untersuchungsgebiet liegende Bohrungen wurden zur Interpretation mit einbezogen und deren Logs teilweise digitalisiert.

Die Anwendung einer reststatischen Korrektur führte zu einer wesentlichen Verbesserung der Stapelergebnisse des 3D-Datensatzes. Die unzureichende Laufzeitkorrektur durch die Refraktionsstatik hat zwei Gründe: die ungleichmäßige Überdeckung des Untergrundes durch schwer zu erfassende glaziale Lockergesteine und die ungenügende Dokumentation der Statikwerte.

Die Horizonte im Zielbereich (Top Malm und Dogger) sowie zwei Horizonte im Hangenden (Top Untere und Obere Meeresmolasse) wurden für den gesamten Datensatz flächenhaft interpretiert.

Der Top der Karbonatplattform (Oberer Jura, Malm) wird durch zwei dünne Schichten markiert, die über die gesamte Fläche deutlich verfolgbar sind. Dies sind zum einen der Sannois oder Fischeschiefer, ein mariner Ton-Horizont, und zum anderen der Purbeck, der in dieser Region evaporitisch ausgebildet ist und eine Hochgeschwindigkeitsschicht darstellt. Beide Horizonte konservieren die Morphologie der früheren karbonatischen Plattformoberfläche. Innerhalb der Plattform ist die Reflektivität sehr heterogen. Die Basis der Plattform wird durch ein Reflexionsband markiert, die als mittel- und unterjurassische Sand- und Tonschichten angesprochen werden.

Die stratigraphische Gliederung der Seismik wurde durch das Einhängen dreier Bohrungen durchgeführt. Dabei durchteuft nur eine Bohrung die oberjurassische Plattform bis in das Kristallin. Diese Bohrung wurde für weitere Untersuchungen verwendet. Durch die Korrektur der Sonic-Messung mit den Geschwindigkeiten der Geophonversenkungsmessung konnte eine gute Übereinstimmung der seismischen Daten und der synthetischen Spuren erzielt werden. Hierbei wurde das Quellsignal als 25 Hz nullphasiges Signal am Top der Karbonatplattform abgeschätzt. Dieses Quellsignal diente für die Untersuchungen mit Hilfe der spektralen Zerlegung als Grundlage für die Berechnung synthetischer Seismogramme.

Die Störungsinterpretation ergab ein sehr komplexes und mehrphasiges Deformationsgeschehen. Für die Interpretation ließen sich keine entsprechenden Vergleiche für die bayerische Molasse in der Literatur finden. Der Grund hierfür ist die wesentliche Verbesserung der Interpretationsmöglichkeiten durch die 3D- gegenüber der 2D-Seismik. Die Deformationen lassen sich in vier Phasen gliedern. Die erste Phase umfasste Abschiebungen in südlicher Richtung und beschränkte sich auf die Zeit der unteren Meeresmolasse. Während der zweiten Phase führte eine Seitenverschiebung zur Ausbildung lokaler Horste. Das Messgebiet deckt hierbei nur einen Teil eines Störungssystems ab, in deren Knick sich ein kleines Becken entwickelt. Die Horststrukturen werden entlang der Störungslinie durch Gräben abgegrenzt. In der dritten Phase, die bis in die obere Süßwassermolasse reicht, kommt es wieder zu Abschiebungen. Diese Abschiebungen konzentrieren sich auf einzelne Störungsflächen. Infolge der Vorprägung durch die zweite Phase wechseln die Störungsflächen lateral ihre Einfallrichtung, d.h. es entstanden Störungsflächen, die auch in nördliche Richtung einfallen. Als jüngste Elemente sind NNW streichende Elemente zu beobachten, die quer zu den bisherigen Störungselementen streichen und diese schneiden. Die Deformationen der letzten Phase zeigen sich in den Sektionen nicht durch Auf- oder Abschiebungen, sondern durch fast senkrecht verfolgbare Phasenänderungen. Die Ursache dieser Transversalstörungen ist der auf das Vorlandbecken wirkende Druck des alpinen Orogens.

Nach der Sekundärliteratur besteht eine deutliche vertikale Zweiteilung der Karbonatplattform. Dies drückt sich durch eine unterschiedliche Riffauna aus, die die unterschiedlichen Lebensbedingungen in dem Schelfmeer widerspiegelt. Unterschiedliche Sedimentationsbedingungen treten hinzu. Diese Zweiteilung lässt sich auch in den seismischen Profilen wiederfinden. Für die Interpretation der seismischen Sektionen wurden Bohrberichte hinzugezogen.

Innerhalb des oberen Teils, der nur ca. ein Fünftel der Plattformmächtigkeit ausmacht, finden sich Korallenriffe, die umgeben werden von Ansammlungen von Karbonatschutt und Trögen. Abgeleitet wurde diese Anordnung aus den Mächtigkeiten des Purbecks und einer Niedriggeschwindigkeitszone innerhalb des

Oberen Jura. Die Korallenriffverteilung entspricht damit der Topographie am Jura-Kreide-Übergang. Diese Verteilung lässt sich ebenso in unterschiedlichen seismischen Attributen wiedererkennen. In dem darunterliegenden Bereich wurden durch spektrale Zerlegung kreisförmige Strukturen herausgearbeitet, die in wenig reflektive Bereiche eingebettet sind. Diese werden als Schwammriffbereiche interpretiert. Die Ablagerungsumgebung wird durch Karbonatsande dominiert. Die Entwicklung der Schwammriffauna variiert zeitlich und räumlich, so dass in einem mittleren zeitlichen Abschnitt nur sehr wenige dieser Schwammriffansammlungen zu finden sind. Räumlich konzentrieren sie sich in der nördlichen Hälfte des Messgebietes. Hieraus lässt sich eine westöstlich verlaufende Küstenlinie für die Region ableiten.

Die Topographie der Karbonatplattform spiegelt die Störungsentwicklung, die Riffverteilung und auch eine Karstlandschaft wider. Die auffälligsten Erscheinungen sind kreisförmige Vertiefungen. Diese werden als Dolinen, d.h. Einbruchstrukturen, interpretiert. Unterhalb dieser Strukturen finden sich höher reflektive Bereiche, die auf eine Niedriggeschwindigkeitszone hinweisen. Diese weisen auf Brekzien in den eingebrochenen Hohlräumen hin. Gefestigt wird die These durch die Beschränkung der Anomalien auf Bereiche unterhalb der Einbruchtrichter. Die räumliche Verteilung der Dolinen in Bezug auf die Riffe und die Störungen zeigen deutliche Korrelationen. So finden sich die meisten größeren Strukturen entlang von Riffändern sowie senkrecht zu oder entlang von Störungen.

2.1.2 Bewertung

Für die Süddeutsche Molasse zeigt sich, dass die 3D-Seismik alle relevanten geologischen Aspekte für eine Reservoirerkundung darstellen kann: Karstphänomene, Faziesverteilung und Störungssysteme. Alle drei Bereiche sind mit 2D-seismischen Messungen nur bedingt darstellbar und interpretierbar. Die tektonische Entwicklung wechselt lateral entlang der Störungen sehr kurzräumig. Am eindrucksvollsten stellt sich dies an dem Wechsel der Einfallsrichtung innerhalb eines Störungsbereiches sowie am lateralen Wechsel von Horst- und Grabenstrukturen entlang der Störungen dar. Die räumliche Analyse der Störungen ergibt eine verbesserte Abschätzung der Wasserwegsamkeit innerhalb eines Störungssystems.

Die lokale Verbreitung von Riffbereichen lässt sich ebenfalls nur durch eine flächenhafte Darstellung der Daten erkennen. Im 2D-Schnitt ist es allenfalls möglich, lokale Riffstrukturen anzusprechen, die besonders deutlich auffallen. Einbruchstrukturen, die auf eine Verkarstung hinweisen, können nur in der horizontalen Fläche als kreisförmige Objekte erkannt und damit eindeutig identifiziert werden.

Neben der besseren Ansprache geologischer Objekte, die die 3D-Seismik bietet, ermöglicht sie auch einen räumlichen Bezug der einzelnen Objekte untereinander. Die Zuordnung von Karststrukturen zu Riffbereichen und Störungen gibt deutliche Hinweise zumindest auf frühere verbesserte Wasserwegsamkeiten.

Die Reflektivität innerhalb der Karbonatplattform wurde mithilfe der spektralen Zerlegung untersucht. Diese Methode ist in der Lage, Reflexionen an dünnen Schichten deutlicher hervortreten zu lassen. Die räumlichen Muster, die sich hieraus ergeben, stellen kleinräumige, fein verteilte kreisförmige Strukturen dar, die im Wesentlichen als Schwammriffbereiche interpretiert werden. Die Methode erwies sich als zweck-

mäßig, die Heterogenität der Karbonatplattform zu strukturieren und eine geologische Interpretation zu ermöglichen.

Die CRS-Methode verbesserte die Kontinuität der Reflexionen vor allem in den Bereichen mit schlechter Datenqualität deutlich. In Verbindung mit der Varianzanalyse konnten feine Störungen sichtbar gemacht werden, da das Signal/Rausch-Verhältnis der Daten stark verbessert wurde. Die CRS-Methode bietet sich trotzdem nur als Ergänzung an, da der Effekt der Interpolation von Strukturen jeweils im Einzelnen bewertet werden muss.

Die Wirkung einer Interpolation zeigt sich besonders im ausgedünnten Datensatz. Obwohl auch hier feine Strukturen erhalten bleiben, wenn das Reflexionsangebot im entsprechenden Zeitabschnitt gut ist, kommt es lokal zu einer starken Glättung des Reliefs der Karbonatplattform. Ein weiteres Ergebnis dieses Teils der Untersuchung ist, dass mit der Überdeckung von 12 und einer Bin- (Raster)Größe von 25 x 25 m² die untere Grenze für die Darstellung der räumlichen Komplexität erreicht, evtl. unterschritten wird. Eine verringerte Überdeckung kann zwar die Tiefenlage und die Lage der größeren Strukturen gut wiedergeben. Weitergehende Fragestellungen, die die geologischen Vorgänge betreffen, wie Karstentwicklung, Deformationsphasen und fazielle Ausprägung, lassen sich jedoch nicht mehr ausreichend analysieren.

2.2 Nordwestdeutschland

2.2.1 Datenakquisition, Bearbeitung und Interpretation

Von der Exxon Mobil Production Deutschland GmbH (EMPG) wurde ein Ausschnitt eines 3D-Datensatzes mit einer Größe von ca. 9 x 7 km² zur Verfügung gestellt. Die Schuss- und Geophonpositionen der Rohdaten betrafen zum Teil auch benachbarte Konzessionen. Die dadurch notwendigen Absprachen der Konzessionsinhaber hatte eine zeitliche Verzögerung der Übergabe der Daten zur Folge. Daher wurde zunächst ein etwas kleinerer gestapelter Datensatz aus dem gleichen Messgebiet in das Interpretationssystem übernommen. Dieser Datensatz wurde im Verlauf der Arbeiten zum Vergleich mit eigenen Bearbeitungen herangezogen. Im Gebiet dieses Datensatzes liegt die Bohrung Horstberg Z1, die von der BGR zur geothermischen Forschungsbohrung ausgebaut wurde. Neben bereits digital vorliegenden Logs wurden das Sonic-log aus der Bohrung digitalisiert und in die Interpretation einbezogen. Weiterhin wurden, ebenfalls von EMPG, drei 2D-Profile beschafft.

Bei der Bearbeitung des 3D-Datensatzes zeigte sich, dass die Signaldekonvolution des 1995 mit Sprengseismik aufgenommenen Datensatzes einen sehr starken Einfluss auf die Resultate hat. Eine vorangegangene Q-Kompensation konnte das Ergebnis verbessern. Die große Bandbreite der in den Rohdaten aufgezeichneten Sprengstoffquellsignale ermöglichte es, ein gegenüber der ursprünglichen industriellen Bearbeitung breitbandigeres Endergebnis (Migration) der Daten zu erzielen. Damit konnte die Auflösung von Strukturen insbesondere im Zielbereich des Buntsandsteins, aber auch im Bereich der Störungszone erhöht werden.

Die im ganzen Datensatz sichtbaren Bruchstrukturen, insbesondere im Bereich der Inversionsstruktur, erschwerten die Bestimmung der Stapelgeschwindigkeiten und daraus abgeleiteten Intervallgeschwindigkeiten, weil sie das Signal/Rausch-

Verhältnis verschlechterten. Automatische Routinen zur Geschwindigkeitsbestimmung mit großer statistischer Signifikanz haben sich als gutes Hilfsmittel erwiesen, eine manuelle Nachbearbeitung war aber dennoch notwendig.

Eine Besonderheit dieses Datensatzes in der industriellen Bearbeitung aus dem Jahr 1995 war eine lateral begrenzte seismisch transparente Zone im Bereich oberhalb des Zechsteins. Die erste Vermutung eines ungenauen Geschwindigkeitsmodells der bestehenden Bearbeitung konnte nicht bestätigt werden. Vielmehr ist die Annahme wahrscheinlich, dass ein vorhandenes Störzonensystem die Reflexionen lokal abschwächt. Ursache sind tektonisch beanspruchte Strukturelemente, die zu klein sind, um konstruktiv interferierende Reflexionen zu liefern, die geologisch interpretierbar gewesen wären. Solche Störzonen wurden in der im Messgebiet liegenden Bohrung gefunden.

Nach der Übertragung der Daten in das Interpretationssystem wurden die Basen der Horizonte Tertiär, Ober- und Unterkreide, Jura, Muschelkalk und Buntsandstein flächenhaft kartiert. Mit Hilfe der Kenntnis der tektonischen Entwicklung kann der heutige Zustand besser verstanden werden. Zudem wurde im Bereich der Zielhorizonte eine auffällige Reflexion für die Aquiferanalyse kartiert. Es zeigen sich im Buntsandstein sehr flache Störzonenbahnen, die Auswirkungen auf den Buntsandstein als Aquifer haben. Die als transparente Zone im Datensatz erkennbare Störzone hat eine komplexe Struktur, die ‚flower-structure‘-Elemente aufweist und in Teilen des Datensatz kompressiv auftritt, in anderen aber extensiv. Exemplarisch wurde an zwei Schnitten die gesamte Komplexität der Störzonen erfasst, während im restlichen Datensatz nur die Hauptstörzonenelemente erfasst wurden, um verschiedene Skalen der Störzone miteinander verknüpfen zu können.

Die Bohrung Horstberg Z1 ermöglicht die Verknüpfung von detaillierten Bohrlochinformationen mit dem 3D-Datensatz. Allerdings lassen sich die aus dem Sonic-Log berechneten P-Wellenreflexionen nur schlecht mit den Reflexionen der Oberflächenseismik korrelieren. Das liegt an den durch das Störungssystem hervorgerufenen Konversionen und Interferenzen, die im Sonic-Log aufgrund der Messgeometrie keinen Niederschlag finden.

Die Anwendung der CRS-Methode ergab ein höheres Signal/Rausch-Verhältnis der Seismogramme als die Standardstapelung. Zudem ermöglichte sie, auch für den in seiner Datendichte reduzierten Datensatz, ein verlässliches, automatisch generiertes Geschwindigkeitsmodell zu erstellen. Es zeigte sich aber, dass bei der Reduzierung der Datendichte Details der Störzonen nicht mehr erkennbar waren.

2.2.2 Bewertung

Im Norddeutschen Becken können Schichten des Muschelkalks bzw. Buntsandsteins wegen ihrer Temperatur und Permeabilität als Aquifere geothermisch genutzt werden. Als Bewertungsgrundlagen werden u.a. die Nettomächtigkeiten und die Paläogeographie herangezogen, da die unterschiedlichen paläoökologischen Bedingungen ihren Niederschlag in unterschiedlichen Faziesausprägungen finden. Da die Hauptmasse des Buntsandsteins im Norddeutschen Becken aus südlicher Richtung geschüttet worden ist, werden Schüttungsstrukturen oder allgemein fluviatile Strukturelemente erwartet.

Zum Auffinden solcher Strukturen wird in seismischen Daten typischerweise flächenhaft nach Amplitudenanomalien gesucht. Eine solche Analyse des Muschelkalk und Buntsandsteins wird im Beispieldatensatz allerdings durch das komplizierte Störzonensystem und resultierende Signaldämpfung stark degradiert. Sowohl die Horizontamplitude als auch die robustere RMS (Root Mean Square)-Amplitude an einem Horizont sind ähnlich von der Degradation betroffen. Das gilt insbesondere für den Unteren Buntsandstein, wo aus geologischen Gründen das Signal/Rausch-Verhältnis relativ niedrig ist.

Die Interpretation des Störzonensystems wurde anhand von Hauptstrukturelementen durchgeführt. Der Zeitaufwand der Erfassung der einzelnen Elemente des Systems ist sehr groß, insbesondere wenn sich die Kategorisierung der Elemente im Laufe der Interpretation verändert. Hier hat sich die Signalvarianzanalyse als zeitsparendes und objektiveres Hilfsmittel erwiesen, um das Störzonensystem zu erfassen. Im Unteren Buntsandstein ist eine solche Analyse wegen des schlechteren Signal/Rausch-Verhältnisses nicht ganz so erfolgreich wie in den jüngeren Abschnitten. Dennoch bestätigt auch die Varianzanalyse die flach einfallenden Störzonenelemente, die im Buntsandstein interpretiert worden waren.

Die hohe Signalbandbreite der Neubearbeitung hat sich als wertvoll erwiesen, denn im Vergleich mit der ursprünglichen Bearbeitung konnten Störzonenelemente über eine größere räumliche Erstreckung verfolgt werden. Das lässt vermuten, dass viele schlecht identifizierbare Bereiche im Datensatz aufgrund tektonischer Beanspruchung schwächere Reflexionen im seismischen Abbild liefern als ungestörte Bereiche. Das ist insbesondere ein wichtiges Ergebnis für die geothermische Erkundung im gesamten Norddeutschen Becken. Dort, wo tektonische Beanspruchung geringmächtiger poröser Aquifere vermutet werden kann, und das ist in vielen Bereichen des Norddeutschen Beckens wegen der typischen Inversionsstrukturen oder wegen benachbarter Salzstöcke der Fall, können seismisch schlecht oder nicht erkennbare Störzonen Aquifere unterbrechen oder begrenzen, so dass sich das verfügbare Reservoirvolumen als kleiner herausstellt, als nach Interpretation der seismischen Daten erwartet. Es ist also bei der Datenaufnahme und bei der Datenbearbeitung im Norddeutschen Becken mit einer hohen Signalbandbreite zu arbeiten, um möglichst kleine Strukturen auflösen zu können.

Eine solche Breitbandigkeit hat aber natürliche Grenzen. Hier könnte sich deshalb zukünftig das derzeit in der Forschung befindliche Werkzeug der Retrodeformation bewähren. Eine notwendige Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Retrodeformation sind jedoch strukturelle Informationen aus der 3D-Seismik.

2.3 Oberrheingraben

2.3.1 Datenakquisition, Bearbeitung und Interpretation

Von der Hybridkraftwerk GmbH Neuried wurde ein Datensatz zur Verfügung gestellt, welcher zur Vorerkundung für ein geothermisches Kraftwerk 2006 registriert wurde. Dieser Datensatz mit ca. $4 \times 4,5 \text{ km}^2$ ist Teil eines größeren Datensatzes, der für die KW-Erkundung gemessen wurde. Die Eigentumsverhältnisse wirkten sich erschwe-

rend auf die Beschaffung der Daten aus, so dass trotz der Zusage seitens eines der Gesellschafter aus dem August 2006 die Daten erst Ende Juli 2007 übergeben werden konnten. Die Datenbasis wurde durch vier 2D-Linien der ExxonMobil Production Deutschland GmbH (EMPG) aus dem Jahre 1986 sowie zwei 2D-Linien der GDF SUEZ E&P DEUTSCHLAND GMBH (GDF-SUEZ) aus dem Jahre 2005 ergänzt. Ergänzend wurden Informationen aus einer nahegelegenen Tiefbohrung, die bis ins Kristallin abgeteuft wurde, für die Interpretation benutzt.

Eine Qualitätskontrolle der 3D-Daten und Aufbereitung zur weiteren Verarbeitung mithilfe statistischer Analysen aller Spuren hat sich als notwendig herausgestellt. Der Schwerpunkt beim Processing lag auf der 3D-abhängigen Geschwindigkeitsanalyse, der DMO (*Dip Moveout*) Bearbeitung sowie der Migration. Nach Prüfung verschiedener Poststack-Migrationen (Kirchhoff, Stolt, FD, Phase Shift, Phase Shift Plus Correction) wurde die FD-Zeitmigration als Referenzmigration gewählt. Die Anwendung einer Prestack-Migration lieferte trotz eines recht einfachen Geschwindigkeitsmodells eine partiell bessere Darstellung der Strukturen in der Zieltiefe.

Weiterhin wurden 14 seismische 2D-Profile aus den Jahren 1975-1986 gesichtet, von denen vier von der GDF-SUEZ beschafft werden konnten. Zusätzlich wurden zwei 2D-Profile aus dem Jahre 2005 von der Hybridkraftwerk GmbH Neuried bereitgestellt. Es wurden weiterhin 5 Bohrungen der KW-Industrie überprüft, einige Logs der nächstgelegenen Bohrung, die ca. 3 km südlich des mit 3D-Seismik überdeckten Gebietes liegt, wurden digitalisiert.

In allen seismischen Datensätzen wurden stratigraphische Einheiten vom Oligozän bis zum Kristallin interpretiert. Die Oberen Pechelbronner Schichten (Rupel) und der Top Lias bilden zwei im gesamten Messgebiet gut identifizierbare Leithorizonte. Die Zielhorizonte Muschelkalk und Buntsandstein unterhalb des Lias zeigen eine geringe Reflektivität. Das Basement ist in der 3D-Seismik – im Gegensatz zu den 2D-Profilen – z.T. deutlich erkennbar und von mehreren Störungen durchzogen. Die Störungen verlaufen meist sehr steilstehend; einzelne flach einfallende Elemente deuten jedoch darauf hin, dass neben Phasen der Extension auch solche mit kompressiven Komponenten aufgetreten sind. Die Störungen im Basement sind, mit der Ausnahme einer prominenten ENE-WSW Störung im Zentrum des Datensatzes, parallel zu den Grabenrändern (SSW-NNE) ausgerichtet. Die Basement-Störungen sind in den 2D-Linien nicht sichtbar.

Durch die Kombination verschiedener seismischer Attribute (TWT, Dip, Varianz, Amplitude) konnte eine verbesserte strukturelle Differenzierung stratigraphischer Einheiten erreicht werden. Als nützlich für die Erkennung von Störungszonen hat sich insbesondere die horizontgebundene, fensterorientierte Varianzamplitude herausgestellt. Es konnten eindeutige Störungszonen sowohl im Basement als auch im Lias festgestellt werden. Diese Einheiten begrenzen die Zielhorizonte des Buntsandsteins und des Muschelkalks, die selbst nur eine schwache Reflektivität aufweisen. Die Störungszonen konnten entweder gar nicht oder nur mit großen Unsicherheiten durch eine konventionelle Bestimmung in seismischen 2D-Linien festgelegt werden. Diese Ergebnisse wurden mit den Projekt-Geologen diskutiert und werden somit in die weitere Planung des Projekts einfließen.

Die CRS-Bearbeitung hat sich als vorteilhaft zunächst bei der Geschwindigkeitsbestimmung herausgestellt, da die CRS-Sortierungen bis zu einem Faktor von 15 bes-

ser überdeckt sind als die CMP-Sortierungen der Standard-Bearbeitung. Eine Verbesserung der seismischen Abbildung durch die CRS-Bearbeitung ist besonders deutlich an den Rändern des Datensatzes, was durch die geringe Überdeckung erklärbar ist. Die CRS-Bearbeitung hat auch eine höher auflösende Abbildung des Datensatzes ergeben. Hierzu wurden Tests mit einer unterschiedlichen lateralen Ausdehnung der Kohärenzberechnung (Apertur) durchgeführt. Während große Aperturen (> 100 m) dazu führen, dass sehr kleinräumige Strukturen nicht mehr dargestellt werden, konnte mit sehr kleinen Aperturen (ca. 50 m), die deutlich unterhalb der Größe der Fresnel-Zone bleiben, eine verbesserte Abbildung dieser Strukturen erreicht werden. Die in einer seismischen Sektion nur schwer zu erkennenden Unterschiede der verschiedenen Bearbeitungen konnten mithilfe seismischer Attribute besser visualisiert und damit gewertet werden.

Zur Simulation einer kostensparenden Erfassung einer 3D-Seismik wurde ein Datensatz mit einer um 75 % geringeren Datendichte erzeugt. Die Überdeckung sank von max. 90- zu max. 30-fach, da die Bin-Größe von 25 m, durch die die Untergrundabtastung vorgegeben wird, konstant gehalten wurde. Dieser Datensatz wurde sowohl konventionell (NMO/DMO) als auch mithilfe der CRS-Technik erneut bearbeitet, wobei das Geschwindigkeitsmodell als auch die Reststatik jeweils neu bestimmt wurden. Die Reduzierung der Messdichte ergab ein signifikant geringer auflösendes Abbild, welches durch die Anwendung der CRS-Methode zwar stark verbessert werden konnte, jedoch nicht mehr die Details des vollen Datensatzes aufzeigte. Während die großen Strukturen im ausgedünnten und mit der CRS-Technik bearbeiteten Datensatz noch gut sichtbar sind, ist dies bei einigen kleineren Strukturen nicht mehr der Fall. Eine ‚*sparse acquisition*‘ mit anschließender CRS-Bearbeitung, wie sie in den vergangenen Jahren vorgeschlagen wurde, und durch die Ausdünnung simuliert wurde, wäre für den Datensatz nicht sinnvoll gewesen, da gerade die für die Geothermie wichtigen Störungen mit relativ kleinen Versatzbeträgen nicht mehr abgebildet werden.

2.3.2 2D-Messungen im Oberrheingraben

Ergänzend zu 3D-Seismiken im Oberrheingraben wurden mehrere hochauflösende reflexionsseismische Profile in zwei Regionen der Oberrheingrabens selber durchgeführt und prozessiert (Musmann 2009a und b). Alle Profile wurden gezielt über Störungen gelegt, die in den vorhandenen 3D-Daten in den oberen 1000 m zu erkennen sind. Die Profile ergänzen den oberflächennahen Erkundungsbereich, der von der auf größere Tiefen ausgelegten 3D-Seismik nur unzureichend erfasst wurde.

Insgesamt wurden an drei verschiedenen Lokationen seismische Profile registriert. Die Erkundung fand sowohl mit Kompressions- (P-) als auch mit Scher- (S) Wellen-Quellen statt. Die Akquisitionsgeometrie war auf eine sehr dichte Abtastung der Untergrundpunkte ausgelegt; mit einem hydraulischen Vibrator wurden Frequenzen bis 360 Hz angeregt.

Das Processing orientierte sich am Standard für vibroseismische Daten, darunter eine NMO-Korrektur und eine Post-Stack-Migration. In Ergänzung stellte sich ein DMO-Processing als essentiell heraus, da es nicht nur eine iterative Verbesserung des Geschwindigkeitsfeldes ermöglicht, sondern auch Störungen deutlicher hervor hebt.

Mit den P-Wellen-Profilen wurde der oberflächennahen Störungsbereich in einem Tiefenbereich von 20 m bis maximal 1000 m Tiefe erfasst. Im ersten Untersuchungsgebiet bei Offenburg zeichnet sich die östliche Haupttrandstörung der Kehler Mulde als eine 250 m breite, steil einfallende Störungszone ab. Sie wird durch zwei größere Störungen begrenzt und von kleineren, subparallelen Störungen begleitet. Als Mindestalter der letzten Aktivität des Systems konnte das Mittlere Pliozän bestimmt werden; die hohe Dynamik der Sedimentation im Jüngeren Pliozän verhindert eine zweifelsfreie Verfolgung der Störungsaktivität bis ins Quartär.

Im zweiten Untersuchungsgebiet bei Neustadt a.d.Weinstraße wurde eine durch zwei synsedimentäre Abschiebungen begrenzte Horststruktur erfasst. Mit zunehmender Tiefe verzweigen sich ihre Flanken in ein komplexes Muster kleinerer Auf- und Abschiebungen. Die Aktivität des Störungssystems ist vom Oligozän bis ins subrezente Quartär hinein nachweisbar.

Alle P-Wellen-Messungen zeigen, dass sich die in der 3D-Seismik sichtbaren Störungsmuster oberflächennah durch relativ wenig aufwendige 2D-Messungen hochauflösend ergänzen lassen, wodurch sich tiefere Einblicke in die Kinematik und Chronologie von Störungssystemen gewinnen lassen. Mit den S-Wellen-Messungen dagegen konnten – trotz guter Ergebnisse der Methode an anderen Lokationen – keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden. Eine Ursache mag in der Beschaffenheit und Heterogenität der Sedimente vor Ort liegen (Sande, Kiese).

2.3.3 Bewertung

Durch die Kombination verschiedener seismischer Attribute konnte eine verbesserte strukturelle Differenzierung stratigraphischer Einheiten erreicht werden. Die CRS-Bearbeitung hat sich als vorteilhaft bei der Geschwindigkeitsbestimmung herausgestellt; sie hat auch eine höher auflösende Abbildung des Datensatzes ergeben. Eine ‚*sparse acquisition*‘ mit anschließender CRS-Bearbeitung erscheint nicht sinnvoll, da gerade die für die Geothermie wichtigen Störungen mit relativ kleinen Versatzbeträgen nicht mehr abgebildet werden.

Die mithilfe seismischer Attribute visualisierten kleineren Störungen ordnen sich oft versetzt an und zeigen eine laterale Kontinuität von z.T. nur einigen 100 m. Sie sind daher durch 2D-Seismik praktisch nicht zu erfassen. Auch größere Störungen zeigen teilweise einen nicht geradlinigen Verlauf, der bei Interpolationen von 2D-Profilen zu deutlichen Lagefehlern führen würde. Zudem sind Störungen mit geringem Versatzbetrag in 2D-Linien wie auch in seismischen Schnitten aus dem 3D-Volumen kaum erkennbar, sondern erfordern eine flächenhafte Analyse der 3D-Daten.

Der Einsatz von 2D-Seismik stellt bei speziellen Problemen wie der Fragestellung nach dem Verlauf des oberflächennahen Störungsmusters einen effizienten Weg dar, 3D-Messungen zu ergänzen. Bei der Korrelation des Alters der Aktivität mit der Durchlässigkeit einer Störung und bei der seismischen Erkundung mit S-Wellen besteht weiterhin Forschungsbedarf.

3 Entwicklung einer VSP-Sonde

Bei der Erkundung, Charakterisierung und Bewertung geothermischer Reservoirs spielt auch die in situ Messung elastischer Parameter eine wichtige Rolle. So können Intervallgeschwindigkeiten bestimmt und seismische Reflektoren hoch aufgelöst mit bekannten Lithologiewechseln in Verbindung gebracht werden. Zudem können Reflexionen von steil stehenden Störzonen direkt detektiert werden.

Bei früheren VSP (vertikales seismisches Profil) -Messungen an der Geothermiebohrung Unterhaching Gt 1 hatte sich gezeigt, dass derzeit nur sehr wenige Geophonsonden für Messungen am Markt zur Verfügung stehen. Im Rahmen des Projektes wurde deshalb eine neue Geophonsonde für tiefe Geothermiebohrungen entwickelt und gebaut. Dabei sollten besonders die hohen Temperaturen, denen die Bauteile in geothermischen Bohrungen widerstehen müssen, und die Anpassung der Sonde an die institutseigene Mess-Apparatur berücksichtigt werden.

Nach der Festlegung der technischen Details der Geophonsonde wurde eine europaweite Ausschreibung durchgeführt. Die Entwicklung der Sonde durch die Firma Antares, Bremen, begann am 15.12.2008. Verzögerungen im Zeitplan ergaben sich aus Entwicklungs- und Lieferverzögerungen auf Seiten des Herstellers, aber auch aufgrund von technischen und formalen Problemen an der Testbohrung in Hannover. Die Entwicklung des Geophonsondensystems konnte erst Ende Juni 2011 abgeschlossen werden. Die Sonde konnte in der Hauptbohrung des Kontinentalen Tiefbohrprogramms (KTB-HB) bis 5000 Teufe und in der GeneSys-Bohrung Groß-Buchholz GT1 bis 170° C erfolgreich eingesetzt werden.

Folgende Tests der Sonde fanden statt:

- 18.02.2010 beim Hersteller in Bremen
- 18./19.05.2010 GeneSys-Bohrung Groß-Buchholz GT1
- 14.-17.06.2010 GeneSys-Bohrung Groß-Buchholz GT1
- 07.07.2010 beim Hersteller in Bremen
- 03./04.08.2010 GeneSys-Bohrung Groß-Buchholz GT1
- 29.09.2010 beim LIAG Hannover
- 23./30.11., 01./02./06./15./16.12.2010 GeneSys-Bohrung Groß-Buchholz GT1
- 05./06.01.2011 GeneSys-Bohrung Groß-Buchholz GT1
- 25.05.2011 KTB-Bohrung Windischeschenbach.

Durch die verschiedenen Testmessungen liegt inzwischen ein vollständiges vertikales seismisches Profil (VSP) aus der GeneSys-Bohrung Groß-Buchholz GT1 vor, das innerhalb des GeneSys-Projekts am LIAG weiter ausgewertet wird.

Die Sonde steht für zukünftige VSP-Messungen in tiefen Geothermiebohrungen zur Verfügung.

4 Dissemination

Die Dissemination der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse erfolgte durch:

- Erstellung eines Handbuches,
- Publikationen und Vorträge
- Austausch mit Geothermie-Firmen und Forschungsprojekten.

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes werden in einem Handbuch zusammengefasst. Das Handbuch mit dem (Arbeits-)Titel „Seismische Exploration in der tiefen Geothermie“ besitzt einen Umfang von ca. 220 Seiten und enthält folgende Kapitel:

- Geothermische Energie
- Seismische Grundlagen
- Seismische Messsysteme
- Messgeometrie
- „Datenbearbeitung“
- Interpretation und Kosteneffizienz.

Das Manuskript wird diesem Endbericht als vorläufiger Entwurf beigelegt und muss noch redaktionell überarbeitet werden. Das Buch soll einen Leitfaden für die seismische Exploration von geothermischen Reservoiren liefern. Damit wird öffentlichen Geldgebern und privaten Investoren ein Instrument in die Hand gegeben, die Vorerkundung qualitativ zu bewerten und Grundlagen für das Fündigkeitsrisiko besser einzuschätzen. Für das Thema „Seismische Exploration in der tiefen Geothermie“ fehlt entsprechende Literatur. Wie sich auf dem World Geothermal Congress 2010 zeigte, hat hier unsere deutsche Arbeitsgruppe die größte Erfahrung.

Aktuelle Ergebnisse aus dem Projekt wurden auf nationalen und internationalen Kongressen vorgestellt und diskutiert, so auf den Geothermiekongressen der Geothermischen Vereinigung (2008 – 2011), dem World Geothermal Congress (2010), den Jahrestagungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (2008 – 2011), der European Geosciences Union (2009 – 2011) und der European Association of Geoscientists & Engineers (2009 – 2011). Eine vollständige Liste aller Publikation und Vorträge findet sich in Kap. 5.

Darüber hinaus kam es abhängig vom Projektfortschritt zu einem wissenschaftlichen und technischen Erfahrungsaustausch mit Firmen aus der Geothermie-Branche (Hybridkraftwerk Neuried GmbH, Exorka GmbH, GeoEnergy GmbH, GEOenergie Bayern GmbH, ERDWERK GmbH) und Wissenschaftlern aus dem Forschungsprojekt Geothermie und Hochleistungsbohren (gebo) – gefördert durch das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kunst –, und den BMU-Projekten Geothermie Großraum München und Generierte Geothermische Systeme (GeneSys).

5 Publikationen und Vorträge

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

5.1 Zeitschriften

von Hartmann, H., Bunes, H., Krawczyk, C. & Schulz, R. (2011): 3-D seismic analysis of a carbonate platform in the Molasse Basin - reef distribution and internal separation with seismic attributes. – Tectonophysics, submitted.

Musmann, P. & Bunes, H. (2010): High-resolution seismic imaging of near-surface fault structures within the Upper Rhine Graben, Germany. - In Richard D. Miller, John H. Bradford, and Klaus Holliger (eds.): Advances in near-surface seismology and ground-penetrating radar, Chapter 17; SEG Geophysical Developments Series No. 15: 281-296.

5.2 Vorträge und Poster

5.2.1 Vortragsveröffentlichungen (Proceedings)

Beilecke, T., Bunes, H., Von Hartmann, H. & Schulz, R. (2010): Seismische Attributanalysen der Norddeutschen Trias für die hydrothermale Nutzung. - Der Geothermiekongress 2010, 17.-19.11.2010; Karlsruhe.

Bunes, H., Von Hartmann, H., Beilecke, T. & Schulz, R. (2011): Geothermal exploration by 3D seismic in Germany – is there a potential for cost reduction? - Sustainable Earth Sciences Conference & Exhibition 08.-11.11.2011, Valencia, Spain.

Bunes, H., Von Hartmann, H., Beilecke, T. & Schulz, R. (2011): Sparse 3D acquisition and CRS processing for the imaging of a fault system: a case study.- 73rd EAGE Conference & Exhibition, Vienna, Austria, 23-26 May 2011.

Bunes, H., von Hartmann, H., Rumpel, H.-M., Beilecke, T., Musmann, P. & Schulz, R. (2010): Seismic Exploration of Deep Hydrogeothermal Reservoirs in Germany. - Proceedings World Geothermal Congress 2010, Paper 1346, 5p, Bali, Indonesia, 25.-29. April 2010.

Bunes, H., von Hartmann, H., Beilecke, T. & Schulz, R. (2010): Visualisierung von Störungen mithilfe seismischer Attribute. - Extended abstracts, Jahrestagung der geothermischen Vereinigung, 17.-19.11.2010, Karlsruhe.

Musmann, P., Bunes, H. & Rumpel, H.-M. (2009): High-resolution seismic imaging of near-surface fault zones in the Upper Rhine Graben, Germany. - Proceedings of 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, EAGE Near Surface 07.-09.09.2009; Dublin, Ireland.

- Musmann, P., Bunes, H. & Rumpel, H.-M. (2008): Hochauflösende reflexionsseismische Erkundung von oberflächennahen Störzonen im Oberrheingraben. - Der Geothermiekongress 11.-13. Nov. 2008, Karlsruhe; S. 130-133.
- Orilski, J., Bunes, H., Beilecke, T. & Wonik, T. (2011): Reservoircharakterisierung mittels VSP-Messung am Standort der Bohrung Groß Buchholz Gt1 in Hannover. - Geothermiekongress 15.-17.11.2011, Bochum.
- Rumpel, H.-M., Schlüter, P. & Bunes, H. (2009): Imaging fault structures for hydrothermal use in the Upper Rhine Graben. - EAGE Jahrestagung, 08.-11.06.2009; Amsterdam, Netherlands.
- Rumpel, H.-M., Von Hartmann, H., Musmann, P., Bunes, H., Beilecke, T. & Schulz, R. (2009): Der Einsatz von 3D-Seismik zur Reduzierung des Fündigkeitsrisikos bei Geothermieprojekten. - DGMK Frühjahrstagung, 27.-28.04.2009; Celle.
- Rumpel, H.-M., Von Hartmann, H., Musmann, P., Bunes, H., Beilecke, T. & Schulz, R. (2008): Vorteile seismischer 3D Daten. - Der Geothermiekongress, 11.-13.11.2008; Karlsruhe.
- von Hartmann, H., Bunes, H., Thomas, R. & Schulz, R. (2011): 3D Seismic Exploration of a Carbonate Geothermal Reservoir in Southern Germany.- DGG/EAGE Workshop - Geophysics for Deep Geothermal Energy, 25.02.2011, Köln.
- von Hartmann, H., Bunes, H., Thomas, R., Krawczyk, C. & Schulz, R. (2011): Faults, facies, and karst – integrated seismic interpretation of a hydrogeothermal reservoir. - Sustainable Earth Sciences Conference & Exhibition 08.-11.11.2011, Valencia, Spain.
- von Hartmann, H., Rumpel, H.-M., Musmann, P., Bunes, H., Krawczyk, C. & Schulz, R. (2010): Enhancing Hydrogeothermal Reservoir Detection by Seismic Imaging and Attributes. - Proceedings World Geothermal Congress 2010, Paper 1348: 4p; Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
- von Hartmann, H., Bunes, H., Thomas, R. & Schulz, R. (2010): Seismische Exploration in der Molasse als Grundlage für die Reservoirsimulation. - Der Geothermiekongress 17.-19. November 2010; Karlsruhe.
- von Hartmann, H., Bunes, H. & Thomas, R. (2009): Exploration of a deep carbonate hydrogeothermal aquifer. - EAGE Annual Meeting, 8.-11.6.2009; Amsterdam.
- von Hartmann, Rumpel, H.-M., Musmann, P., Beilecke, T., Bunes, H. & Schulz, R. (2008): Der Einsatz der 3D Seismik zur Reduzierung des geologischen Fündigkeitsrisikos.- Der Geothermiekongress 11.-13.11.2008, Geothermische Vereinigung, Karlsruhe, Seite 121 - 126.
- von Hartmann, H., Rumpel, H.-M., Musmann, P., Beilecke, T., Bunes, H. & Schulz, R. (2008): Exploration Risk Reduction for Hydrogeothermal Projects by the use of 3D-Seismic Surveys.- Workshop on Geological Risk Insurance, Geo-

thermal Energy Development Program (GEOFUND) Worldbank, 11.-12.11.2008, Karlsruhe

5.2.2 Poster

- Beilecke, T., Buness, H., Orilski, J. & Schulz, R. (2011): Neue Geophonsonde für seismische Prospektion in der Geothermie des Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG). - 71. Jahrestagung der DGG, 21.-24.02.2011; Köln.
- Beilecke, T., Buness, H., Von Hartmann, H. & Schulz, R. (2010): Seismische Analysen der Norddeutschen Trias für die hydrogeothermale Nutzung . - Poster, Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, 15.-18.03.2010; Bochum.
- Beilecke, T., Buness, H., Von Hartmann, H., Musmann, P., Rumpel, H.-M. & Schulz, R. (2009): Die Anwendung von Seismik in der geothermischen Exploration in Deutschland. - Poster, Jahrestagung der Deutschen geophysikalischen Gesellschaft, 23.- 26.03.2009; Kiel.
- Buness, H., Von Hartmann, H., Rumpel, H.-M., Krawczyk, C.M.-&, Schulz, R. (2011): Fault recognition depending on seismic acquisition and processing for application to geothermal exploration. - Poster T11A-2296, AGU fall meeting, 4.-9.12.2011; San Francisco, USA.
- Buness, H., Von Hartmann, H., Beilecke, T., & Schulz, R. (2011): Visualisierung von Störungen mithilfe seismischer Attribute. - 71. Jahrestagung der DGG, Köln, 21.-24.02.2011.
- Buness, H., Von Hartmann, H., Beilecke, T. & Schulz, R. (2011): Sparse 3D acquisition and CRS processing for the imaging of a fault system: a case study.- Poster at 73rd EAGE Conference & Exhibition, Vienna, Austria, 23-26 May 2011
- Musmann, P., Buness, H. & Rumpel, H.-M. (2008): Hochauflösende reflexions-seismische Erkundung von oberflächennahen Störzonen im südlichen Oberrheingraben: Erste Ergebnisse. - Poster, Meeting German Geophysical Society (DGG), 03.-06.03.2008; Freiberg, Germany.
- Orilski, J., Beilecke, T., Buness, H. & Wonik, T. (2011): Seismische Geschwindigkeiten in der Bohrung Groß Buchholz GT1, Hannover: Vergleich zwischen in-situ und Laborbedingungen. - Poster, DGG Tagung, 21.-24.02.2011; Köln.
- Rumpel, H.-M. & Buness, H. (2009): Imaging fractured systems in the Upper Rhine Graben. - Poster, General Assembly European Geosciences Union, 19.-24.04.2009; Vienna, Austria.
- Rumpel, H.-M., Beilecke, T., Buness, H., Musmann, P. & von Hartmann, H. (2008): Reduce the risk of finding a deep geothermal reservoir by means of 3D seismics. - Poster, General Assembly European Geophysical Union, 14.-18.04.2008; Vienna, Austria.

Rumpel, H.-M., Beilecke, T., Buness, H., Musmann, P. & Von Hartmann, H. (2008): Der Einsatz von 3D-Seismik zur Reduzierung des Fündigkeitsrisikos bei Geothermieprojekten. - Poster, Meeting German Geophysical Society (DGG), 03.-06.03.2008; Freiberg, Germany.

von Hartmann, H., Buness, H., Musmann, P. & Schulz, R. (2010): Collapse structures within a hydrogeothermal aquifer. - Poster, Annual Meeting European Geoscience Union, 2. - 7. May 2010; Vienna, Austria

von Hartmann, H., Buness, H.-& Thomas, R. (2010): Faziesverteilung innerhalb einer Karbonatplattform.- Poster, DGG Jahrestagung Bochum 15.-18.03.2010.

von Hartmann, H., Buness, H., Krawczyk, C.M.& Schulz, R. (2010): Recognition of carbonate facies by seismic attributes: Application to geothermal exploration. - Poster, SEISMIX conference, 29.8.-4.9.2010; Cairns, Australia.

5.2.3 Vorträge

Beilecke, T. (2009): Einführung in die seismische Datenbearbeitung. Workshop 'Seismische Exploration', Geothermiekongress 2009 der GTV in Bochum, 17.-19.11.2009.

Musmann, P., Buness, H., Krawczyk, C. (2010): High-resolution Seismic Imaging of Near-Surface Fault Zones in the Upper Rhine Graben, Germany. - EGU General Assembly, 2.-7.05.2010; Vienna

Musmann, P., Buness, H., Krawczyk, C. (2010): Fault zone processes from (integrated) geophysical imaging. - EGU General Assembly, 3.-7.5.2010, Vienna, Austria.

Musmann, P., Buness, H., Rumpel, H.-M. (2009): Hochauflösende reflexions-seismische Abbildung von oberflächennahen Störzonen im Oberrheingraben: Drei Fallbeispiele. - 69. DGG Jahrestagung, 23.-26.03.2009; Kiel.

Musmann, P. & Buness, H. (2009): Grundlagen seismischer 2D/3D Messungen. - Workshop 'Seismische Exploration', Geothermiekongress 2009 der GTV in Bochum, 17.-19.11.2009.

von Hartmann, H., Buness, H., Schulz, R. (2010): Hydrogeothermale Exploration in der bayerischen Molasse. - DGG Jahrestagung 15.-18.03.2010; Bochum.

von Hartmann, H., Buness, H., Musmann, P., Schulz, R. (2010): Collapse structures within a hydrogeothermal aquifer. Annual Meeting European Geoscience Union, 2. - 7. May; Vienna, Austria.

von Hartmann, H. (2009): Fazies und Struktur in der Interpretation seismischer Daten - Grundlagen, Techniken, Hilfsmittel. – Workshop 'Seismische Exploration', Geothermiekongress 2009 der GTV in Bochum, 17.-19.11.2009.

von Hartmann, H., Buness, H. (2009): Exploration of a hydrothermal reservoir in Southern Germany. - Workshop 'New Technologies and strategies towards

Zero-emission Energy through Geothermal Systems', EAGE Annual Meeting, 8.-11.6.2009; Amsterdam.

von Hartmann, H., Bunes, H., Schulz, R. (2009): Geothermal Exploration in Germany - with an Example of a Carbonate Aquifer. - SEG Workshop: Mining the Earth for heat and power, 30.10.2009; Houston.

von Hartmann, H., Rumpel, H.-M., Musmann, P., Beilecke, T., Bunes, H., Schulz, R. (2008): Reduce the risk of finding a deep hydrogeothermal reservoir by means of 3D seismics.- GEO2008 Tagung der DGG, GV vom 29.9.-2.10.2008 in Aachen

5.3 Berichte

Musmann, P. (2009a): Hochauflösende reflexionsseismische Untersuchungen von oberflächennahen Störzonen im Oberrheingraben in Neuried 2007/08 – Bericht zur technischen Durchführung und Prozessing der 2D-Seismik, LIAG-Bericht, Archiv-Nr.: 0128617; Hannover.

Musmann, P. (2009b): Hochauflösende reflexionsseismische Untersuchungen von oberflächennahen Störzonen im Oberrheingraben in Speyerdorf 2008 – Bericht zur technischen Durchführung und Prozessing der 2D-Seismik, LIAG-Bericht, Archiv-Nr.: 0128774; Hannover.

Schulz, R. & Bunes, H. (2008): Einsatz von 3D-Seismik zur Reduzierung des Fündigkeitsrisikos bei Geothermieprojekten. – 1. Zwischenbericht. - GGA-Bericht, Archiv-Nr. 127 474; Hannover.

Schulz, R. & Bunes, H. (2009): Einsatz von 3D-Seismik zur Reduzierung des Fündigkeitsrisikos bei Geothermieprojekten. - 2. Zwischenbericht. GGA-Bericht, Archiv-Nr. 0128196, Hannover.

Schulz, R. & Bunes, H. (2010): Einsatz von 3D-Seismik zur Reduzierung des Fündigkeitsrisikos bei Geothermieprojekten. - 3. Zwischenbericht, LIAG-Bericht, Archiv-Nr. 0128643; Hannover.

Schulz, R. & Bunes, H. (2011): Einsatz von 3D-Seismik zur Reduzierung des Fündigkeitsrisikos bei Geothermieprojekten. - 4. Zwischenbericht, LIAG-Bericht, Archiv-Nr. 0129697; Hannover.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart Endbericht
3a. Titel des Berichts Einsatz von 3D-Seismik zur Reduzierung des Fündigkeitsrisikos bei Geothermieprojekten	
3b. Titel der Publikation Seismische Exploration für tiefe Geothermie	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Schulz, Rüdiger, Bunes, Hermann, Beilecke, Thies, von Hartmann, Hartwig, Musmann, Patrick, Bauer, Stefan, Donath, Andreas & Rüter, Horst	5. Abschlussdatum des Vorhabens Juni 2011
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n)) Wie 4a.	6. Veröffentlichungsdatum offen
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) Stilleweg 2 30655 Hannover	7. Form der Publikation Buch
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Postfach 12 06 29 53048 Bonn	9. Ber.Nr. Durchführende Institution 0130496
16. Zusätzliche Angaben	10. Förderkennzeichen 0327630
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) 8. Internationale Geothermiekonferenz IGC 2012, Freiburg, 24.05.2012	11a. Seitenzahl Bericht 21 Seiten
18. Kurzfassung Die hydrothermale Geothermie besitzt ein großes Potenzial für die Energieversorgung in Deutschland. Ein wesentliches Hemmnis ist das Fündigkeitsrisiko. Dies kann durch den Einsatz seismischer Verfahren, die für die der Kohlenwasserstoff(KW)-Exploration entwickelt wurden, gemindert werden. Im Vorhaben wurden drei 3D-Datensätze im Norddeutschen Becken, im Oberrheingraben sowie im Süddeutschen Molassebecken analysiert, neu prozessiert und interpretiert. 3D-Datensätze ermöglichten eine flächenhafte Analyse mit unterschiedlichen seismischen Attributen. Hierdurch war es möglich, geologische Bedingungen für eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit in den Aquiferen abzuleiten. Störungssysteme sind in allen Gebieten stark heterogen. Sie können nur mit 3D seismischen Messungen abgebildet werden. Auch deshalb sind 3D seismische Untersuchungen 2D-Messungen vorzuziehen. Die spektrale Dekomposition hat sich als hilfreich zur Faziesanalyse im Bereich geringmächtiger Sedimente erwiesen. Die CRS (<i>Common Reflection Surface</i>)-Bearbeitung ergab durchweg eine Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses; sie sollte aber nur als Ergänzung zu einer konventionellen Bearbeitung angesehen werden. Die Parameter der Datenakquisition sollten gegenüber dem in der KW-Industrie geltenden Standard nicht wesentlich eingeschränkt werden. Eine Reduzierung der Datendichte mit anschließender CRS-Bearbeitung erscheint nicht sinnvoll, da gerade die für die Geothermie wichtigen Störungen mit relativ kleinen Versatzbeträgen nicht mehr abgebildet werden. Hochauflösende 2D-Seismik zur Erkundung des oberflächennahen Störungsmusters kann 3D-Messungen ergänzen und noch aktive Störungen mit einer möglicherweise erhöhten hydraulischen Durchlässigkeit erkunden. Für VSP (<i>Vertical Seismic Profile</i>)-Messungen in Geothermie-Bohrungen wurde eine 3-Komponentensonde entwickelt, die den hohen Temperaturen und Drücken angepasst ist. Sie steht für zukünftige VSP-Messungen zur Verfügung. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes werden in einem Handbuch zusammengefasst. Das Buch soll einen Leitfaden für die seismische Exploration von geothermischen Reservoiren liefern.	11b. Seitenzahl Publikation Ca. 200 Seiten
19. Schlagwörter Geothermische Energie, Tiefe Geothermie, Seismik, CRS, VSP, Faziesanalyse, Störungsanalyse, Norddeutsches Becken, Oberrheingraben, Süddeutsches Molassebecken	12. Literaturangaben
20. Verlag	14. Tabellen
21. Preis	15. Abbildungen

l) Hinweis für Bearbeiter/in:
Auf das Förderkennzeichen des BMU soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden

BMU-Vordr. 3831/10.02

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. Type of Report Final Report
3a. Report Title 3D seismic surveys for reducing the exploration risks of geothermal projects (in German)	
3b. Title of Publication Seismic exploration for deep geothermal energy (in German)	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Schulz, Rüdiger, Buness, Hermann, Beilecke, Thies, von Hartmann, Hartwig, Musmann, Patrick, Bauer, Stefan, Donath, Andreas & Rüter, Horst	5. End of Project June 2011
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s)) See 4a	6. Publication open
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Leibniz Institute for Applied Geophysics (LIAG) Stilleweg 2 30655 Hannover	7. Form of Publication Book
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Postfach 12 06 29 53048 Bonn	9. Originator's Report No. 0130496
	10. Reference No. 0327630
	11a. No. of Pages Report 21 p.
	11b. No. of Pages Publication c. 200 p.
	12. No. of References
	14. No. of Tables
	15. No. of Figures
16. Supplementary Notes	
17. Presented at (Title, Place, Date) 8. International Geothermal Conference IGC 2012, Freiburg, 24.05.2012	
18. Abstract Hydro-thermal geothermics holds a large energy supply potential in Germany. However, the risk of success constitutes a significant obstacle. This can be mitigated by the application of seismic methods originally developed for oil and gas exploration. Three 3D-datasets located in the North German Basin, the Upper Rhine Graben, and the Southern German Molasse Basin were analyzed, re-processed, and interpreted within this project. 3D-seismic datasets enable an areal analysis using a variety of seismic attributes, giving hints on enhanced hydraulic permeabilities within aquifers. In all investigation areas fault systems show a high degree of heterogeneity that can only be reliably imaged with 3D-seismics. Therefore, 3D-seismic is to be preferred to 2D-seismic. Spectral decomposition proved to be useful for facies analysis of thin-layered sediments. CRS (Common Reflection Surface) processing consistently revealed an improved signal/noise ratio. However, the method should only be regarded as a complement to conventional processing. Data acquisition parameters should in general not be reduced below the standard established in the oil and gas industry. A reduction of data density, followed by CRS processing, does not appear to make sense, since the imaging of small scale fault systems degrades, which would be an important draw-back for geothermal exploration. A valuable complement for 3D-seismic surveys can be achieved by high resolution measurements of the near surface fault pattern. This way, recently or sub-recently active faults with probably higher permeabilities can be discerned from inactive ones. During the project, a 3-component borehole geophone was developed, able to withstand high temperatures in geothermal reservoirs. It can be used for future VSP (vertical seismic profile) measurements. The results of this project will be comprehensively summarized in a handbook. It will serve as a guideline for seismic exploration of geothermal reservoirs.	
19. Keywords Geothermal energy, Deep Geothermal Energy, seismics, CRS, VSP, seismic facies analysis, faults, North German Basin, Upper Rhine Graben, South-German Molasse Basin	
20. Publisher	21. Price