

## Abschlußbericht zum Verbundprojekt



### Förderkennzeichen 03G0797A bis D



an den  
**Projektträger Jülich**  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
System Erde - MGS  
Schweriner Str. 44, 18069 Rostock



**Juni 2015**

Dieser Schlussbericht wurde von allen PROTECT-Partnern gemeinsam erstellt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

# Inhaltsverzeichnis

## ZUSAMMENFASSUNG

<b>TEIL I</b>	<b>KURZDARSTELLUNG.....</b>	<b>1</b>
1	Einführung und Projektübersicht .....	1
1.1	Partner des Verbundprojekts.....	2
1.2	Aufgabenstellung.....	3
1.3	Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens.....	4
1.4	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
1.5	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	6
1.6	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	10
1.7	Referenzen.....	10
<b>TEIL II</b>	<b>EINGEHENDE DARSTELLUNG .....</b>	<b>14</b>
1	Durchgeführte Arbeiten und wesentliche Ergebnisse .....	14
1.1	Sub-/seismische Deformation und seismische Validierung (Arbeitspaket 1).....	14
1.2	Räumliche Kartierung von Brüchen und Störungen (Arbeitspaket 2) .....	32
1.3	Stressvorhersage mit geomechanischer Vorwärtsmodellierung (Arbeitspaket 3).....	39
1.4	Benchmarking von CO <sub>2</sub> -Speicherprozessen (Arbeitspaket 4).....	48
2	Zahlenmäßiger Nachweis - wichtigste Positionen .....	58
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführtenArbeiten.....	58
4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	59
5	Fortschritt des Vorhabens bei anderen Stellen.....	60
6	Veröffentlichung der Ergebnisse.....	61
6.1	Erfolgte Veröffentlichungen .....	61
6.2	Geplante Veröffentlichungen .....	67
7	Qualifikationsarbeiten .....	68
<b>TEIL III</b>	<b>KURZFASSUNG DES WESENTLICHEN FACHLICHEN INHALTS .....</b>	<b>69</b>
<b>TEIL IV</b>	<b>ANLAGEN .....</b>	<b>A1</b>
	Abbildungen zur Multiattributanalyse in Arbeitspaket 2.....	A3





## ZUSAMMENFASSUNG

Im Verbundprojekt PROTECT (PRediction Of deformation To Ensure Carbon Traps) haben wir die Verteilung und den Betrag von sub-/seismischer Deformation in der Umgebung eines CO<sub>2</sub>-Reservoirs im Otway Becken in Australien quantifiziert und vorhergesagt. Drei unabhängige Ansätze füllen den sub-seismischen Raum: seismische Multi-Attribute stabilisieren mit der Abbildung von klein-skaligen Lineamenten die Interpretation des 3-D Strukturmodells; die Retrodeformation hat für die abdeckende Schicht ca. 80% als höchste Deformationsmagnitude erbracht; die numerische Vorwärtsmodellierung zeigt, dass der maximale horizontale Stress im Reservoir lokal durch Störungen überprägt ist. Diese Vorhersagen haben wir außerdem mit neu gemessenen, oberflächen-nahen reflexionsseismischen Daten überprüft und mit neuen Visualisierungswerkzeugen bewertet.

Als Gesamtergebnis geben wir deshalb folgende *Empfehlung*, die einen mehr-phasigen *Workflow* zur Quantifizierung des Leckagepotenzials eines Reservoirs und seines Überbaus ermöglicht:

- 1) Deformationsquantifizierung auf groß-skaligem Erkundungssurvey,
- 2) Charakterisierung von *in situ* tektonischem Stress,
- 3) Identifikation von Gebieten mit potenziellem Leckagerisiko,
- 4) Detailuntersuchung durch hochauflösende Seismik (P-/S-Welle) oder andere Methode,
- 5) Anpassung des Überwachungskonzeptes.

Unsere erzielten Ergebnisse gehen im Rahmen des australischen Demonstrationsprojektes im Otway Becken bereits in dessen Überwachungsstrategie ein. Ebenso sind weiterführend von uns prognostizierte Störungsstrukturen für Testexperimente zur Störungsdurchlässigkeit und Leckage vorgesehen.

Dieser neue seismo-mechanische *Workflow* zeigt, wie potenzielle Wegsamkeiten im Untergrund hochauflösender als bisher abgebildet und bewertet werden können. Als solcher stellt er damit nun ein Werkzeug zur Vorhersage und angepassten zeitabhängigen Überwachung von Untergrundspeichern im Allgemeinen zur Verfügung.

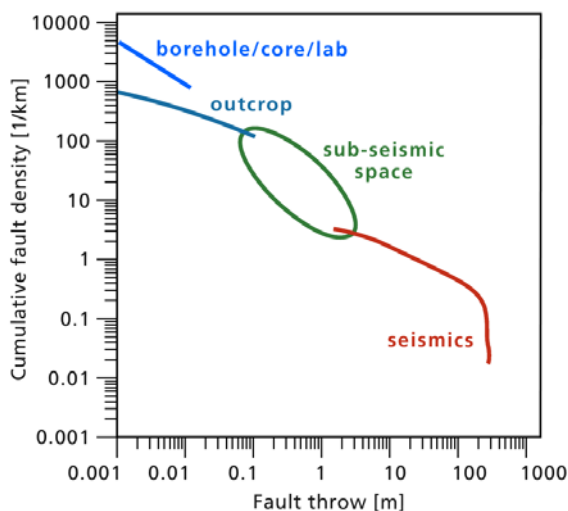


## TEIL I KURZDARSTELLUNG

### 1 Einführung und Projektübersicht

Die Hauptzielsetzung und Herausforderung dieses Verbundantrags war es, das spezifische Potenzial kommunizierender Systeme zwischen Reservoir und Oberfläche im Rahmen einer CO<sub>2</sub>-Injektion herauszufinden, um die Langzeitsicherheit des Speichers abzusichern und angepasste Überwachungsstrategien zu ermöglichen.

In Abhängigkeit vom regionalen Stressfeld und lokalen Gegebenheiten können die Untergrundstruktur und die möglichen Wegsamkeiten sehr spezifisch sein. Zusätzlich zu den Reservoireigenschaften im tiefen Untergrund spielen auch oberflächennahe Strukturen eine wichtige Rolle. Störungsbegrenzte Strukturen bieten mögliche Wegsamkeiten und damit Zutritt von CO<sub>2</sub> in Grundwasserleiter, die geschützt werden müssen. Da diese Systeme primär Systeme sind, die über verschiedene Skalen agieren, müssen sie ebenso hinsichtlich ihrer Struktur, physikalischen Eigenschaften und aktiven Prozesse verstanden werden. Dies erfordert eine zeitabhängige qualitative und quantitative Beschreibung der räumlich-zeitlichen Reservoireigenschaften und des Deformationspotenzials mit geophysikalischen und numerischen Methoden auf verschiedenen Skalen, die die sub-seismische Lücke verkleinern sollen (*Abb. 1*).



**Abbildung 1:** Definition des sub-seismischen Raumes. Er ist zwischen seismischer und Bohrlochskala angesiedelt, die hier exemplarisch für typische Bruch- und Kluftsysteme aufgetragen sind.

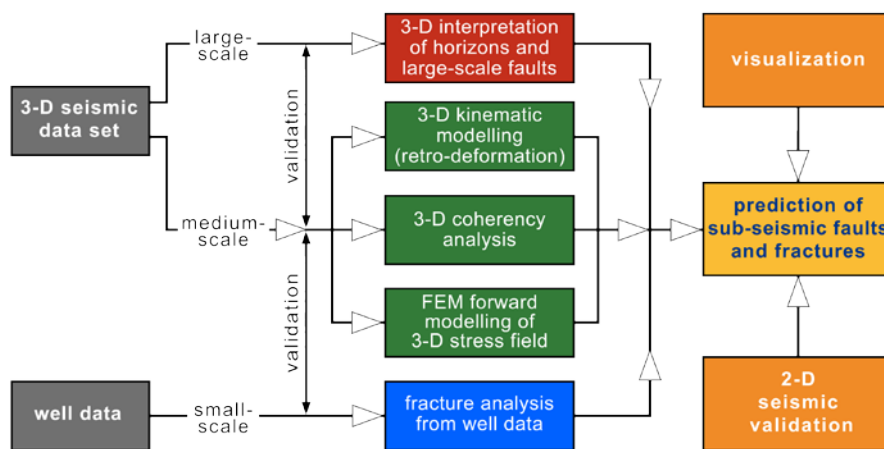
Im Untersuchungsgebiet im Otway Becken/Australien wurde diesem Ansatz durch vier Arbeitspakete Rechnung getragen, die stark miteinander verwoben sind und sich ergänzen. Ihre **Hauptziele** sind:

- (1) Reservoircharakterisierung und Vorhersage von Migrationswegen in Raum und Zeit
  - Retrodeformation und sub-seismische Vorhersage von Gebieten mit potenziellem Leckagerisiko;
- (2) Charakterisierung kleinskaliger Brüche und Störungen
  - effizientes Kohärenzprozessing für systematische und detaillierte Abbildung;
- (3) Simulation von Stress und Deformation im Untergrund aufgrund von Störungen und Lithologie
  - neue geomechanische Vorwärtsmodelle mit räumlich variablen Materialparametern;
- (4) seismo-mechanische Empfehlung für sichere CO<sub>2</sub>-Speicherung
  - Validierung von Risikobereichen mit höher auflösenden Messungen für zukünftige Überwachungsstrategien.

Dazu ist das Verbundprojekt in vier thematische Arbeitspakete (AP) aufgeteilt; jedes steht außerdem für die Forschung innerhalb einer Institution (siehe auch Abschnitt 1.1):

- AP1 sub-/seismische Deformationsvorhersage potenzieller Wegsamkeiten und ihre Validierung mit hochauflösender Seismik (LIAG),
- AP2 räumliche Kartierung von Brüchen und Störungen mit Kohärenzanalyse (TEEC),
- AP3 Stress- und Deformationsvorhersage mit geomechanischer Vorwärtsmodellierung (TUDA),
- AP4 Visualisierung und Benchmarking von CO<sub>2</sub>-Speicherprozessen (UFZ).

Die wissenschaftlichen und technischen Ziele gelten für alle APs, werden nur in unterschiedlichem Maß von ihnen adressiert. Wie sich die Skalen der APs gegenseitig ergänzen, ist in **Abbildung 2** schematisch dargestellt.



**Abbildung 2:** Ablauf und Interaktion im Verbundprojekt PROTECT, das die Kombination verschiedener Skalen und Wellenlängen der Deformation und die Validierung der unabhängig erhaltenen Vorhersagen zum Ziel hat (siehe Krawczyk et al., 2015). Der sub-seismische Raum wird durch die Methoden im Inneren des Schemas (grüne Kästchen) gefüllt und die Vorhersagen anschließend validiert (orange Kästchen).

## 1.1 Partner des Verbundprojekts

LIAG: Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, Stilleweg 2, D-30655 Hannover

Förderkennzeichen 03G0797A

Ansprechpartnerin: Prof. Dr. Charlotte Krawczyk (lotte@liag-hannover.de)

TEEC: TEEC GmbH, Burgwedeler Str. 89, D-30916 Isernhagen

Förderkennzeichen 03G0797B

Ansprechpartner: Dr. Henning Trappe (trappe@teec.de)

TUDA: TU Darmstadt, Institut f. Ang. Geowissenschaften, Schnittspahnstraße 9, D-64287 Darmstadt

Förderkennzeichen 03G0797C

Ansprechpartner: Prof. Dr. Andreas Henk (henk@geo.tu-darmstadt.de)

UFZ: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH, Permoserstraße 15, D- 04318 Leipzig

Förderkennzeichen 03G0797D

Ansprechpartner: Prof. Dr. Olaf Kolditz (olaf.kolditz@ufz.de)

***Partner in Australien (ohne Finanzierung durch Geotechnologien)***

CO2CRC, Melbourne University

Ansprechpartner: Dr. Matthias Raab (mraab@co2crc.com.au)

Curtin University of Technology (CUT), Perth

Ansprechpartner: Prof. Boris Gurevich (B.Gurevich@curtin.edu.au)

Geoscience Australia (GA), Canberra

Ansprechpartner: Dr. Eric Tenthory (Eric.Tenthorey@ga.gov.au)

***Beteiligte Wissenschaftler\_innen***

Aruffo, Chiara (TUDA)

Beilecke, Dr. Thies (LIAG)

Bilke, Lars (UFZ)

Dance, Dr. Tess (CUT)

Görke, Dr. Uwe-Jens (UFZ)

Gurevich, Prof. Dr. Boris (CUT)

Henk, Prof. Dr. Andreas (TUDA)

Kolditz, Prof. Dr. Olaf (UFZ)

Krawczyk, Prof. Dr. Charlotte (LIAG, Koordination)

Lippmann, Andrea (TEEC)

Pevzner, Prof. Dr. Roman (CUT)

Raab, Dr. Matthias (CO2CRC)

Singh, Rajindar (CO2CRC)

Tanner, Dr. David (LIAG)

Tenthorey, Dr. Eric (GA)

Trappe, Dr. Henning (TEEC)

Weber, Bastian (TUDA)

Ziesch, Jennifer (LIAG)

## **1.2 Aufgabenstellung**

Unser wesentliches Ziel war es, einen seismo-mechanischen Workflow zu entwickeln, der das Potenzial der Kommunikation zwischen Reservoir und Oberfläche in Raum und Zeit vorhersagt (*Abb. 2*). Untersucht man die Deformation vor, während und nach einer CO<sub>2</sub>-Injektion, so kann damit eine Strategie für eine sensitive Überwachung und Risikoanalyse bereit gestellt werden.

Im Zielgebiet des australischen Demonstrationsprojektes im Otway Becken gibt es eine Antiklinalstruktur in einem salinen Aquifer. In ihrer Nachbarschaft werden Störungssysteme und variable Bruchsysteme sowie unterschiedliche gesteinsphysikalische Parameter beobachtet. Wegen der guten Übertragbarkeit dieser Situation auf Gegebenheiten in Deutschland und Europa haben wir dieses Gebiet gewählt, um auch trotz ungeklärter politischer und gesetzgebender Lage zu diesem Zeitpunkt in Deutschland die im Antrag ausgearbeitete wissenschaftliche Idee zu verfolgen.

Die wichtigen zu lösenden *wissenschaftlichen Fragen* sind:

- Gibt es Wegsamkeiten für CO<sub>2</sub> vom Reservoir durch seinen Überbau hindurch bis zur Oberfläche? Was sind deren strukturelle und physikalische Attribute?

- Wie ist im Detail der Charakter des Reservoirs und seines Überbaus? Ist es möglich, verlässliche Abschätzungen über die Kritikalität von Störungen und die Ausbreitung des Plumes zu geben?
- Können wir abschätzen, ob diese Strukturen abdichtend oder aktiv sind, und/oder ob sie reaktiviert werden können?

Die detaillierte Kenntnis solcher Systeme im Otway Becken existierte bisher so noch nicht, weder in der Auflösung noch in der methodischen Bandbreite, wie wir sie hier geplant hatten. Deshalb wurden innovative Experimente, Modelle und Simulationen als wissenschaftlich wichtig angesehen, und zwar für:

- das Verständnis des Reservoirs, seines Überbaus und der Oberflächenmorphologie sowie deren Entwicklung und ihrer Wechselwirkungen,
- die Entwicklung eines Workflows für zukünftige Standortvorerkundungen bezüglich verstärkten Schutzes und Instruktionen für die Speichersicherheit,
- die Entwicklung einer spezifischen Langzeitüberwachungsstrategie.

Unser integrierter methodischer Ansatz (*Abb. 2*) sollte dazu auch folgende *technische Ziele* umfassen:

- Anwendung fortschrittlicher hochauflösender Techniken für die sub-seismische Charakterisierung von Strukturen, physikalischen Eigenschaften und Deformation auf unterschiedlichen Skalen,
- Detektion und Vorhersage möglicher Wegsamkeiten im zeitabhängigen Modus,
- Kombination verschiedener geomechanischer Modellierungstechniken und seismischer Messungen zur Abdeckung von verschiedenen Wellenlängen der Deformation.

### 1.3 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

Zu Projektbeginn waren die Rahmenbedingungen für die geplanten Projektaktivitäten in Australien unklarer als ursprünglich beabsichtigt. Durch die kurzfristige Rücknahme der Projektförderung in 2011 und der damit bei den australischen Partnern erfolgten Absage musste nach Bewilligung die Festlegung von Kooperationsvereinbarungen und Zeitplänen neu aufgerollt werden. Dies hat keine Verschiebung der Arbeiten um eine Anzahl von Monaten zu Projektbeginn bewirkt, aber innerhalb einzelner Arbeitsschritte Verunsicherungen und Verzögerungen verursacht. Dies wurde durch die flexible Handhabung der Ausführung von Aufgaben aufgefangen.

#### 1.3.1 Bewilligung des Forschungsantrags

Mit Schreiben vom 11.08.2011 ergingen die Zuwendungsbescheide zum Forschungsantrag vom 04.10.2010 mit Beginn des Förderzeitraums zum 01.09.2011 und der Freigabe der beantragten Projektmittel für eine Laufzeit von 3 Jahren.

#### 1.3.2 Stellenbesetzungen

Unmittelbar nach Eingang der Bewilligungsschreiben wurden die Verfahren für Besetzungen der wissenschaftlichen Projektstellen eingeleitet. In *AP1* konnten mit Dr. Thies Beilecke und Jennifer Ziesch (Doktorandin) bereits zum 1.10.2011 beide Personalstellen besetzt und das Projekt begonnen werden, ebenso in *AP2*. Durch den Wechsel von Prof. Henk nach Darmstadt wurde die Mitarbeiterstelle in *AP3* erst zum 1.3.2012 mit Chiara Aruffo (Doktorandin) besetzt; zum 1.2.2013 nahm Bastian Weber seine Arbeit als Doktorand auf. In *AP4* wurde Dr. Ashok Singh ab dem 1.10.2012 finanziert.

### 1.3.3 Beantragung von Veränderungen im Finanzierungs- und Ablaufplan

**AP1:** Für das im LIAG angesiedelte Teilprojekt wurde eine Änderung im 2. Jahr des Arbeitsplans vorgenommen, die nur die Komponente der seismischen Feldarbeiten (Mitarbeiter Dr. Beilecke) betraf. Die ursprünglich für Anfang des Jahres vorgesehene Feldkampagne musste wegen Reparatur eines Schadens am Vibrator verschoben werden. In Absprache mit den australischen Partnern des CO2CRC-Konsortiums haben wir die Messungen auf November terminiert, was auch dem Wetterfenster vor Ort Rechnung trug. Inhaltlich bedeutete dies für das Projekt keinen Verlust, da im Rahmen der wissenschaftlichen Arbeiten die Prozessierung der P-Wellendaten vorgezogen und die Aufnahme der neuen S-Wellendaten verschoben wurden.

**AP2:** Keine.

**AP3:** Durch den Wechsel von Prof. Henk von der Uni Freiburg zur TU Darmstadt hat sich der Projektbeginn dieses APs um ein halbes Jahr auf den 01.03.2012 verschoben.

**AP4:** Wegen des Wechsels des Bearbeiters (von Dr. Görke zu Dr. Singh) wurde am 22.02.2012 eine Änderung des Arbeits- und Finanzplans beantragt und mit Schreiben vom 08.03.2012 vom Projektträger bewilligt. Diese Änderung erforderte keine Novellierung von Gesamtzielen und -kosten.

**Verbund:** Im Mai 2014 wurde eine mit allen Partnern abgestimmte kostenneutrale Verlängerung des Projektzeitraums über den 31.08.2014 hinaus bis zum 31.12.2014 beantragt und bewilligt.

## 1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Drei der vier Arbeitspakete beantragten und erhielten eine Zuwendung für Personalmittel kontinuierlich über die gesamte Projektzeit von drei Jahren, lediglich das später integrierte Arbeitspaket des UFZ war auf eine Förderung von 9 Personalmonaten ausgelegt, die durch den oben erläuterten Mitarbeiterwechsel auf 12 Monate erweitert werden konnte. Die generellen Anforderungen für alle Arbeitspakete sind hier in der Kurzdarstellung gegeben, die spezifischen Aufgaben, Meilensteine und Abbruchkriterien werden jeweils in der ausführlichen Darstellung der Arbeitspakete ausgeführt (Teil II, Kapitel 1).

Der Kooperationsvertrag der Verbundpartner wurde zum 15. Januar 2012 gemäß BMBF-Richtlinie abgeschlossen und unterzeichnet. Ein Memorandum of Understanding mit dem CO2CRC-Konsortium zum Datentransfer wurde durch das LIAG zusätzlich im Namen aller Beteiligten ebenfalls abgeschlossen. Das Auftakt-Treffen des Verbundes hat in Hannover am 20. Januar 2012 stattgefunden. Hierbei haben die Verbundpartner die einzelnen Arbeitspakete, deren inhaltliche Schnittstellen, die Aufteilung von Arbeiten und das weitere Vorgehen der nächsten Arbeiten im Verbund diskutiert.

### Meilensteine der gemeinsamen Arbeit

- A.** Erhalt seismischer Daten und Modelle von Curtin University/CO2CRC-Projekt.
- B.** Erste Deformationskarten, Stressmodelle, Attribute.
- C.** Integration der ersten Ergebnisse zur Bestimmung von neuen Messgebieten.
- D.** Feldarbeit zu Aufnahme neuer 2-D seismischer Daten.
- E.** Verbesserte Deformationskarten, Stressmodelle, Attribute.
- F.** Evaluation der zeitabhängigen Komponenten.
- G.** Integration der Ergebnisse.

	Jahr 1			Jahr 2			Jahr 3		
generelle / gemeinsame Arbeitsschritte	<b>A</b>		<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>		<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>

Ende 2011 fand die Wiederaufnahme der Kooperationsgespräche mit der Universität Perth und darüber mit dem CO2CRC-Konsortium statt, um die kurzfristige Absage der Projektfinanzierung von 2011 zurück zu nehmen. Der Datentransfer ging durch das Hin und Her mit der Bewilligung und der Rückgewinnung der vertrauensvollen Zusammenarbeit allerdings nur schleppend voran. Kooperationsgespräche und Telefonkonferenzen mit dem CO2CRC-Konsortium zu weiterem Datenaustausch und Einbeziehung weiterer australischer Partner, Treffen und Diskussion über geophysikalische Operationen und vor Ort anstehende Messungen sowie mit dem Management des CO2CRC fanden halbjährlich statt.

Für den Zusammenhalt des Verbundes war es wichtig, regelmäßige Projekttreffen aller beteiligten Partner durchzuführen. Nach dem KickOff in Hannover im Januar 2012 gab es folgende PROTECT-Treffen: am LIAG im November 2012, an der TU Darmstadt im Januar 2013, am UFZ in Leipzig im Juli 2013, in Isernhagen bei TEEC im Januar 2014 und schließlich am LIAG im Juni 2014.

Zwischen den Terminen lieferte die Internetpräsenz von PROTECT durch die Einrichtung eines projektinternen Download-Bereiches gute Austauschmöglichkeiten. Dieser wurde kontinuierlich durch die Koordination gepflegt. Recherche sowie Bereitstellung von Projektliteratur und Veröffentlichungen wurden dort gewährleistet.

Die GEOTECHNOLOGIEN-Statusseminare wurden in Deutschland von der gesamten PROTECT-Gruppe bereist. Zusätzlich nahmen die Koordinatorin und ein weiterer Teilnehmer an den jährlichen Symposien des CO2CRC in Australien teil. Die Mitarbeit im Projekt AUGER sowie die Mitgliedschaft in dessen Steuergruppe ermöglichten darüber hinaus einen Austausch mit Partnern anderer CO<sub>2</sub>-Projekte. In verschiedenen Diskussionrunden und mit gegenseitigen Besuchen wurde so zu einem Glossar beigetragen.

Als Highlights sind sicherlich folgende Unternehmungen zu nennen: seismische Messungen mit eigenem Equipment in Australien (LIAG, Okt./Nov. 2013), Forschungsaufenthalt in Australien zur geomechanischen Modellierung (C. Aruffo, Okt./Nov. 2013), der das CO2CRC-Symposium ergänzende, internationale PROTECT-Workshop in Hobart (2013) sowie die Ausrichtung des internationalen Benchmark-Workshops SSBench in Leipzig (11.-13. Nov. 2013).

## **1.5 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Zu Beginn des Projektes gab es folgende offene Fragestellungen, die hier in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Speicherung, auf das Untersuchungsgebiet sowie auf die methodischen Anforderungen für die einzelnen APs erläutert werden.

### **1.5.1 CO<sub>2</sub>-Speicherung in salinen Aquiferen**

Speichermechanismen in salinen Aquiferen und entleerten Gasfeldern hängen in den ersten Dekaden der CO<sub>2</sub>-Injektion zu einem großen Teil von der Geologie des Überbaus an einem Standort und den Reservoirgesteinen selber ab. Somit sind stratigraphische und strukturelle Fallenbildung die Hauptprozesse, die untersucht werden müssen. Es ist wichtig, alle Umstände zu kennen, die das Entweichen von CO<sub>2</sub> aus einem Reservoir erlauben würden. Dies kann entlang verschiedener Wegsamkeiten geschehen, die sowohl von natürlichen Prozessen als auch der Unterhaltung des Reservoirs und anderen Interaktionen abhängen. Leakage durch Störungen oder Brüche kann über einen weiten Bereich und Skalen streuen sowie durch steigenden Porenfluiddruck im Reservoir induziert oder geweitet werden (z.B. Grasso, 1992; Deflandre et al., 1995; Shapiro & Kaselow, 2005).

Um die Ausbreitung und Speicherung von CO<sub>2</sub> im Untergrund zu verfolgen sowie mögliche Leckagen und CO<sub>2</sub>-induzierte Alterationen zu detektieren, sind seismische Abbildungs- und Deformationsvorhersagetechniken essenziell (Krawczyk & Tanner, 2010). Sie haben zum Ziel, die mögliche CO<sub>2</sub>-Verteilung im tiefen Untergrund und die petrophysikalischen Randbedingungen, die die CO<sub>2</sub>-Ausbreitung bestimmen, zu identifizieren. Wenn eine Leckage auftritt, kann CO<sub>2</sub> aufwärts



migrieren und im Grundwasser nahe der Oberfläche gelöst werden. Eine geochemisch erhöhte Emission von CO<sub>2</sub> durch eine Abdichtung wurde von Gherardi et al. (2005) mit numerischen Simulationen untersucht. Shipton et al. (2004) haben gezeigt, dass die aktive Emission von CO<sub>2</sub> entlang von Störungen beobachtet werden kann. Auch haben wiederholte reflexionsseismische Messungen im Sleipner Feld bewiesen, dass die Barrieren dort nicht komplett dicht sind (Zweigel et al., 2004). Das Entweichen von CO<sub>2</sub> in oberflächennahes Grundwasser wurde für natürliches CO<sub>2</sub> und für Gasreservoir nachgewiesen (Lewicki et al., 2007; Allis et al., 2001; Schumacher & Abrams, 1996; Gurevich et al., 1993).

CO<sub>2</sub>-bezogenen Verbundprojekte werden in verschiedenen Gebieten der Welt und unter variablen geologischen Gegebenheiten durchgeführt. Sie werden weitgehend wissenschaftlich begleitet (siehe Zusammenstellung von *Highlights* in Lumley et al., 2010, und Referenzen darin) oder mit Handlungsempfehlungen versehen (siehe Chadwick et al., 2008). Unter diesen sind mit einem stark geophysikalisch/geomechanischem Hintergrund die Projekte CO<sub>2</sub>SINK in Deutschland (Martens et al., 2015), CASTOR in Österreich (Polak et al., 2006), In Salah in Algerien (Ringrose et al., 2009) und Sleipner in Norwegen (Orlic, 2009) zu nennen.

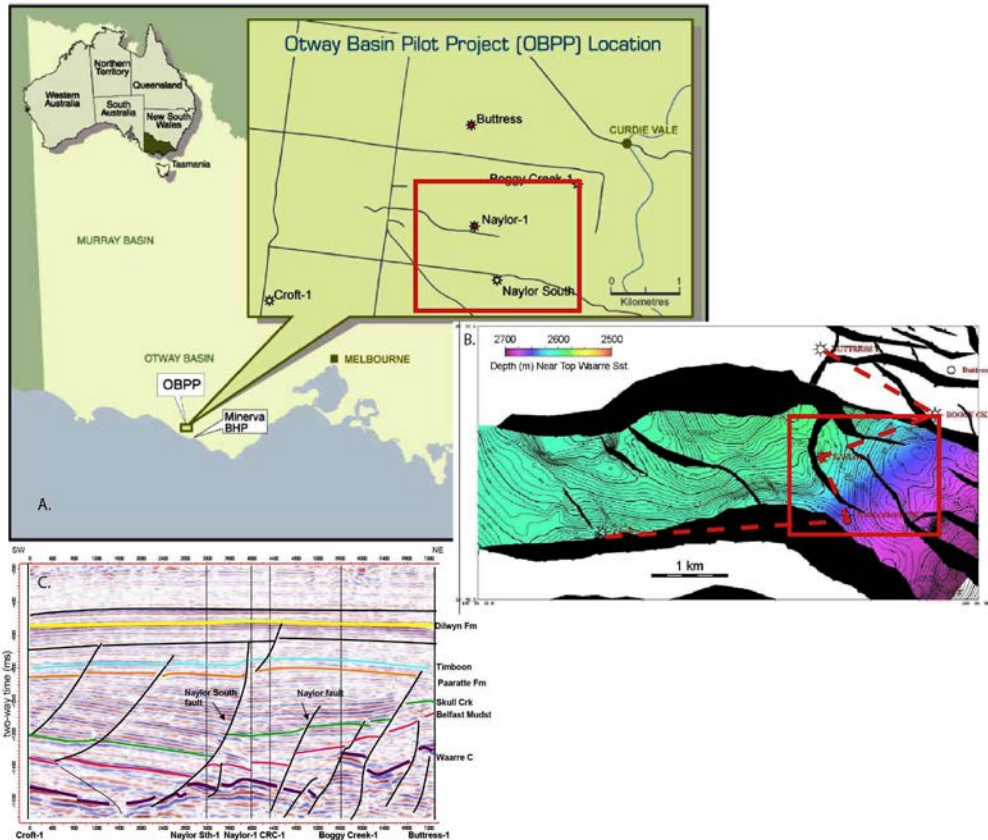
Aufgrund der oben genannten Befunde sahen wir die Notwendigkeit, einen neuen *Workflow* zu erarbeiten, der die seismo-mechanischen Eigenschaften eines Standortes verwendet und dabei verschiedene Ansätze von geophysikalischer, geologischer und numerischer Modellbildung umfasst, um das Leckagepotenzial zwischen Tiefe und Oberfläche vorherzusagen und zu validieren sowie die strukturellen und petrophysikalischen Randbedingungen der CO<sub>2</sub>-Ausbreitung zu bestimmen. Dadurch können die Signifikanz von aktiven Prozessen und das Potenzial der Reaktivierung oder Auslösung weiterer Ereignisse für ein Gebiet bestimmt werden.

### 1.5.2 Demonstrationsprojekt Otway Becken

Als erstes Demonstrationsprojekt zur tiefen geologischen Speicherung von CO<sub>2</sub> in Australien wurde ein CO<sub>2</sub>CRC-Projekt im landseitigen Otway Becken im Bundesland Victoria angelegt (*Abb. 3*). Während Phase I des Programms (2008-2010) wurden ca. 66000 t eines CO<sub>2</sub>-Methan-Gemisches in einem entleerten Gasfeld in eine Tiefe von 2025 m (Waarre C Formation) injiziert. Verschiedene geophysikalische Methoden wurden zur Reservoirerkundung angewendet (siehe Jenkins et al., 2011; Cook, 2014). Ein Teil eines umfangreichen Monitoringprogramms (Dodds et al., 2009) berücksichtigt zeitabhängige reflexionsseismische Messungen. Dabei haben Pevzner et al. (2010) den Einfluss von technischen und Oberflächenfaktoren auf die Wiederholbarkeit untersucht, während Urosevic et al. (2010) feststellten, dass eine hohe räumliche Überdeckung essenziell ist. Trotzdem fehlten immer noch ein genereller Ansatz für das Monitoring eines salinen Aquifers an Land sowie die Kombination von Bohrloch- und Oberflächenbeobachtungen mit Vorhersagen der Deformation.

Eine geomechanische Abschätzung des Naylor Felds wurde durch CO<sub>2</sub>CRC unternommen, um die möglichen geomechanischen Effekte der CO<sub>2</sub>-Injektion und -speicherung zu untersuchen. Um eine kritische Reaktivierung von Störungen zu erreichen, müssen die Änderungen im Stressfeld beträchtlich variieren: während 28 MPa durch *leak-off tests* definiert wurden (Van Ruth et al., 2007), wurden 15 MPa mit analytischen geomechanischen Lösungen abgeleitet (Vidal-Gilbert et al., 2010). Da der Stressverlauf im Reservoir einer der Schlüsselpunkte für jede Analyse der Störungsstabilität ist, aber gleichzeitig auch die Hauptquelle für Unsicherheiten darstellt, ist die Notwendigkeit von Forschung zum Verständnis der Störungs kinematik immer noch sehr hoch (Rogers et al., 2008).

Dies ist eine der generellen Wissenslücken, die wir mit unserem Projekt füllen wollten, da Erfahrungen mit dem seismo-mechanischen Verhalten von Reservoiren unter Anwendung von kombinierter inverser kinematischer Deformationsmodellierung und numerischer Vorwärts-simulation mit *in-situ* Beobachtungen selten sind (Raistrick, 2008). Das betrifft speziell die Detektion möglicher Aufstiegswege zur Oberfläche. Dieser letzte Punkt wird noch einmal hervorgehoben, da zu Beginn des Projekts angenommen wurde, dass die Hauptstörung nahe der Injektionslokation im Otway Becken bereits kritisch ist (Vidal-Gilbert et al., 2010).



**Abbildung 3:** Übersichtskarte des Otway Beckens, Australien (A) mit Lage des Naylor Felds (B). Die Tiefe zum Waarre C Sandstein-Reservoir ist farbcodiert, der Versatz der Hauptstörungen schwarz (van Ruth & Rogers, 2006). Die zeitmigrierte Reflexionsseismik (C) zeigt Störungen und Versatz der Horizonte (nach Vidal-Gilbert et al., 2010). Rote Kästchen in A und B: Arbeitsgebiet; gestrichelte Linie in B: Lage der zusammengesetzten Sektion in C, wo zusätzlich Bohrungen angegeben sind.

### 1.5.3 AP1: Sub-/seismische Deformationsvorhersage und seismische Validierung

Wenn sich eine Störung bewegt, wird Deformation im umgebenden Bereich induziert. Typischerweise wird die groß-skalige Untergrunddeformation in seismischen Daten identifiziert, klein-skalige Brüche sind in Bohrdaten sichtbar. Störungen im mittleren, sub-seismischen Bereich spielen aber eine wichtige Rolle, da dort ein großer Anteil von bis zu 50% der Verformung unterhalb der seismischen Auflösung wirkt und heterogen verteilt ist. Zwischen seismischer und Bohrlochskala fehlt somit das Verständnis davon, wie Deformation im sub-seismischen Bereich skaliert (Yielding et al., 1992). Im Rahmen umfangreicher Arbeiten im Norddeutschen Becken begann die Bestimmung von Menge und Verteilung sub-seismischer Deformation (Krawczyk et al., 2006; Lohr et al., 2008).

Die Stärke der kinematischen Modellierung ist, dass sie 3-D Störungs- und Schichtgeometrien, Störungsversatz im Streichen und Kinematik berücksichtigen kann, um Magnitude, Verteilung und Orientierung der Verformung vorher zu sagen. Finite Elemente (FE) Techniken, so wie in AP3 vorgeschlagen, verwenden einen Vorwärtsansatz bei der Modellierung, der heterogene Materialeigenschaften und Verformungsraten berücksichtigt, um Stressmagnitude und -orientierung abzuleiten. So ergänzen sich die beiden Methoden positiv.

Die Auflösung der Retrodeformation, und damit die Strainbestimmung, ist von der seismischen Datenbasis abhängig. Deshalb sollten 3-D seismische Daten mit 2-D Profilen, P- oder S-Wellen, ergänzt werden, um die Details in den Gebieten besonderen Interesses besser aufzulösen. Scherwellenseismik ist besonders gut für die Abbildung oberflächennaher Strukturen geeignet (z.B.

Polom et al., 2010), wird aber trotzdem noch selten in kommerzieller Anwendung benutzt. Hier kann ein wichtiger Schritt auch dadurch erzielt werden, dass elastische Information aus vorhandenen VSP-Daten für den seismischen und geomechanischen Modellbau extrahiert wird (Beilecke et al., 2010).

#### **1.5.4 AP2: Räumliche Kartierung von Brüchen und Störungen mit Kohärenzanalyse**

Sedimentablagerungen entwickeln sich unter einer Vielfalt räumlicher und zeitlicher Prozesse, was zu komplexen Mustern bezüglich ihrer Struktur und Deformation führt. Diese Merkmale variieren sowohl in der Magnitude als auch der Verformungsaufnahme in Raum und Zeit. Da diese Strukturen eine beträchtliche laterale Kontinuität haben und darüber hinaus als Leiter für Fluid- und Gasfluss agieren können, sind sie von großer Bedeutung für das Verständnis eines Reservoirs.

Eine detaillierte hochauflösende Kohärenzanalyse benötigt auch optimiertes Prozessing. Dabei legen unterschiedliche Kohärenzmethoden für seismische Daten auch unterschiedliche Gewichtungen auf die Aspekte Auflösung und Rauschunterdrückung. Insgesamt stehen etwa 20 verschiedene Volumenattribute zur Verfügung (Lohr et al., 2008; Endres et al., 2008). Mit der ausgewählten Methode wird die Kohärenz für jedes Sample in seiner 2-D oder 3-D Nachbarschaft betrachtet. Sowohl die Art der Messung als auch die Anwendung in einer Nachbarschaft in lokationsabhängiger oder -unabhängiger Art sowie die Größe und Form der Nachbarschaft erlauben die optimale Abwägung zwischen hoher Auflösung und Rauschunterdrückung bei der Kohärenzanalyse. Direkte Evidenz für sub-seismische Deformation kann aus Bohrlochdaten gewonnen werden, meistens über FMI-Logs. Insbesondere hat sich gezeigt, dass klein-skalige Brüche in FMI-Logs und solche, die aus der Seismik interpretiert oder aus geologischer Feldarbeit abgeleitet wurden, einer fraktalen Verteilung hinsichtlich Bruchlänge, -dichte und -verteilung folgen (Endres et al., 2008).

Neue Kartierungswerkzeuge sollten in diesem Projekt entwickelt werden, um die räumliche Verteilung von Störungsrichtung und -curvature abzuschätzen (vgl. Roberts, 2001). Diese Attribute stehen in engem Bezug zu Stress- und Deformationsfeldern, die während der Entwicklung eines Gebietes aktiv waren. Die Interpretation zeitabhängiger Störungssignaturen würde erlauben, Änderungen im Stressfeld und die Migration der CO<sub>2</sub>-Front zu interpretieren.

#### **1.5.5 AP3: Stress- und Deformationsvorhersage mit geomechanischer Vorwärtsmodellierung**

Tektonischer Stress spielt eine wichtige Rolle für eine optimale Exploration, Nutzung und Langzeitsicherheit von CO<sub>2</sub>-Speichern. Die Magnitude und Orientierung des rezenten tektonischen Stresses resultiert nicht nur in einer stress-abhängigen Anisotropie der Permeabilität, sondern sie kontrolliert auch die Stabilität von Störungen. Eine realistische Vorhersage von lokalen Stress- und Bruchmustern an einem potenziellen CO<sub>2</sub>-Speicherstandort mit Daten auf der regionalen Skala wird dadurch behindert, dass Inhomogenitäten wie Störungen oder laterale und vertikale Lithologiewechsel zu lokalen Perturbationen des Stressfelds führen können (Yale, 2003). Deshalb muss jede verlässliche Prognose von tektonischem Stress und Bruchnetzwerken den standortspezifischen Eigenschaften Rechnung tragen. 3-D geomechanische Modelle für Stress- und Bruchvorhersage gibt es nur wenige (Bourne et al., 2001; van Wees et al., 2005).

Geomechanische Studien im Otway CO<sub>2</sub>CRC-Projekt (van Ruth et al., 2007; Vidal-Gilbert et al., 2010) konzentrieren sich auf die Bestimmung des tektonischen Stressfelds aus Bohrungsdaten. Dieses Stressfeld wird dann für die gesamte Struktur übernommen. Perturbationen in der Magnitude und Orientierung des Stressfelds, die normalerweise nahe der Störungen oder innerhalb von Störungsblöcken auftreten, sowie laterale Variationen der mechanischen Parameter im Reservoir und Überbau werden nicht berücksichtigt.

Dies ist der Ansatzpunkt für AP3, das den Aufbau eines 3-D geomechanischem Modells erreichen möchte, welches die volle Komplexität der Reservoirgeometrie sowie vertikale und laterale Variationen in den mechanischen Gesteinseigenschaften beinhalten soll.

### 1.5.6 AP4: Visualisierung und Benchmarking von CO<sub>2</sub>-Speicherprozessen

Wissenschaftliche Benchmarking-Projekte gewinnen international immer mehr an Bedeutung. Dabei geht es in erster Linie darum, die Verlässlichkeit (Genauigkeit, Robustheit) numerischer Simulatoren für komplexe Problemstellungen und zunehmend komplexe Prozesse (THMC) zu testen. Aus diesem Grund müssen auch adäquate Methoden zur Qualitätskontrolle entwickelt werden, da Standardverfahren oftmals versagen (z.B. Ennis-King & Paterson, 2005; Pruess et al. 2004).

Eine der wegweisenden Benchmarking-Initiativen ist das DECOVALEX-Vorhaben, das sich derzeit in der fünften Phase befindet (Birkholzer et al., 2008; Wang et al., 2011). Gegenstand der Benchmark-Tests ist dort die Modellierung thermo-hydro-mechanischer (THM) und thermo-hydro-chemischer (THC) Prozesse. In DECOVALEX werden Aufgaben definiert, die von mehreren Gruppen analysiert und verglichen werden. Durch diese Vorgehensweisen wurden nicht nur Implementierungsfehler in den Codes sondern auch Schwächen in konzeptionellen Modellen aufgedeckt.

Im Rahmen der vorangegangenen Förderphase des GEOTECHNOLOGIEN-Programms des BMBF wurde über die verschiedenen Verbundvorhaben eine CO<sub>2</sub>-Modellierer-Initiative gegründet (Class et al., 2009). Motiviert war die projektübergreifende Initiative durch die Übertragbarkeit der Werkzeuge auf verschiedene Fragestellungen und Standorte (z.B. Gaslagerstätten und tiefe saline Aquifere). Dies hat einen wertvollen Beitrag zu den bisherigen CO<sub>2</sub>-Vorhaben und zur Zusammenarbeit zwischen diesen geleistet (Görke et al., 2011). Basierend auf wichtigen Vorarbeiten zur Verstetigung von Benchmark-Konzepten (Kolditz et al., 2012a; 2012b) ist die Weiterführung entsprechender Untersuchungen ebenso wie die Visualisierung auch Bestandteil dieses Vorhabens.

## 1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Layout unserer Aktivitäten ist ausgeglichen und gut mit Untersuchungen und Ergebnissen aus anderen CO<sub>2</sub>-relevanten Projekten abgestimmt, die bereits in anderen inter-/nationalen Programmen gefördert werden und in manchen von denen wir aktiv sind. Besonders relevant sind CO<sub>2</sub>SINK, CO<sub>2</sub>ReMoVe und COSMOS, die den salinen Aquifer in Ketzin behandeln, CLEAN bezüglich enhanced gas recovery, COMICOR für analoge Stressstudien (Kasch et al., 2010) und CO<sub>2</sub>MoPa als numerisch getriebenes Projekt. Zuvorderst standen das CO<sub>2</sub>CRC-Konsortium und die Curtin University mit ihren laufenden Arbeiten am Demonstrationsprojekt Otway Becken als engste Partner während unseres Projekts. Nach einem wissenschaftlichen Treffen in Perth (Sept. 2010) war eine Präsentation bei der CO<sub>2</sub>CRC-Konferenz in Melbourne (Dez. 2010) zur Intensivierung der weiteren Diskussion eingeladen worden (Krawczyk et al., 2010) und führte schließlich zur in diesem Projekt ausgeführten Zusammenarbeit.

Im Laufe des Projekts wurden außerdem folgende *neue Kontakte* für eine vertiefte wissenschaftliche Diskussion aufgenommen:

University of Canterbury, Canterbury/NZ (Prof. A. Nicol; Störungsdynamik),

Schlumberger Geomechanics Centre, Bracknell/UK (Dr. N. Koutsabeloulis, Dr. J. Herwanger; numerische Modellierung).

## 1.7 Referenzen

- Allis, R., Chidsey, T., Gwynn, W., Morgan, C., White, S., Adams, M. & Moore, J., 2001. Natural CO<sub>2</sub> reservoirs on the Colorado Plateau and southern Rocky Mountains: Candidates for CO<sub>2</sub> sequestration. First National Conference on Carbon Sequestration, Washington/DC.
- Beilecke, T., Bram, K. & Buske, S., 2010. Pressure-dependent seismic reflection amplitude changes in crystalline crust – lessons learned at the Continental Deep Drilling Site (KTB). GJI, 180 (1), 311-326.

- Birkholzer, J.T., Zhou, Q. & Tsang, C.-F., 2008. Large-scale impact of CO<sub>2</sub> storage in deep saline aquifers: A sensitivity study on pressure response in stratified systems. *Int. J. of Greenhouse Gas Control*, 3 (2), 181-194.
- Bourne, S.J., Rijkels, L., Stephenson, B.J., Weber, A. & Willemse, E.J.M., 2000. Predictive modelling of naturally fractured reservoirs using geomechanics and flow simulation. *GeoArabia*, 6 (1), 87-102.
- Chadwick, A., R. Arts, C. Bernstone, F. May, S. Thibeau & P. Zweigel. (Eds.), 2008. Best Practice for the storage of CO<sub>2</sub> in saline aquifers. British Geological Survey, Keyworth/Nottingham, 267 pp.
- Class, H. & 20 others, 2009. A benchmark study on problems related to CO<sub>2</sub> storage in geologic formations. *Computational Geosciences*, 13 (4), 409-434.
- Cook, P.J., 2014. *Geologically Storing Carbon: Learning from the Otway Project Experience*. CSIRO Publishing, Melbourne, 384 pp.
- Deflandre, J.P., Laurent, J., Michon, D. & Blondin, E., 1995. Microseismic surveying and repeated VSPs for monitoring an underground gas storage reservoir. *First Break*, 13, 129-138.
- Dodds K., Dailey, T., Freifeld, B., Urosevic, M., Kepic, A. & Sharma, S., 2009. Developing a monitoring and verification plan with reference to the Australian Otway CO<sub>2</sub> pilot project. *TLE*, 28 (7), 812-818.
- Endres, H., Lohr, T., Trappe, H., Samiee, R., Thierer, P.O., Krawczyk, C.M., Tanner, D.C., Oncken, O. & Kukla, P.A., 2008. Quantitative Fracture Prediction from Seismic Data. *Petrol. Geoscience*, 14, 369-377.
- Ennis-King J. & Paterson L., 2005. Role of convective mixing in the long-term storage of carbon dioxide in deep saline formations. *SPE*, 10, 349-356.
- Gherardi, F., Xu, T. & Pruess, K., 2005. Coupled hydrodynamic-geochemical modelling of CO<sub>2</sub> driven water-rock interactions into sealed and fractured caprock formations. *Geoitalia 2005*, Spoleto/Italy.
- Görke, U.-J., Park, C.-H., Wang, W., Singh, A.K. & Kolditz, O., 2011. Numerical simulation of multiphase hydrome-chemical processes induced by CO<sub>2</sub> injection in deep saline aquifers. *Oil and Gas Science and Technology*, 66 (1), 105-118; doi: 10.2516/ogst/2010032.
- Grasso, J.R., 1992. Mechanics of seismic instabilities induced by the recovery of hydrocarbons. *PAGEOPH*, 139 (3-4), 507-534.
- Gurevich, A.E., Endres, B.L., Robertson, J.O.J. & Chilingara, G.V., 1993. Gas migration from oil and gas fields and associated hazards. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 9 (3), 223-238.
- Hudson, J.A. & Jing, L., 2013. Demonstration of coupled models and their validation against experiment: The current phase DECOVALEX 2015. *Proceedings of the 3rd ISRM SINOROCK Symposium*, CRC Press, p. 391-396; doi: 10.1201/b14917-70.
- Jenkins, C.R., Cook, P.J. & 15 others, 2011. Safe storage and effective monitoring of CO<sub>2</sub> in depleted gas fields. *Proceedings National Academy of Sciences*, 109 (2), E35-E41.
- Kolditz, O., Bauer, S., Beyer, C., Böttcher, N., Dietrich, P., Görke, U.-J., Kalbacher, T., Park, C.-H., Sauer, U., Schütze, C., Shao, H., Singh, A., Taron, J., Wang, W. & Watanabe, N., 2012a. A systematic benchmarking approach for geologic CO<sub>2</sub> injection and storage. *Environmental Earth Sciences*, 67 (2), 613-632; doi: 10.1007/s12665-012-1656-5.
- Kolditz, O., Görke, U.-J., Shao, H. & Wang, W. (Eds.), 2012b. *Thermo-hydro-mechanical-chemical processes in fractured-porous media: Benchmarks and examples*. Springer Lecture Notes in Computational Science and Engineering, 86; doi: 10.1007/978-3-319-11894-9\_1.
- Krawczyk, C.M., Tanner, D.C., Urosevic, M., Henk, A. & Trappe, H., 2010. Development of a new seismo-mechanical workflow for sub-/seismic prediction and verification of communication between reservoir and surface. CO<sub>2</sub>CRC conference, Dec. 2010, Melbourne, invited.
- Krawczyk, C.M. & Tanner, D.C., 2010. Subseismic Deformation Analysis - A prediction tool for a safe CO<sub>2</sub>-reservoir management. Second EAGE CO<sub>2</sub> Geological Storage Workshop, Berlin, Germany. <http://www.earthdoc.org/detail.php?pubid=38428>.
- Krawczyk, C.M., T. Lohr, D.C. Tanner, H. Endres, R. Samiee, H. Trappe, O. Oncken & P. Kukla, 2006. Structural architecture and deformation styles derived from 3-D reflection seismic data in the north German basin. EAGE Conference Vienna, Austria, Ext. Abstracts, P104, 1-5. EAGE.

- Krawczyk, C.M., Tanner, D.C., Henk, A., Ziesch, J., Beilecke, T., Aruffo, C.M., Weber, B., Lippmann, A., Görke, U.-J., Bilke, L., Trappe, H. & Kolditz, O., 2015. Seismic and sub-seismic deformation prediction in the context of geological carbon trapping and storage. *Advanced Technologies in Earth Sciences*, Springer, pp. 97-113; doi: 10.1007/978-3-319-13930-2\_5.
- Lewicki, J.L., Birkholzer, J. & Tsang, C.F., 2007. Natural and industrial analogues for leakage of CO<sub>2</sub> from storage reservoirs: identification of features, events, and processes and lessons learned. *Environmental Geology*, 52 (3), 457-467.
- Lohr, T., Krawczyk, C.M., Tanner, D.C., Samiee, R., Endres, H., Thierer, P.O., Oncken, O., Trappe, H., Bachmann, R. & Kukla, P.A., 2008. Prediction of subseismic faults and fractures: Integration of three-dimensional seismic data, three-dimensional retrodeformation, and well data on an example of deformation around an inverted fault. *AAPG Bulletin*, 92 (4), 473-485.
- Lumley, D., Sherlock, D., Daley, T., Huang, L., Lawton, D., Masters, R., Verliac, M. & White, D., 2010. Highlights of the 2009 SEG Summer Research Workshop on "CO<sub>2</sub> Sequestration Geophysics". The Leading Edge, <http://escholarship.org/uc/item/5956t8x0>.
- Martens, S. & 15 others, 2015. Joint Research Project CO<sub>2</sub>MAN (CO<sub>2</sub>MAN Reservoir Management): Continuation of Research and Development Work for CO<sub>2</sub> Storage at the Ketzin Pilot Site. *Advanced Technologies in Earth Sciences*, Springer, pp. 1-32; doi: 10.1007/978-3-319-13930-2\_1.
- Mukhopadhyay, S., Doughty, C., Bacon, D., Li, J., Wei, L., Yamamoto, H., Gasda, S., Hosseini, S.A., Nicot, J.-P. & Birkholzer, J.T., 2015. The Sim-SEQ Project: Comparison of Selected Flow Models for the S-3 Site. *Transport in Porous Media*, 108 (1), 207-231, doi: 10.1007/s11242-014-0361-0.
- Orlic, B., 2009. Assessing the Mechanical Impact of CO<sub>2</sub> Injection on Faults and Seals. 2nd International Conference on Fault and Top Seals – From Pore to Basin Scale Montpellier, EAGE.
- Pevzner, R., Shulakova, V., Kepic, A. & Urosevic, M., 2010. Repeatability analysis of land time-lapse seismic data: CO<sub>2</sub>CRC Otway pilot project case study. *Geophys. Prospecting*, 59 (1), 66-77.
- Polak, S.M. & 13 others, 2006. The Atzbach-Schwanenstadt gas field: A potential site for onshore CO<sub>2</sub> storage and EGR. *TLE*, 25, 1270-1275; <http://dx.doi.org/10.1190/1.2360619>.
- Polom, U., Hansen, L., Sauvin, G., L'Heureux, J.-S., Lecomte, I., Krawczyk, C.M., Vanneste, M. & Longva, O., 2010. High-resolution SH-wave seismic reflection for characterization of onshore ground conditions in the Trondheim harbor, central Norway. *Advances in Near-Surface Seismology and Ground-Penetrating Radar*, SEG, p. 75-92.
- Pruess, K., García, J., Kavscek, T., Oldenburg, C., Rutqvist, J., Steefel, C. & Xu, T., 2004. Code inter-comparison builds confidence in numerical simulation models for geologic disposal of CO<sub>2</sub>. *Energy*, 29, 1431-1444.
- Raistrick, M., 2008. Carbon capture and storage projects to challenge governments, scientists and engineers. *First Break*, 26 (1), 35-36.
- Ringrose, P., Atbi, M., Mason, D., Espinassous, M., Myhrer, O., Iging, M., Mathieson, A. & Wright, I., 2009. Plume development around well KB-502 at the In Salah CO<sub>2</sub> storage site. *First Break*, 27, 85-89.
- Roberts, A., 2001. Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizon. *First Break*, 19 (2), 85-100.
- Rogers, C., van Ruth, P. & Hillis, R., 2008. Fault reactivation in the Port Campbell Embayment with respect to carbon dioxide sequestration, Otway Basin, Australia. *Geol. Soc. London*, 306, 201-204.
- Schumacher, D. & Abrams, M.A., 1996. Hydrocarbon migration and its near-surface expression. *AAPG Memoir*, 66, 446 pp.
- Shapiro, S.A. & Kaselow, A., 2005. Porosity and elastic anisotropy of rocks under tectonic stress and pore-pressure changes. *Geophysics*, 70, N27-N38.
- Shipton, Z.K., Evans, J.P., Kirschner, D., Kolesar, P.T., Williams, A.P. & Heath, J., 2004. Analysis of CO<sub>2</sub> leakage through 'low-permeability' faults from natural reservoirs in the Colorado Plateau, east-central Utah. *Geol. Soc. London Spec Publ.*, 233, 43-58.
- Urosevic, M., Pevzner, R., Kepic, A., Wisman, P., Shulakova, V. & Sharma, S., 2010. Time-lapse seismic monitoring of CO<sub>2</sub> injection into a depleted gas reservoir - Naylor Field, Australia. *TLE*, 29, 164-169.

- Van Ruth, P. & Rogers, C., 2006. Geomechanical analysis of the Naylor structure, Otway Basin, Australia. Unpublished CO2CR Report No. RPT06-0039.
- Van Ruth, P., Tenthorey, E. & Vidal-Gilbert, S., 2007. Geomechanical analysis of the Naylor Structure, Otway basin, Australia. Unpublished CO2CR Report No. RPT07-0966.
- van Wees, J.D., Orlic, B., van Eijs, R., Zijl, W., Jongerius, P., Schreppers, G.J., Hendriks, M. & Cornu, T., 2003. Integrated 3D geomechanical modelling for deep subsurface deformation: a case study of tectonic and human-induced deformation in the eastern Netherlands. Geological Society of London Special Publication, 212, 313-328.
- Vidal-Gilbert, S., Nauroy, J.F. & Brosse, E., 2009. 3D geomechanical modeling for CO<sub>2</sub> geologic storage in the Dogger carbonates of the Paris Basin. *Int. J. of Greenhouse Gas Control*, 3 (3), 288-299.
- Vidal-Gilbert, S., Tenthorey, E., Dewhurst, D., Ennis-King, J., van Ruth, P. & Hillis, R. 2010. Geomechanical analysis of the Naylor Field, Otway Basin, Australia: Implications for CO<sub>2</sub> injection and storage. *Int. J. of Greenhouse Gas Control*, 4 (5), 827-839.
- Wang, W., Rutqvist, J., Görke, U.-J., Birkholzer, J.T. & Kolditz, O., 2011. Non-isothermal flow in low permeable porous media: A comparison of Richard's and two-phase flow approaches. *Environmental Earth Sciences*, 62 (6), 1197-1207; doi: 10.1007/s12665-010-0608-1.
- Yale, D.P., 2003. Fault and stress magnitude controls on variations in the orientation of in situ stress. Geological Society of London Special Publication, 209, 55-64.
- Yielding, G., Walsh, J. & Watterson, J., 1992. The prediction of small-scale faulting in reservoirs. *First Break*, 10, 449-460.

## TEIL II EINGEHENDE DARSTELLUNG

### 1 Durchgeführte Arbeiten und wesentliche Ergebnisse

Nachfolgend werden die erzielten Ergebnisse der vier Arbeitspakete (AP) dargestellt. Da jedes AP von jeweils einer Einrichtung ausgeführt wurde, sind Zusammenarbeiten mit anderen Stellen rein extern; die inhaltliche Kooperation innerhalb des Verbundes wird zu Ende jeden Teilkapitels erläutert. Der Übersichtlichkeit halber verweisen unsere Referenzen hier nur auf die begutachteten Publikationen (siehe Kapitel 6.1.1 und Kapitel 6.2.1), da die meisten Tagungsbeiträge darin aufgegangen sind und als Qualitätskontrolle vor der Publikation dienten.

#### 1.1 Sub-/seismische Deformation und seismische Validierung (Arbeitspaket 1)

*Einrichtung:* LIAG, Hannover (FKZ 03G0797A)

*Projektleitung:* Prof. Dr. Charlotte Krawczyk, Dr. David Tanner

*Beteiligte Wissenschaftler\_innen:* Dr. Thies Beilecke, Jennifer Ziesch

*Zusammenarbeit mit anderen Stellen:*

- Wissenschaftlich-technische Kooperation mit Curtin University Perth/Australien (A. Kepic, R. Pevzner) zu seismischen Feldmessungen und Auswertung
- Wissenschaftlicher Austausch mit GNS Science/Neuseeland (M. Lawrence) und mit U Adelaide/Australien (A. Bailey) zur FMI-Auswertung
- Wissenschaftlicher Austausch mit Lawrence Berkeley National Laboratory/USA (B. Freifeld) zu Bohrlochmessungen und Tracertests
- Wissenschaftlicher Austausch mit FU Berlin/D (S. Cionoiu) zu Codevergleich für Retrodeformation
- Technische Kooperation mit LBEG/D (H. Bombien und Kollegen) für Erstellung des 3-D pdf-files

##### 1.1.1 Aufgabenstellung

Der erste Teil von AP1 zielte darauf ab, die Zeitlichkeit inkrementeller, geologischer Bewegung im Untersuchungsgebiet zu rekonstruieren und die räumliche Verteilung sub-/seismischer Verformung aufgrund von Störungsbewegung vorher zu sagen sowie ihren Betrag zu quantifizieren und zu validieren. Das Ziel war es, Störungen im Untergrund im Bereich des Reservoirs zurück zu deformieren, um die akkumulierte sub-/seismische Deformation nahe dieser Strukturen zu bestimmen, sodaß Verformungskarten mögliche Wegsamkeiten für Fluid- oder Gasmigration aufzeigen können.

Um zu zeigen, ob und wie das Verformungsfeld in das Arbeitsgebiet hinein reicht, sollte zunächst eine Retrodeformation durchgeführt werden. In kritischen Bereichen, wo wir Deformation vorher gesagt haben, war anschließend im zweiten Teil von AP1 eine neue 2-D Seismik mit S-Wellen aufzunehmen, um hochauflösende Bilder zu gewinnen, die diese Ergebnisse verifizieren und kalibrieren. Gekoppelt mit seismischer Auswertung von P- und S-Wellen-Daten sowie deren Modellierung sollte sich damit eine strukturelle und physikalische Ansprache des Untergrunds, möglicher Fluidmigrationswege sowie der Kommunikation zwischen Reservoir und Oberfläche in der Region ergeben. Dies sollte insgesamt ein Werkzeug zur Vorhersage und für angepasste Überwachungsstrategien im Allgemeinen bereit stellen.

##### 1.1.2 Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

In diesem Arbeitspaket wurden zwei Hauptzielsetzungen verfolgt und dazu zwei Projektbeschäftigte eingestellt. Deren Arbeiten werden deshalb nachfolgend in zwei Unterkapitel gegliedert und erläutert.



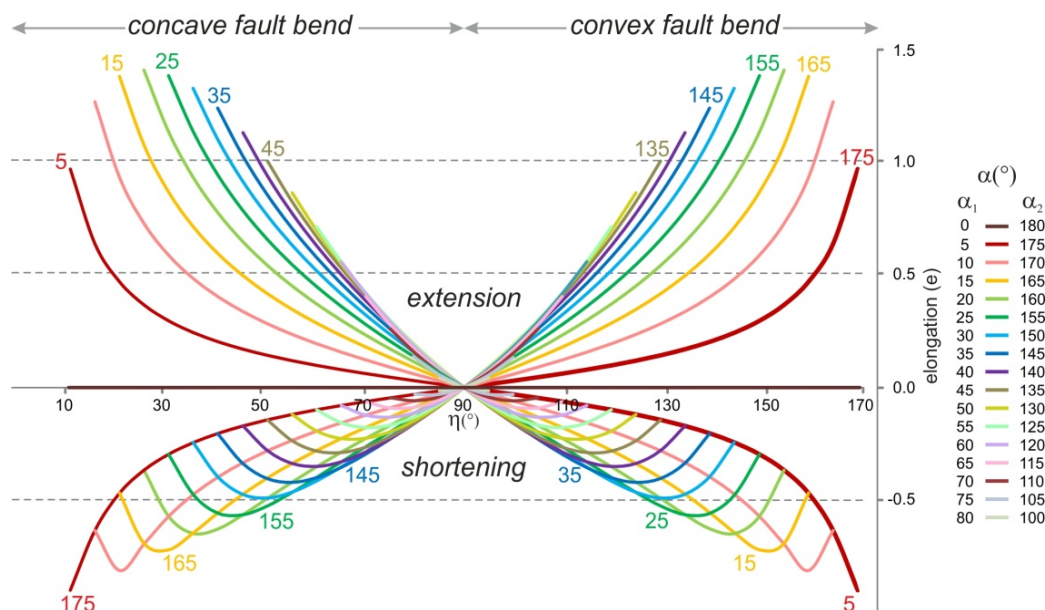
## 1.1.2a Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse ‚Störungsanalyse und Retrodeformation‘

### Fault-Parallel Flow Algorithmus

Zu Projektbeginn wurden methodische Grundarbeiten in Vorbereitung für die Retrodeformationsanalyse durchgeführt. Der *Fault-Parallel Flow* Algorithmus (FPF) ist einer von nur vier vorhandenen 3-D Algorithmen, der für die kinematische Restauration verwendet werden kann. Der FPF wurde ursprünglich in Kooperation der Firma Midland Valley mit der Universität Keele entwickelt, jedoch existierte keine Dokumentation über die Grenzen der Anwendbarkeit des FPF für die Modellierung. Im Rahmen des PROTECT Projektes wurde die vollständige mathematische Beschreibung für 1- und 2-D Objekte hergeleitet (Ziesch et al., 2014). Außerdem erfolgte die Berechnung der Elongation und Verformung (strain) für alle Störungswinkel (0 bis 90 Grad). Zur Überprüfung der Ergebnisse wurde ein vereinfachtes 2-D Modell mit sieben unterschiedlichen Störungswinkeln in der Software 2D Move (Midland Valley) zum einen als Kompressionsstruktur (Aufschiebung) und zum anderen als Extensionsstruktur (Abschiebung) unter Anwendung des FPF deformiert. Dies hat die Anwendbarkeit des Codes für unsere Projektarbeiten sicher gestellt.

### Ergebnisse

Bei dem FPF Algorithmus wird angenommen, dass sich Objekte im Hangenden einer Störung entlang von virtuellen Fließwegen parallel zur Störungsfläche bewegen. Geht man von einer einfachen Linie aus, so wird sie, abhängig vom Ausgangszustand, während der Bewegung durch die Änderung des Störungswinkels (*fault bend*) entweder verkürzt oder verlängert. Die Dehnung/Verkürzung der Linie ist, abhängig vom Knickwinkel (*fault bend angle*), sehr unterschiedlich (*Abb. 1.1.1*). Aufschiebungen haben einen charakteristischen Störungswinkel zwischen 20° und 40° und produzieren unter Anwendung des FPF geringe Werte für die Elongation (Ziesch et al., 2014). Die Modellierung von Abschiebungen, die typischerweise steiler und mit 60-80° einfallen, ergab hohe, unnatürliche Dehnung. Die berechnete Verformungsellipse ist direkt proportional zum Störungsknickwinkel. Das Hauptergebnis ist, dass der FPF primär nur für flache Kompressionsstrukturen angewendet werden sollte. Der maximale Störungswinkel für die kinematische Restauration unter Anwendung des FPF darf demnach nicht größer als 40° sein (Ziesch et al., 2014).

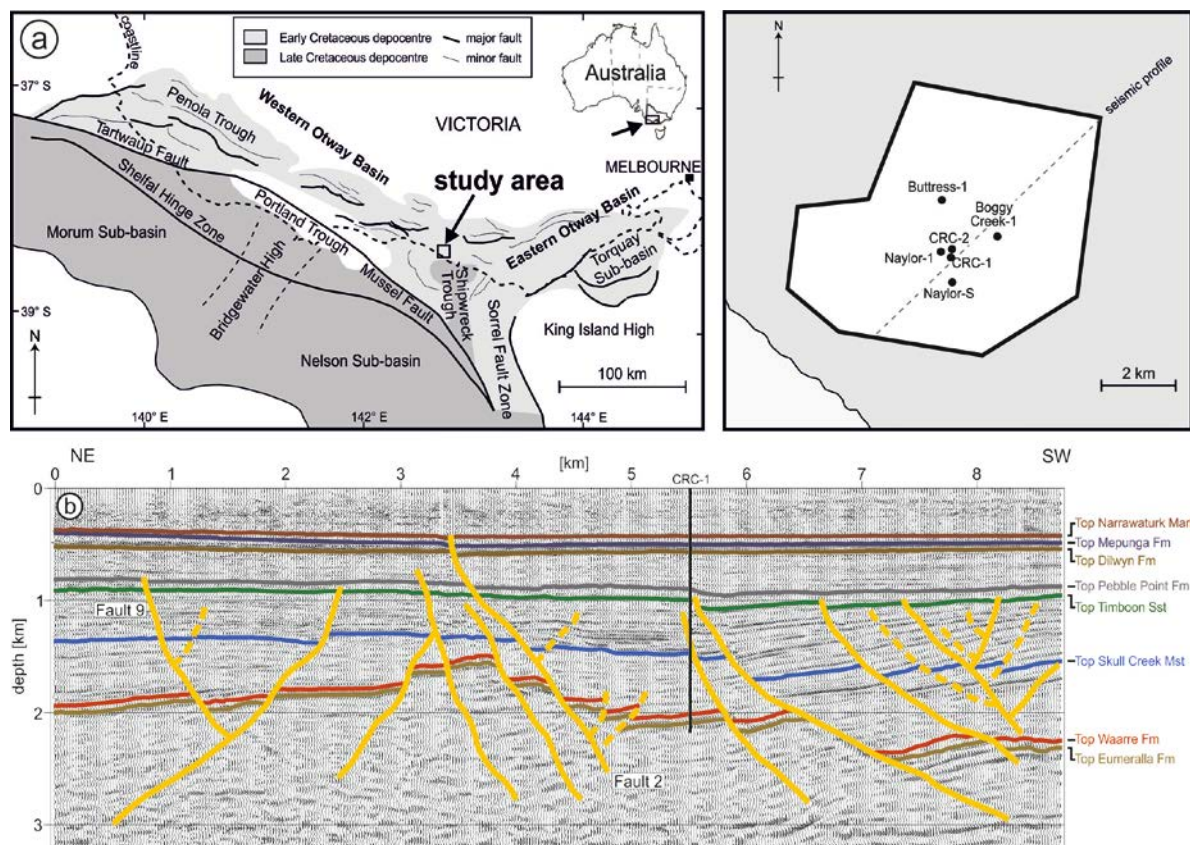


**Abbildung 1.1.1:** Eigenschaften des *Fault-Parallel Flow* Algorithmus. Das Verhältnis von Elongation (e) zu Störungsknickwinkel  $\eta$  für alle Objektwinkel belegt die Anwendbarkeit für flache Störungsknickwinkel (Ziesch et al., 2014).

### Interpretation 3-D Seismik

Das von den australischen Partnern zur Verfügung gestellte 3-D Seismikvolumen (32.3 km x 14.35 km x 4100 ms TWT) wurde mittels der Software Petrel (Schlumberger) interpretiert. Die meisten Phasen und Störungen sind auch in größeren Tiefen noch sehr gut abgebildet, da die Zieltiefe der Baseline-Seismik bei etwa 1,6 km lag. Die PROTECT Arbeitsgruppe hat ein Fokusgebiet mit einer Größe von etwa 7 km x 8 km gemeinsam definiert und innerhalb dieses Gebietes die 3-D Seismik in der Zeitdomäne interpretiert. Es wurden acht stratigraphische Horizonte, von der Basis des Reservoirs (Eumeralla Formation) bis hin zum höchsten, seismisch sichtbaren Horizont in etwa 450 m Tiefe (Narrawaturk Formation) in 100 m Abständen (Inline/Crossline) interpretiert (*Abb. 1.1.2*).

Für die Strukturanalyse legten wir besonderes Augenmerk auf die detaillierte Störungsinterpretation. Aus diesem Grund war die Anwendung von zufällig verteilten Profilschnitten (*random lines*) senkrecht zum Störungstreichen sehr hilfreich (Ziesch et al., 2015a). Die Störungsmorphologie konnte durch einen Abstand dieser Profilschnitte von 40-60 m gut interpretiert werden. Zur Unterstützung wurden Kohärenzvolumen (AP2) sowie Varianz- und *ant-tracking* Volumina hinzugezogen. Insgesamt sind neben den acht stratigraphischen Horizonten im Arbeitsgebiet über 60 Haupt- und Nebenstörungen interpretiert worden.



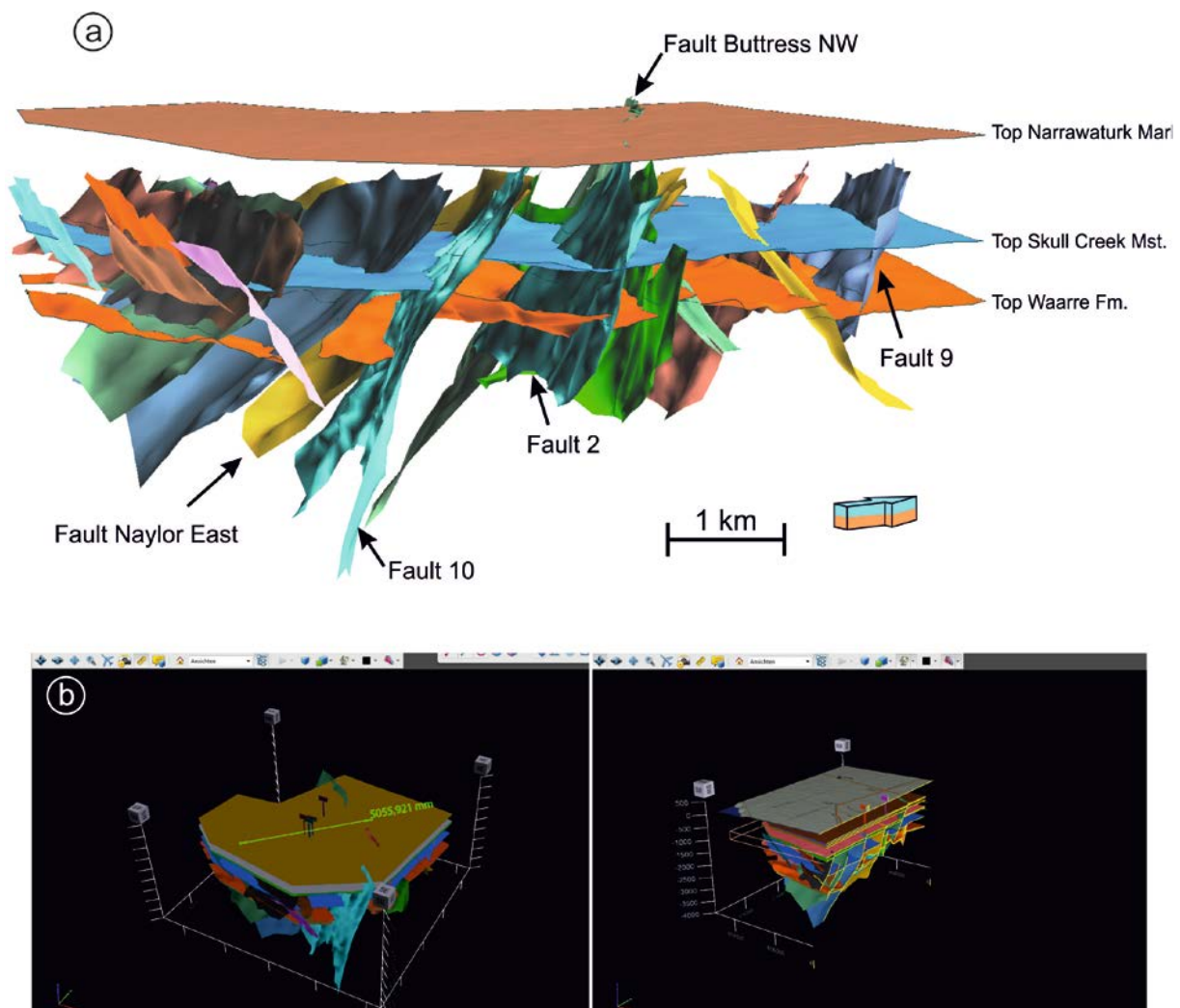
**Abbildung 1.1.2:** Übersicht zum Otway Becken und des Arbeitsgebiets. a) Geologische Strukturkarte mit der Lokation vom Arbeitsgebiet (links) und dem in PROTECT definierten Fokusgebiet mit Bohrungen und der Lage des seismischen Schnittes (rechts); b) NE-SW Schnitt durch die 3-D Seismik mit der Interpretation von den stratigraphischen Schichten und Störungen (Ziesch et al., 2015a).

Für die Zeit-Tiefenwandlung wurde ein Geschwindigkeitsmodell mittels der Checkshot-Daten der CRC-1-Bohrung (*Abb. 1.1.2a*) erstellt. Neben den Intervallgeschwindigkeiten wurden der Geschwindigkeitsgradient und ein 3-D Geschwindigkeitsmodell basierend auf den Horizonten erstellt. Die Qualitätskontrolle erfolgte durch neun weitere Bohrungen inkl. Bohrmarker, wobei der durchschnittliche Abweichungsfehler bei etwa 0.6% liegt.

Nach der erfolgreichen Tiefenwandlung wurde ein geologisches 3-D Modell mit acht stratigraphischen Horizonten und 24 Hauptstörungen erstellt (Software Gocad, Paradigm). Die Dreieckskantenlänge der kleinsten interpretierten Elemente beträgt ~75 m. Um ein konsistentes Modell zu bauen, wird in der Software der *structural-modelling workflow* empfohlen. Unter der Verwendung dieses Arbeitsablaufes konnten in relativ einfachen Schritten die Flächen geschnitten, der Versatz entlang der Störung und der Störung-Horizont-Kontakt präzise modelliert werden.

### Ergebnisse

Aufgrund der intensiven Datenbearbeitung und Strukturinterpretation haben wir als Grundlage für alle weiteren Analysen ein hochaufgelöstes geologisches 3-D Strukturmodell erzeugt (*Abb. 1.1.3a*). Durch die direkte Triangulation der Eingangsdatenpunkte für die Störungen ist die Morphologie der Flächen sehr gut abgebildet. Damit das 3-D Modell jedem Interessenten zugänglich gemacht werden kann, haben wir in Zusammenarbeit mit dem Niedersächsischen Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) ein 3-D pdf-file erstellt (Ziesch et al., 2015a). So wird dem Benutzer ermöglicht, u.a. das 3-D Modell ohne spezielle Software mit einem einfachen Reader anzuschauen, Distanzen zu messen oder spezielle Schnitte durch das Modell zu legen (*Abb. 1.1.3b*).



**Abbildung 1.1.3:** Geologisches 3-D Strukturmodell. a) Blick Richtung Nordwesten hinein in das 3-D Modell mit drei stratigraphischen Horizonten und allen 24 Hauptstörungen (Ziesch et al., 2015a); b) Einblicke in das 3-D pdf-file. Neben Abmessung von Elementen (links) und Visualisierungsmöglichkeiten wird dem Benutzer das Anschneiden aller Flächen in X-, Y- und Z-Ebene (rechts) ermöglicht.



## Strukturanalyse

Für die Strukturanalyse wurden zunächst von allen stratigraphischen Horizonten Tiefen- und Mächtigkeitsisolinienkarten erstellt (**Abb. 1.1.4a, b**). Anschließend haben wir eine intensive Störungsanalyse mit der kinematischen Modellierungssoftware Move (Midland Valley) durchgeführt. Für alle 24 Hauptstörungen wurden folgende Strukturanalysen durchgeführt (Ziesch et al., 2015a):

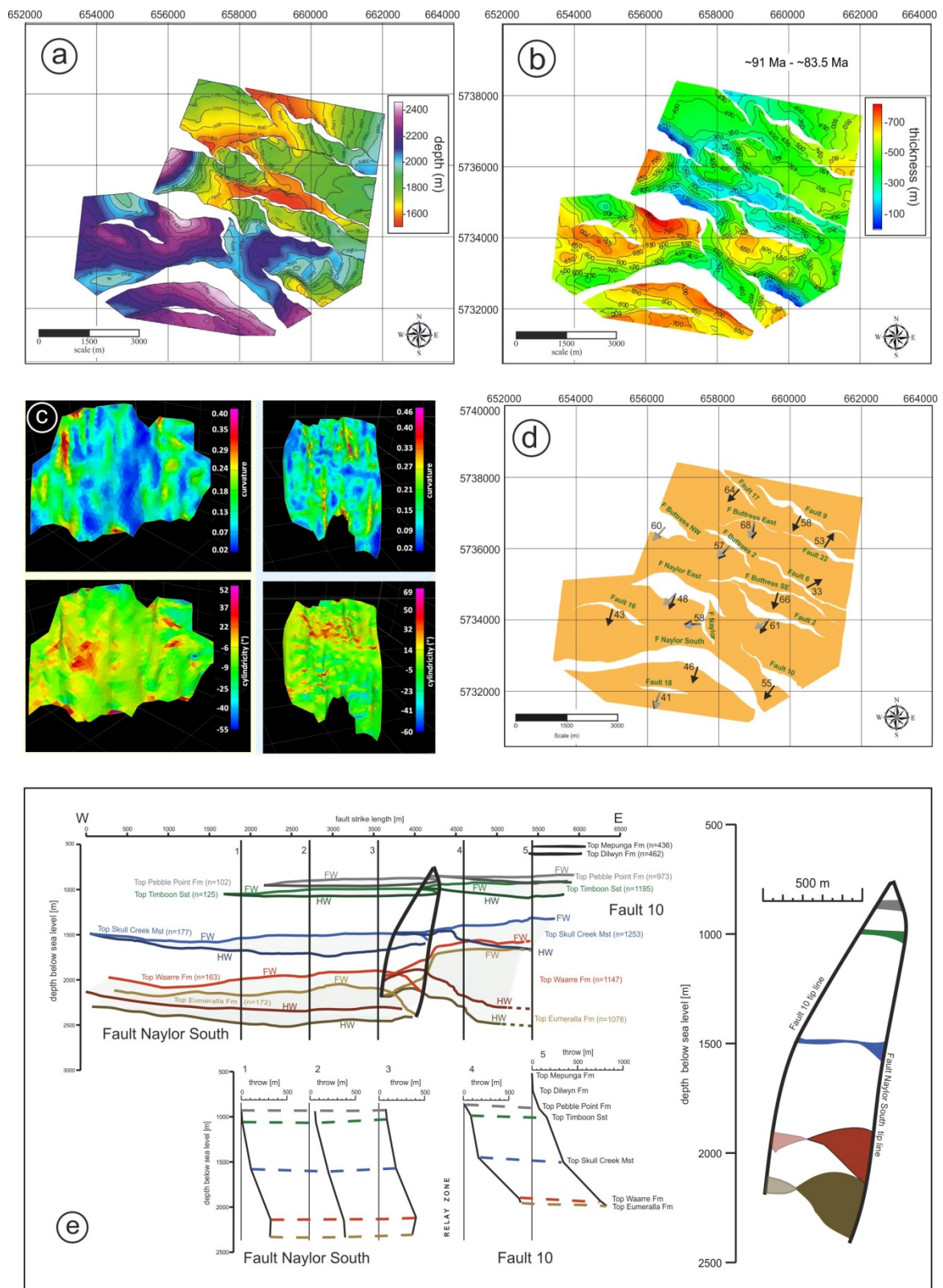
1. Krümmungsanalyse (*curvature*; **Abb. 1.1.4c**). Die Analyse der Krümmung wurde hauptsächlich deshalb durchgeführt, um die Morphologie der Störungsflächen besser zu charakterisieren. Riffel-ähnliche Strukturen, die z.B. auch in Tiefenscheiben der Varianz gesehen wurden, konnten mit der Krümmungsanalyse ausgewertet werden. Es erfolgten u.a. die Ausmessung der Länge und Breite sowie eine Berechnung der Amplitude dieser Strukturen.  
Nicole Duda (KIT) hat im Rahmen eines Praktikums (2014) eine Interpretation von Daten aus dem Untersuchungsgebiet durchgeführt und zu dieser Idee beigetragen.
2. Zylindrizität (*cylindricity*; **Abb. 1.1.4c, d**). Mit diesem Werkzeug kann man berechnen, wie gut sich die triangulierte Fläche an einen Zylinder anpasst. Der kleinste Eigenvektor ist dabei die Faltenachse der gekrümmten Fläche und entspricht der Längsachse der Zylindrizität. Diese Analyse wurde benutzt, um die Richtung des Bewegungsvektors auf der Störungsfläche zu bestimmen.
3. Allan Diagramm (*juxtaposition diagram*; **Abb. 1.1.4e**). Diese Methode wird benutzt, um die Versatzänderung der Horizonte entlang einer Störung und mit der Tiefe zu analysieren. Methodisch werden bei der Erstellung dieser Diagramme entlang einer Störung sowohl Punktdaten vom Schnittpunkt des Hangenden mit der Störung als auch des Liegenden mit der Störung erhoben. Die Zusammenführung der Daten und das Erstellen von Diagrammen können mit graphischen und Tabellenkalkulationsprogrammen stattfinden, mit denen Versatz gegen Tiefe aufgetragen wird.
4. Orientierungsanalyse (*stereoplots*). Für die Berechnung des Einfallens und der Einfallrichtung wurde eine komplette Orientierungsanalyse für alle Störungen durchgeführt.
5. Expansionsindex. Auf Grundlage der Mächtigkeitskarten wurde der Expansionsindex exemplarisch von sechs Störungen für alle stratigraphischen Schichten berechnet. Der Expansionsindex ist der Quotient aus der Mächtigkeit des Hangenden und der Mächtigkeit des Liegenden. Dieser dient zur Beurteilung der syn-sedimentären Aktivität von Störungen.

Im Rahmen der Bachelorarbeit von Sarah Weick (Uni Göttingen, 2015) wurden außerdem für das große Gebiet der 3-D Seismik (vgl. **Abb. 1.1.2**) die Hauptstörungen interpretiert und gemeinsam mit einem Horizont (Waarre Formation, Reservoir) strukturgeologisch analysiert. Dabei hat sie Schiefe, Orientierung, Versätze und Allan Diagramme für alle Hauptstörungen berechnet sowie die Störungsgeometrien in Bezug auf deren Lage im Otway Becken ausgewertet.

## Ergebnisse

Der in **Abbildung 1.1.2** dargestellte Schnitt durch die Seismik zeigt beispielhaft, dass der Untergrund des Arbeitsgebietes in zwei Bereiche untergliedert werden kann. Der obere Bereich (0 bis 1 km Tiefe) ist relativ ungestört, während der Bereich größer 1 km Tiefe sehr komplex aufgebaut und besonders auf den Reservoir- und Deckgesteinsebenen sehr stark gestört ist. Die Deformation steigt mit der Tiefe an. Lediglich zwei Störungen durchkreuzen alle Gesteinsschichten: Buttress NW Fault und Fault 2 (siehe auch **Abb. 1.1.3**).

Ein Großteil der Hauptabschiebungen fällt in Richtung SW ein. Diese sind etwas steiler im NE und listrischer im SW. Außerdem haben sich parallel zu den großen Hauptstörungen untergeordnete, antithetische Störungen entwickelt (**Abb. 1.1.3**).



**Abbildung 1.1.4:** Beispiele aus der Strukturanalyse (Ziesch et al., 2015a). a) Tiefenlinienkarte der Waarre Formation (Reservoir); b) Mächtigkeitkarte vom Deckgestein über dem Reservoir projiziert auf die Waarre Formation; c) Fault 2 und Fault 10, nach der Krümmung (oben) und Zylindrizität (unten) eingefärbt; d) Strukturkarte mit den Ergebnissen der Zylindrizität (graue Pfeile); e) beispielhafte Darstellung des Allan Diagramms für die Naylor South Fault und Fault 10 mit allen stratigraphischen Schichten. Außerdem sind Versatz gegen Tiefe aufgetragen sowie die Relay Zone vergrößert dargestellt (Ziesch et al., 2015a).

Das Einfallen der Hauptstörungen liegt im Mittel bei etwa 60°. Die maximalen vertikalen Versätze an den Störungen betragen im SW des Arbeitsgebietes bis zu 800 m (Naylor East Fault). Des Weiteren wurden Horststrukturen und Relay Rampen über mehrere stratigraphische Schichten dokumentiert. Die Relay-Zonen sind im Arbeitsgebiet ausschließlich linksstufig (*left-stepping*) und teilweise leicht rotiert, was auf eine Seitenverschiebungskomponente hindeutet.

Zur Bestimmung der Kinematik von Störungen wurden die Störungsränder in Allan Diagrammen ausgewertet (siehe Beispiel in *Abb. 1.1.4e*). Die Analyse hat gezeigt, dass die Störungsränder (*tip lines*) entweder symmetrisch oder asymmetrisch verlaufen (Tanner et al., 2015). Daraus ergibt sich neben den links-stufigen Relay Rampen ein weiterer Hinweis für die Bewegung an den Störungen. Die symmetrischen Störungen deuten auf eine Bewegungsrichtung parallel zur Einfallsrichtung hin, während die Asymmetrie bei manchen Störungen eine leichte Seitenverschiebungskomponente während der abschiebenden Bewegung nahe legt (Tanner et al., 2015).

Um dies noch besser zu quantifizieren, haben wir eine neue Methode entwickelt, in der die Krümmungs- und Zylindrizitätswerte der Störungsrippeln (*corrugations*) den Bewegungssinn entlang von Störungen wiedergeben (*Abb. 1.1.4c*; Ziesch et al., 2015a). Diese Störungsrippeln entstehen, wenn sich einzelne Störungssegmente zu einer Hauptstörung verbinden. Die Nahtstelle, hier als Störungsrippel bezeichnet, bleibt während des Störungswachstums erhalten und ist somit ein Indikator für die Bewegungsrichtung (Ziesch et al., 2015a). Es hat sich gezeigt, dass für manche Störungen im Untersuchungsgebiet die zylindrische Achse im Vergleich zur Einfallsrichtung bis zu 25° im Uhrzeigersinn abweicht. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass manche Störungen mit einem leichten dextralen Bewegungssinn abgeschoben wurden (Ziesch et al., 2015a). Es konnte für alle Hauptstörungen die kinematische Richtung mit dieser Methode bestimmt werden. Diese Richtung ist unabdingbarer Eingangsparameter für die sich anschließende Retrodeformation.

Die Analyse der Mächtigkeitkarten (*Abb. 1.1.4b*) wurde durch die Berechnung des Expansionsindex unterstützt (*Abb. 1.1.4e*). Das Störungswachstum der analysierten Störungen zeigt dabei sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede. Während der Zeit der Ablagerung von der Waarre Formation (~90-110 Ma) fanden entlang der Störungen extrem stark ausgeprägte, syn-sedimentäre Bewegungen statt. Der Expansionsindex ist dadurch für manche Störungen >9; erwarten würde man Werte um 1-3. Grundsätzlich werden mit jüngerem Alter der Schichten auch die berechneten Werte für den Expansionsindex kleiner, jedoch zeigten sich Unterschiede in der Intensität. Zum Beispiel ist die Buttress NW Fault sehr stark von syn-sedimentären Bewegungen geprägt, während Fault 10 und Fault Naylor South nicht ganz so stark syn-sedimentär aktiv waren (*Abb. 1.1.4e*). Es ließ sich jedoch feststellen, dass bei allen Störungen die Störungsaktivität durch Sedimentauflast getrieben ist. Dies bedeutet, dass eine Störung sich auch nicht mehr bewegt, sobald die syn-sedimentäre Aktivität zum Erliegen kommt (Tanner et al., 2015).

### **3-D Retrodeformation**

Zur Vorbereitung der Retrodeformation wurden zunächst alle acht Horizontflächen in einzelne Teilbereiche zergliedert, um später entlang einer Störung nur das entsprechende Segment des Horizonts in 3-D restaurieren zu können (*vgl. Abb. 1.1.5a*). Immer an den Störungen ausgerichtet, sind somit schliesslich die tieferen Horizonte in 18 Teilbereiche untergliedert worden. Danach erfolgte die Erstellung eines Tetraeder-Volumenmodells für alle stratigraphischen Schichten.

Für die spätere Dekompaktion wurde mittels der  $V_{\text{shale}}$ -Werte aus der Bohrung Naylor 1 die Porosität für jede stratigraphische Einheit bestimmt. Unter Anwendung der Athy-Methode ist mit Hilfe des Kompaktionskoeffizienten  $c$ , der aus der Literatur bekannt ist, eine Porositätenkurve erstellt worden, die später als Eingangsparameter für die 3-D Dekompaktion diene.

Im Rahmen der Bachelorarbeit von Neeske Lübben (Uni Bremen, 2014) wurden drei 2-D Schnitte durch das Arbeitsgebiet mit der Software 2DMove restauriert. Frau Lübben analysierte im Rahmen ihrer Arbeit die Paläogeographie, die Extension der Profile, die Änderungen der Mächtigkeit über die Zeit und die Subsidenzgeschichte.

Für die 3-D Retrodeformation wurde der Algorithmus *inclined shear* benutzt. Da auch für diesen Algorithmus noch nicht viel über dessen Grenzen und Anwendungsmöglichkeiten vorhanden war, haben wir mit einem vereinfachten Strukturmodell zunächst die Eigenschaften des *inclined shear* analysiert (Ziesch et al., 2015b).

In der letzten Phase dieses Arbeitspaketes wurde dann das gesamte 3-D Modell dekomprimiert und retrodeformiert. Dabei haben wir für alle Schichten bis zur Skull Creek Formation (Deckgestein) Verformungskarten erstellt, wobei die Verformung in a) Verformung durch Kompaktion, b) Verformung durch Deformation und c) kombinierte Verformung durch Kompaktion und Deformation unterschieden wurde. Es erfolgte eine detaillierte Berechnung der Extension durch die Analyse von zehn Profilschnitten.

## Ergebnisse

Die Retrodeformation des geologischen 3-D Modells belegt sehr deutlich, dass die Aktivität der Störungen seit dem Beginn des Paläogens vor 65 Ma stark zurück ging. Dies wurde durch die Quantifizierung der Extension, die entlang von 10 Profilschnitten gemessen wurde, bestimmt. In der Kreidezeit liegen die Extensionswerte im Durchschnitt zwischen 8 und 9%, während die Extension ab 65 Ma noch bei <0,3 % lag. Bei den Untersuchungen war es von hoher Wichtigkeit, mehrere 2-D Profilschnitte im Gebiet zu berechnen, da sich je nach Lage die Extension teilweise von 1% Minimum bis 14% Maximum bewegt. Um einen Überblick über das Arbeitsgebiet zu erhalten, war es unerlässlich, im dreidimensionalen Raum zu arbeiten.

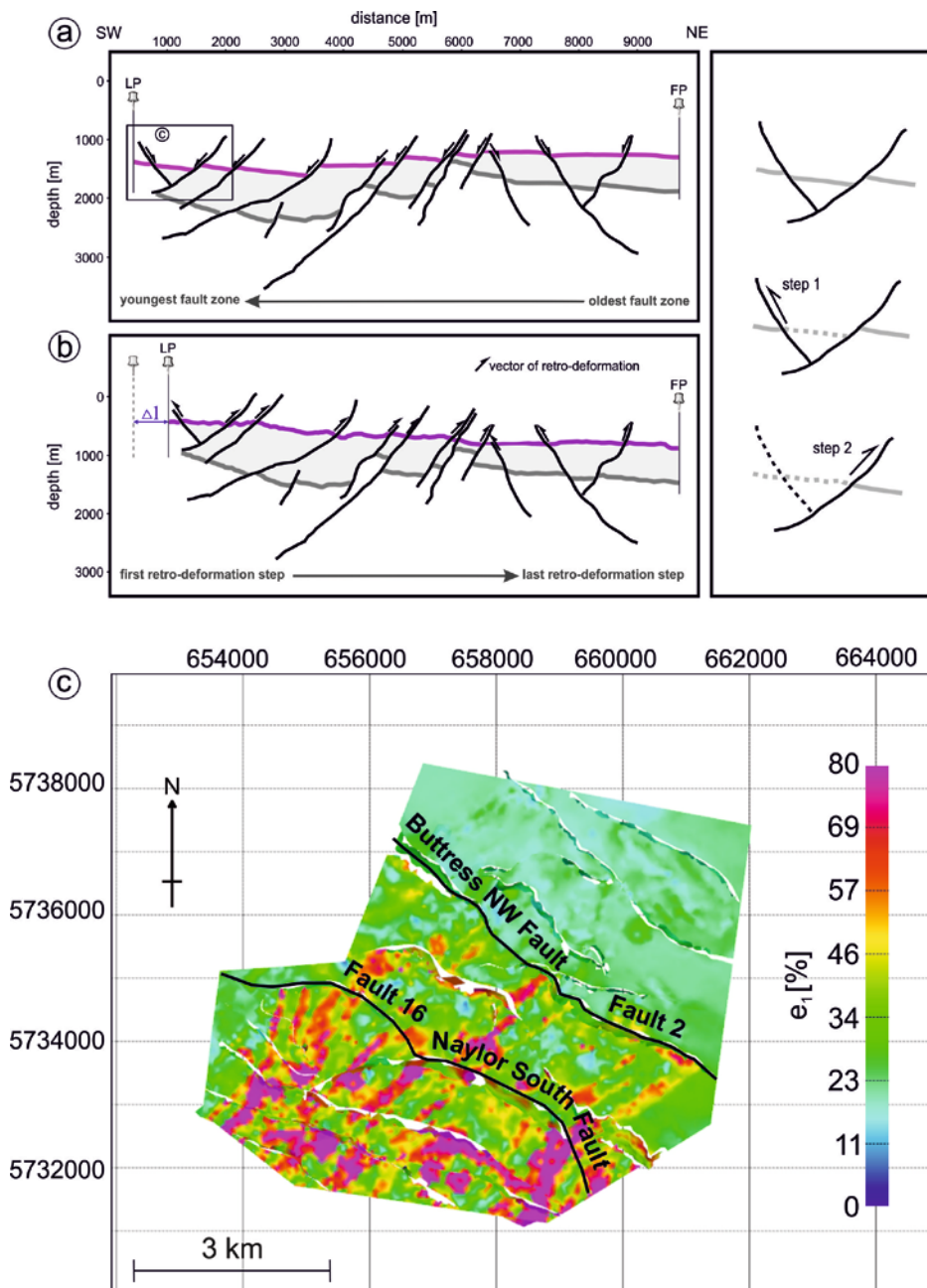
Aus der Subsidenzkurve, die durch die 2-D Dekompaktion (Lübben, 2014) ermittelt wurde, lassen sich zwei Subsidenzphasen ableiten (Tanner et al., 2015). Die erste Phase (syn-rift) umfasst den Zeitraum zwischen der Ablagerung der Waarre Formation (110 Ma) und der Dilwyn Formation (48 Ma). Sie wurde durch eine konstante, sehr starke Absenkung mit Werten von bis zu 36 m/Ma geprägt. Die zweite Phase (post-rift) begann mit dem mittleren Eozän (48 Ma) und ist durch sehr langsame Subsidenz (6 m/Ma) charakterisiert.

Die Restauration hat neben der Verformung auch Einblicke in die Paläogeomorphologie ermöglicht. Überraschenderweise hat sich herausgestellt, dass die retrodeformierte Skull Creek Formation in Richtung NE geneigt ist (**Abb. 1.1.5b**). Dies lässt darauf schließen, dass das Arbeitsgebiet durch eine wesentlich größere Abschiebung beeinflusst wurde (Ziesch et al., 2015b). Es wird ausserdem vermutet, dass das Arbeitsgebiet eine Art *roll-over* Struktur als Teil einer großen Abschiebung im NE des Arbeitsgebietes ist (Ziesch et al., 2015b). Die geologischen Karten aus dem Otway Becken deuten auf solch große Strukturen hin. Welche Störung genau diesen vermuteten Einfluss ausübt, kann allerdings nur mit einer weiterführenden Studie beantwortet werden.

Generell wird Verformung durch eine finite Verformungsellipse mit drei Verformungsachsen beschrieben. Dabei gilt  $1+e_1 > 1+e_2 > 1+e_3$ , wobei die  $e_1$  Magnitude ein Indikator für die Menge an Verformung, d.h. Menge an Brüchen oder Störungen ist. Die Verformung durch Kompaktion wird von uns erstmalig von der Verformung durch Deformation unterschieden. Die Verformung durch Kompaktion, die ein Indikator für die Menge an Volumenverlust und diagenetische Deformation ist, zeigt für die Skull Creek Formation Werte von mindestens 15% Verformung. Außerdem weist der nordöstliche Bereich etwas weniger Verformung auf als der Südwesten. Bei der Berechnung der Verformung durch Deformation und Kompaktion wird diese unterschiedliche Verteilung noch deutlicher. Während der Südwesten mit sehr hohen  $e_1$ -Magnituden eine starke Verformung aufzeigt (bis zu 80%), erfuhren der mittlere Teil des Arbeitsgebietes mäßige (bis zu 55%) und der nordöstliche Teil nur sehr wenig Deformation (bis zu 35%; **Abb. 1.1.5c**).

Vier Störungen (Buttress NW Fault, Fault 2, Fault 16 und Naylor South Fault) spielen bei der Segmentierung der oben beschriebenen Verformung eine Rolle. Sie sind vermutlich in einer hierarchisch übergeordneten Ebene als Master-Störungen anzusehen, denn Sie trennen die Zonen unterschiedlich starker Deformation.

Die Verteilung der Verformung erscheint ausserdem streifenartig. Dies hängt direkt mit den bereits im vorherigen Abschnitt erwähnten Störungsrippeln zusammen. In den Bereichen, wo die Störungsrippeln höhere Amplituden aufweisen, ist auch die abgeschobene Gesteinsformation stärker beansprucht worden. Ausserdem ist auffällig, dass hohe Verformungswerte besonders in den Bereichen der Relay Rampen auftreten. Da die Relay Rampen leichte Rotationen aufweisen, werden sie bei der Retrodeformation stärker zurück verformt und weisen damit höhere Deformation auf.

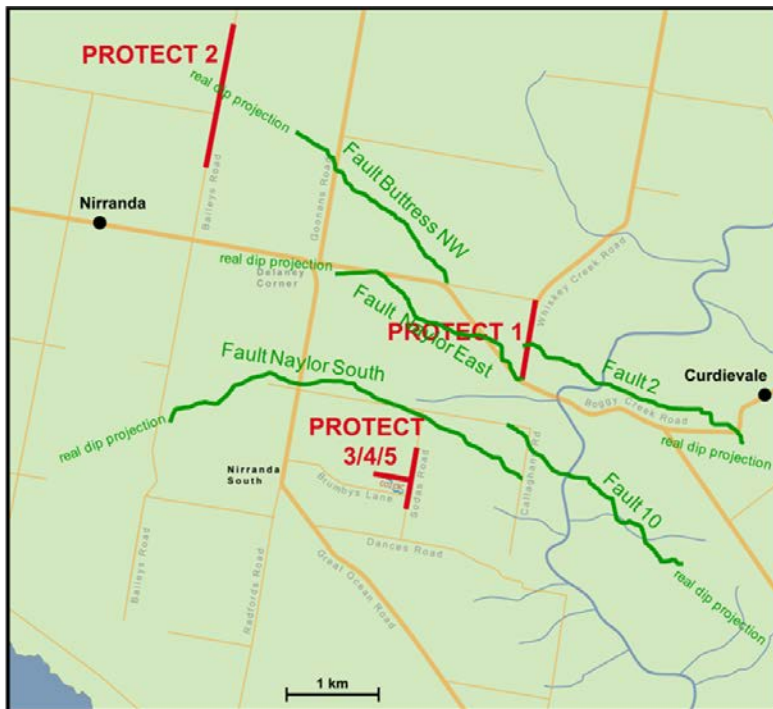


**Abbildung 1.15:** Ergebnisse der 2-D und 3-D Retrodeformation. a) SW-NE Profil durch die Skull Creek Formation vor der Restauration, wobei die jüngste Störungszone im SW liegt; b) die Oberfläche der Skull Creek Formation (dunkel violett) nach der kompletten Restauration und Dekompaktion, wobei  $\Delta l$  den Längenunterschied des Profils vor und nach der Restauration beschreibt; c) Karte der Gesamtverformung durch Kompaktion und Deformation. Dargestellt ist die Top Skull Creek Formation, eingefärbt nach der  $e_1$  Magnitude (Indikator für die Menge an Deformation). Es ist eine deutliche Dreiteilung des Arbeitsgebietes erkennbar.



### 1.1.2b Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse , Scherwellenseismik'

Die im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Analysen zu Störungen und subseismischer Deformationen im Untersuchungsgebiet sagen Lokationen mit vermuteter erhöhter Deformation vorher (siehe auch *Abb. 1.1.3* und *Abb. 1.1.5*). Da die P-Wellendaten aus dem Messgebiet den Bereich oberhalb von 400 m Tiefe nicht auflösen und bei dem abgeleiteten Deformationsgeschehen insbesondere Brüche mit kleinen Versätzen (< 20 m) zu erwarten sind, wurde entschieden, die Deformation mit eigenen hochauflösenden, reflexionsseismischen Scherwellenmessungen zu validieren. Die im 3-D Datensatz interpretierten und von der Tiefe an die Erdoberfläche extrapolierten Störzonen sowie die Bohrungen bestimmten dabei die Lage der neu gemessenen Profile mit dem LIAG-System für Scherwellenseismik (*Abb. 1.1.6*; nach Beilecke et al., 2015a).



*Abbildung 1.1.6:* Lage der neu gemessenen, seismischen 2-D Scherwellenprofile PROTECT 1-5 (rote Linien). Die im 3-D Datensatz interpretierten und von der Tiefe an die Erdoberfläche extrapolierten Störzonen (grüne Linien) bestimmten die Profillokationen (nach Beilecke et al., 2015a).

Das seismische Equipment (Vibrator, Landstreamer, Registrierapparatur) wurde für die Messungen per Container nach Melbourne verschifft und mit einem LKW ins Messgebiet gebracht. Beim Import der Geräte nach Australien erforderten die strengen Quarantänebestimmungen, Fahrzeugzulassungen und Bestimmungen im Zusammenhang mit dem Import von Gasen in Klimaanlage zusätzlichen zeitlichen Aufwand. Da die Importregularien für die Nutzung von Funkgeräten bis zum Schluss unerfüllbar waren, wurde während der Messungen eine Kabeltriggerung der seismischen Apparatur benutzt und für die Kommunikation auf australische Funkgeräte der Projektpartner zurückgegriffen.

Neben dem hydraulischen Scherwellenvibrator kamen zwei Geophonstreamer mit jeweils 120 Horizontalgeophonen mit SH-Orientierung zum Einsatz, die von jeweils einem Zugfahrzeug entlang der Profile gezogen wurden (*Abb. 1.1.7*). Die Profile lagen sowohl auf befestigten Schotter- als auch auf Teerstraßen. Eine Straßenverkehrssicherung durch eine lokale Firma erwies sich wegen des starken Verkehrs als notwendig.

Die beiden Geophonstreamer wurden für die Messungen entlang der Profile PROTECT 1-3 und 5 zu einem Streamersystem von 240 m Länge zusammengeschaltet. Nur entlang von Profil PROTECT 4 wurde aus logistischen Gründen eine Festaufstellung von nur 120 Kanälen betrieben. Zusätzlich zu

der Registrierung mit dem Geophonstreamer wurden die Quellsignale der Profile PROTECT 4 und 5 mit einem lokal vergrabenen Array von Vertikalgeophonen seitens der Curtin University aufgezeichnet.



Abbildung 1.1.7: Seismische Messung entlang des Profils PROTECT 2.

Abgesehen von der Geophon-Festaufstellung entlang der Profile PROTECT 4 und 5 wurden asymmetrische Split-Spread Aufstellungen verwendet (Abb. 1.1.8). Diese Messgeometrie kann unterschiedliche Neigungsrichtungen von Strukturen im Untergrund reflexionsseismisch erfassen, bestimmt aber die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit für größere Tiefen weniger gut. In diesem Fall liegen die maximalen Schuss-Geophon Offsets bei 240 m. Dementsprechend ist, unter der Voraussetzung eines positiven Geschwindigkeitsgradienten mit der Tiefe, für einzelne Bereiche die Bestimmung der Scherwellengeschwindigkeiten bis maximal ~350 m möglich. Da sich die Quelle in den meisten Bereichen der Profile im zentralen Drittel der jeweiligen Auslagen befand, liegt die Mehrzahl der absoluten Offsets zwischen 0 und 160 m (Beilecke et al., 2013; 2014).

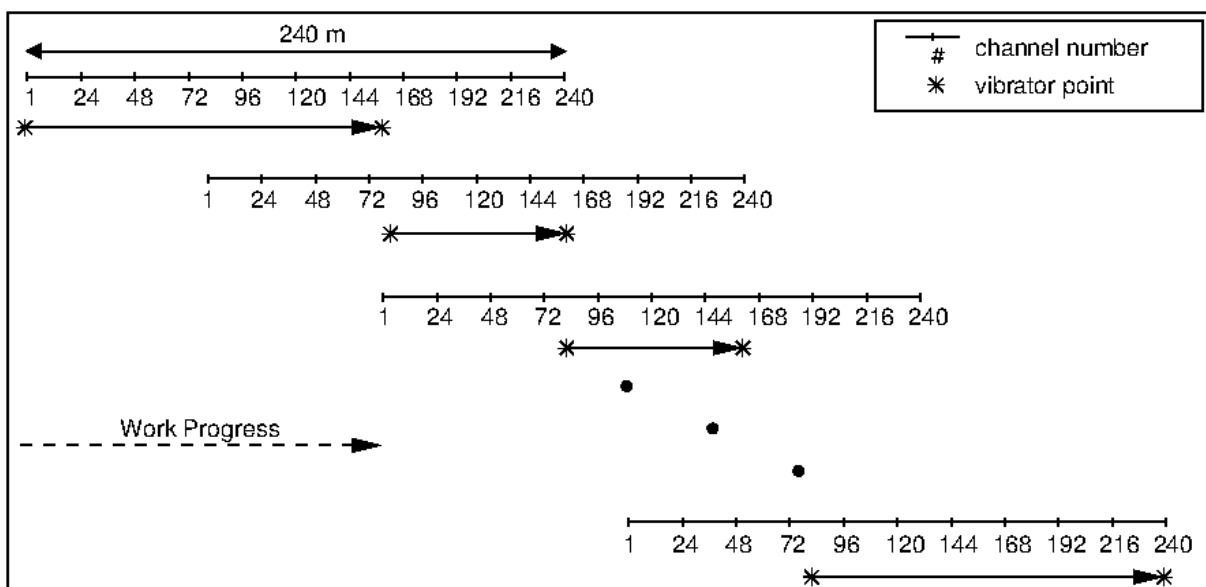
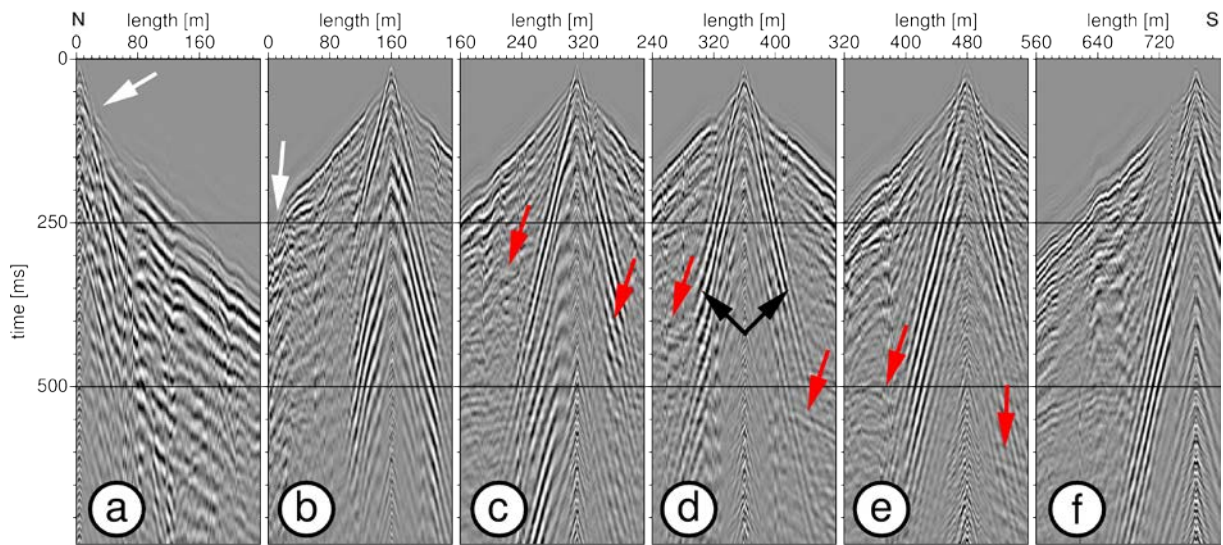


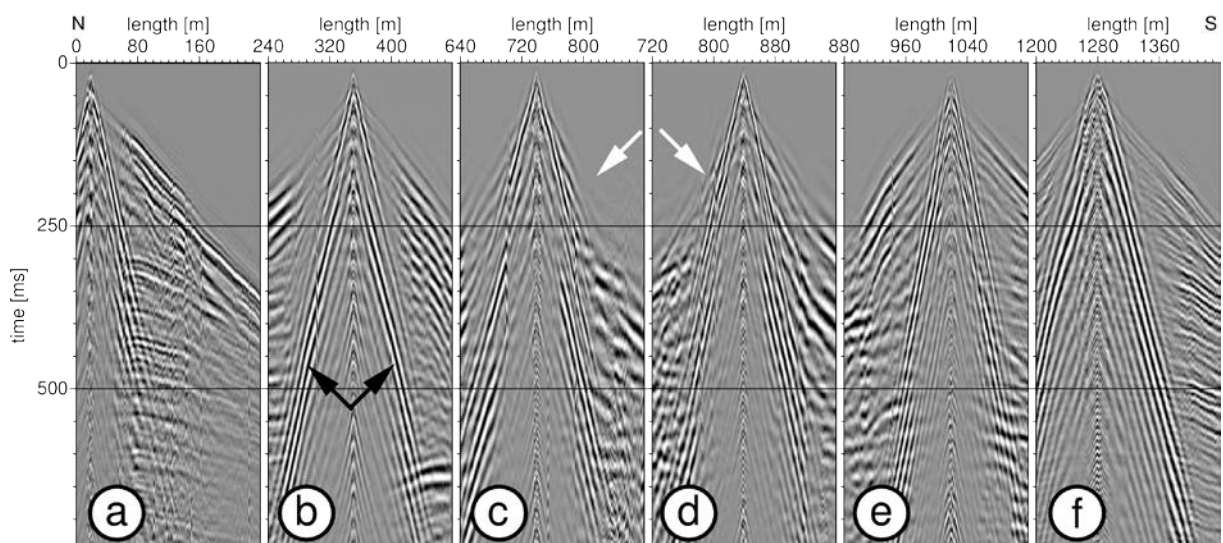
Abbildung 1.1.8: Schematische Darstellung der Akquisitionsgeometrie (Beilecke et al., 2015a).

Repräsentative Einzelschüsse von den Profilen PROTECT 1 und 2 zeigen nach Beilecke et al. (2015a) folgende gemeinsame Auffälligkeiten (*Abb. 1.1.9, Abb. 1.1.10*):

- Unabhängig davon, ob auf einer geteerten Strasse oder auf einem aufgeschütteten Kiesweg gemessen wurde, zeigen sich deutliche Oberflächenwellen (Love-Wellen, schwarze Pfeile).
- In Bereichen, in denen bis an die Oberfläche reichende Störzonen vermutet wurden, sind die aufgezeichneten Signale bandbegrenzter. Die Ersteinträge der direkten Wellen sind undeutlicher und zeigen stärkere Undulationen (weisse Pfeile).
- Reflexionen oder Segmente von Reflexionen, die auf Störzonen hindeuten, sind teilweise bereits in den Einzelschüssen deutlich zu erkennen (rote Pfeile).



**Abbildung 1.1.9:** Einzelschüsse entlang Profil PROTECT 1. Der nördlichste Schuss (a) zeigt eine stärkere Dämpfung von hohen Frequenzen als die südlich anschliessenden Schüsse (b) bis (f). Auch ist der Einsatz der direkten Welle in Schuss (a) und teilweise in (b) nur schwach ausgeprägt (weisse Pfeile). Oberflächenwellen zeigen sich, obwohl die Messungen auf einer Teerstraße durchgeführt wurden (schwarze Pfeile). Reflexionselemente sind in unterschiedlichen Tiefen sichtbar (rote Pfeile).



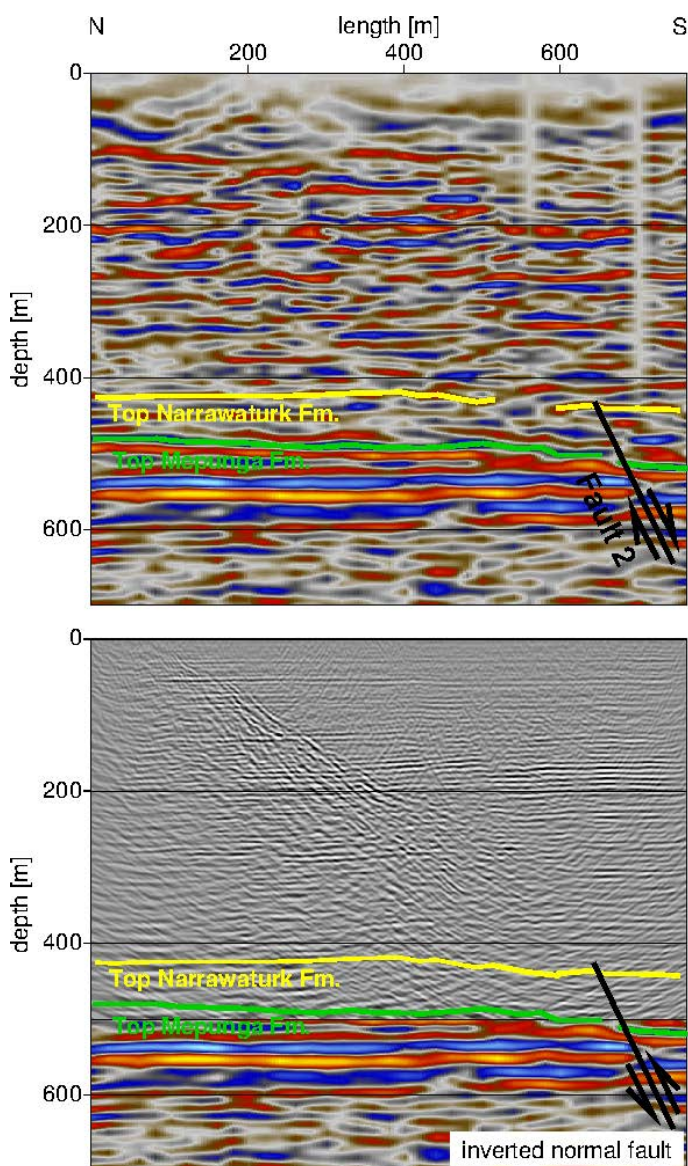
**Abbildung 1.1.10:** Einzelschüsse entlang Profil PROTECT 2. Die Schüsse (b) bis (e) zeigen im zentralen Teil des Profils eine geringere Bandbreite mit langsameren direkten Wellen (weisse Pfeile); Oberflächenwellen sind exemplarisch gekennzeichnet (schwarze Pfeile).



Die seismische Datenbearbeitung umfasste folgende Schritte: Einlesen der seismischen Daten, Aufbereitung der Datengeometrie, Vibroseiskorrelation mit dem Sweep der Vibratorsteuerung, negative Stapelung der zwei 180° phasenverschobenen Sweeps von jedem Vibratorpunkt, Refraktionsstatik mit *Diminishing Residual Matrices* (DRM), spektrales Aufweissen (11 Panele, 20-100 Hz), fk-Filterung, Geschwindigkeitsanalyse, *Muting* (Spuren bis 20 m Offset um jeden Schusspunkt und 20% *stretch mute*), Kirchhoff-Zeitmigration vor dem Stapeln, CDP-Stapelung.

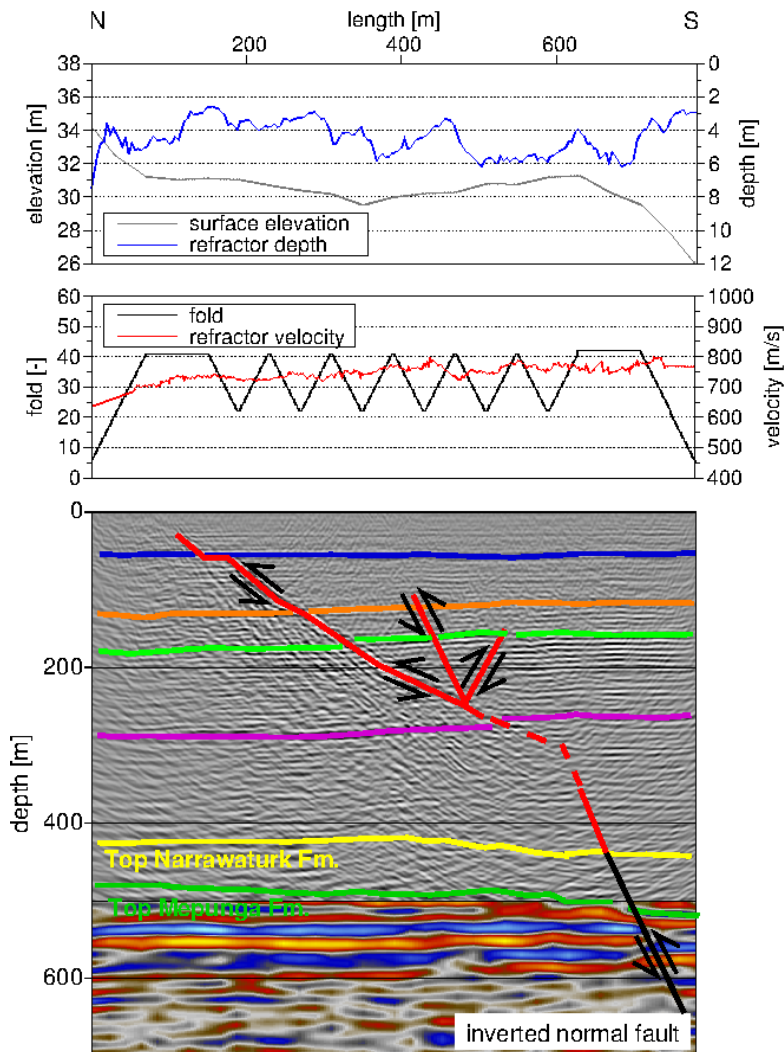
Auf das oftmals zeitaufwändige Editieren von fehlerhaften Spuren konnte hier verzichtet werden, da es sich als statistisch irrelevant erwies. Ebenfalls verzichtet wurde auf eine reststatische Korrektur, da sich das Ergebnis durch diesen Prozess verschlechterte. Als deutliche Verbesserung der Datenbearbeitung erwiesen sich die Anwendung vom spektralen Aufweissen und von refraktionsstatischen Korrekturen (vgl. Beilecke et al., 2014 und Beilecke et al., 2015a).

Die Interpretationen der so erhaltenen seismischen Sektionen ergänzen den oberflächennahen Bereich im Untersuchungsgebiet zwischen 0-500 m Tiefe (*Abb. 1.1.11*, vergleiche oben und unten) und schliessen an die vorhandene Stratigraphie eindeutig an.



**Abbildung 1.1.11:** Profilschnitte entlang von Scherwellenprofil PROTECT 1 (Beilecke et al., 2015a). Die interpretierte P-Wellensektion aus der 3-D Seismik Nirranda-Heytesbury (oben; aus Ziesch et al., 2015a) wird von dem neu gemessenem Profil (unten) bis zur Erdoberfläche hochauflösend ergänzt.

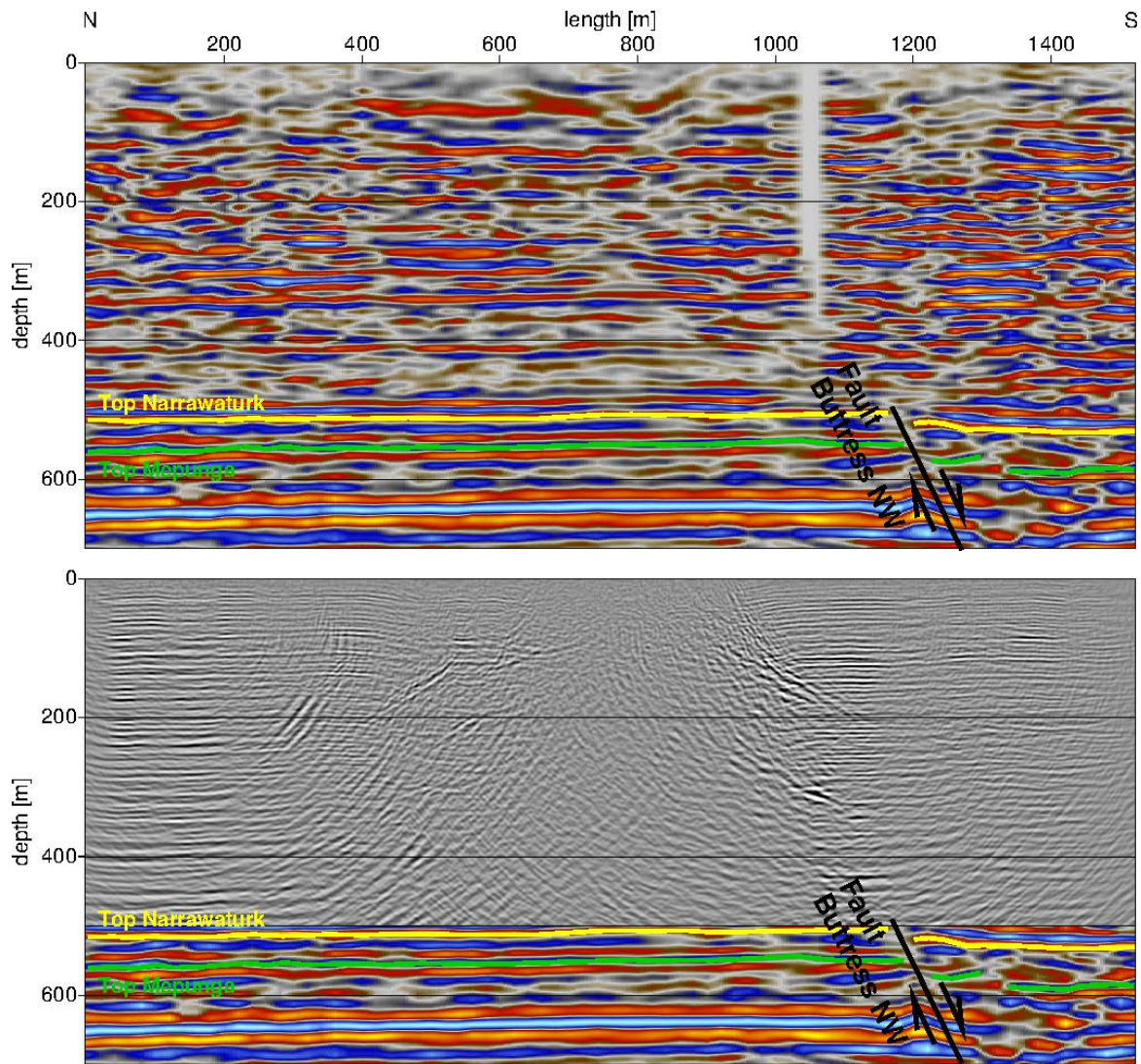
Die Reflexionen in den Scherwellendaten sind deutlich kontinuierlicher und aufgrund der Messgeometrie und der langsameren Ausbreitungsgeschwindigkeit der Scherwellen hochauflösender (Abb. 1.1.11). Zudem erkennt man geneigte Einsätze, die in den P-Wellendaten so nicht erkennbar sind. Diese, in einem Winkel von  $\sim 40^\circ$  verlaufenden Einsätze werden von uns als Aufschiebung interpretiert (Abb. 1.1.12). Da in der Tiefe eine abschiebende Störung bis etwa 300 m reicht, handelt es sich bei dieser Struktur vermutlich um eine invertierte Abschiebung (Abb. 1.1.12, unten). Diese invertierte Abschiebungsstruktur ist auch in der Topographie der Erdoberfläche entlang des Profils sichtbar (Abb. 1.1.12, oben). Unterhalb des obersten Reflektors der Aufschiebung sind weitere Reflexionsmuster zu erkennen, die das Bild im unteren Bereich etwas diffuser machen.



**Abbildung 1.1.12:** Detailinformationen entlang von Scherwellenprofil PROTECT 1. Die Topographie der Oberfläche, Refraktortiefe, Überdeckung und Refraktorgeschwindigkeit (oben) sowie die strukturelle Interpretation (unten) tragen zum Gesamtverständnis bei (Beilecke et al., 2015a).

Der Profilschnitt von PROTECT 2 ermöglicht mit den neu gemessenen Scherwellenreflexionsdaten ebenfalls ein höher aufgelöstes Abbild der obersten 500 m des Untergrunds und belegt die weitere Fortführbarkeit der Störung Buttress NW (Abb. 1.1.13). Allerdings unterscheidet sich das Strukturbild der Scherwellenseismik in zentralen Bereich des Profils stark von dem der P-Wellenseismik. Die Scherwellen zeigen zwar konsistent im Norden und Süden des Profils hoch-aufgelöste horizontale Reflexionen, aber der zentrale Bereich des Scherwellenprofils ist eher durch diffuse Elemente schwächerer Amplitude gekennzeichnet, die nicht interpretierbar erscheinen.



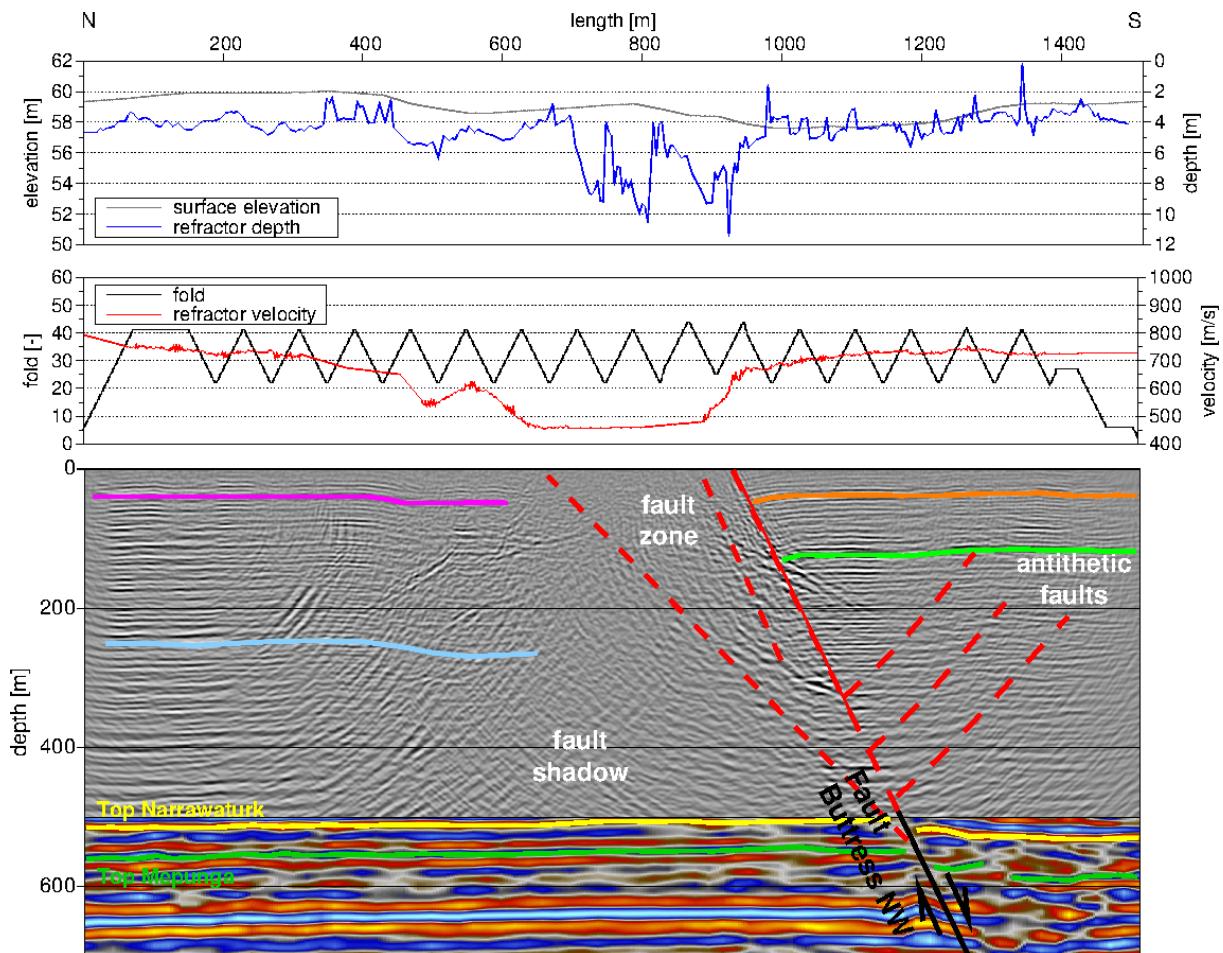


**Abbildung 1.1.13:** Profilschnitte entlang von Scherwellenprofil PROTECT 2 (Beilecke et al., 2015a). Die interpretierte P-Wellensektion aus der 3-D Seismik Nirranda-Heytesbury (oben; aus Ziesch et al., 2015a) wird von dem neu gemessenem Profil (unten) bis zur Erdoberfläche hochauflösend ergänzt.

Nimmt man entlang dieses Profils sowohl die Refraktorteufe als auch die Refraktorgeschwindigkeit insbesondere im zentralen Abschnitt zur Hilfe, so zeigen sich deutliche Anomalien (**Abb. 1.1.14**), welche sich durch stark variierende Refraktortiefen und insgesamt eine herabgesetzte Refraktorgeschwindigkeit auszeichnen. Diese Beobachtungen führten zu der Interpretation, dass der gesamte zentrale Abschnitt des Profils von der regionalen Abschiebung Buttress NW beeinflusst ist. Die Weiterentwicklung zu unserer ersten strukturellen Interpretation (vgl. Krawczyk et al., 2015a) zeigt nun sowohl antithetische Störungen als auch den Einflussbereich des Störungsschattens in Bezug auf die seismische Abbildung als solche (**Abb. 1.1.14**).

Unterstützung für diese These ergab sich aus einer 3-D Varianzanalyse der 3-D Seismik Nirranda-Heytesbury (**Abb. 1.1.15**). Es zeigt sich, dass der zentrale Abschnitt des Scherwellenprofils in einem Bereich des 3-D P-Wellendatensatzes liegt, der sich im Varianzbild deutlich von den benachbarten Gebieten abhebt. Dazu wurde ein Schnitt durch die Varianzabbildung der 3-D Seismik in 432 m Tiefe gelegt, der dem obersten, noch abbildbarem Bereich dieses Datensatzes entspricht. Der zentrale Abschnitt erscheint als eher ungestört (transparenter Bereich in **Abb. 1.1.5** und horizontale Reflektoren

in *Abb. 1.1.13*, oben), während sich der gleiche Abschnitt in dem Scherwellenprofil als diffus und von starken, steilstehenden Reflexionselementen begrenzt abbildet (*Abb. 1.1.13*, unten).

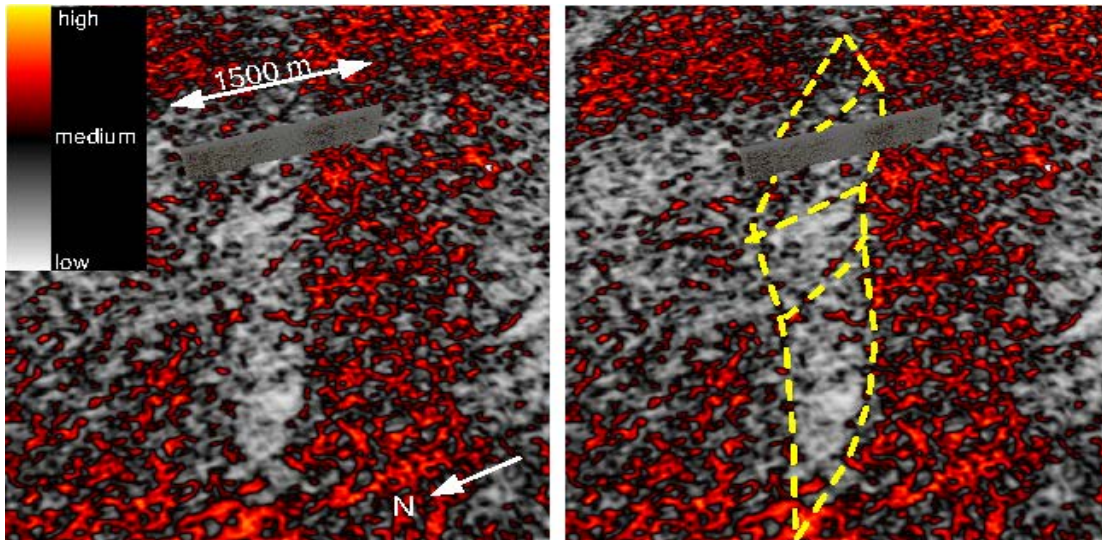


**Abbildung 1.1.14:** Detailinformationen entlang von Scherwellenprofil PROTECT 2. Die Topographie der Oberfläche, Refraktortiefe, Überdeckung und Refraktorgeschwindigkeit (oben) sowie die strukturelle Interpretation (unten) tragen zum Gesamtverständnis bei (Beilecke et al., 2015a).

Dieser scheinbare Gegensatz läßt sich folgendermassen erklären und diskutieren:

- Störzonen gehen oft mit einer reduzierten Scherfestigkeit des Gesteins einher. In einer P-Wellensektion ist die Auswirkung einer reduzierten Scherfestigkeit weniger stark, da sich P-Wellen im Untergrund z.B. auch über ein Porenfluid ausbreiten können. Scherwellen können dies nicht, sodass die Auswirkung in Scherwellenprofilen deutlicher ausgeprägt ist. Dieser Effekt ist entlang von PROTECT 2 stärker als entlang von PROTECT 1.
- Des weiteren ist zu erwarten, dass auch die oberflächennahen Schichten - insbesondere dort, wo die Refraktorgeschwindigkeiten niedrig sind- unkonsolidierter als das Nebengestein sind. Damit werden sie die Scherwellensignale stärker dämpfen.
- Als zusätzlichen Aspekt kann man 3-D Effekte in der Abbildung mit 2-D Scherwellendaten erwarten. So sind z.B. Störzonenelemente in den P-Wellendaten enthalten (siehe gestrichelte Linien in *Abb. 1.1.15*, rechts), die schräg zum Verlauf des Profils PROTECT 2 streichen. Solche Strukturen können nicht-reale Strukturelemente in 2-D Abbildungen verursachen.

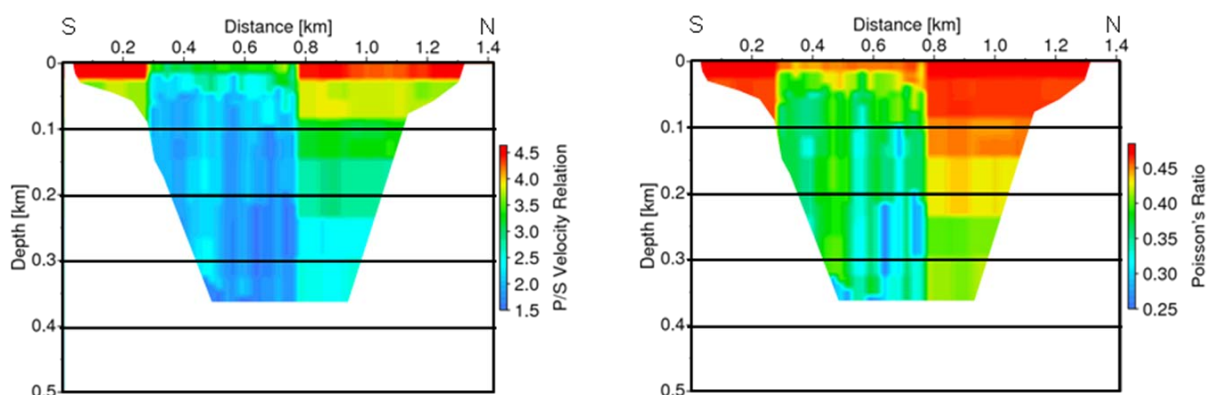




**Abbildung 1.1.15:** Varianzbild der 3-D Seismik (P-Welle) Nirranda-Heytesbury in einer Teufe von 432 m unter NN; in die Schrägansicht ist das Scherwellenprofil PROTECT 2 zusätzlich projiziert (Beilecke et al., 2015a). Die komplexe Störungszone Buttress NW bildet sich transparent ab (links) und kann eindeutig räumlich interpretiert werden (rechts).

Die beim Projektpartner CO2CRC vorhandenen P-Wellendaten (Pevzner et al., 2010; siehe Teil I, Kap. 1.7) waren bereits zu Beginn der Arbeiten in Hinblick auf die Planung der Feldmessungen detailliert analysiert worden. Nach Abschluss des Prozessings der Scherwellenseismik kamen wir darauf aber erneut zurück, um elastische Parameter zu bestimmen (*Abb. 1.1.16*). Unter anderem konnten entlang der Sodas Road, auf der auch das Profil PROTECT 3 liegt (siehe Lokation in *Abb. 1.1.6*), Scherwellenreflexionen in einem Datensatz identifiziert werden, der mit Vertikalvibratoren und Vertikalgeophonen gemessen worden war.

Wir vermuten, dass es sich bei den identifizierten Scherwellenanteilen um SV-polarisierte Wellen handelt. Die daraus ermittelten P- und S-Wellengeschwindigkeiten ergaben jedoch ein ungewöhnlich hohes Geschwindigkeitsverhältnis entlang des Profils (*Abb. 1.1.16*, links). Die neuen Messungen mit Scherwellen, die rein auf die SH-Polarisierung ausgelegt sind, zeigen hingegen höhere Geschwindigkeiten der S-Wellen in dem gemessenen Abschnitt (*Abb. 1.1.16*, zwischen 0,3-0,8 km Distanz) und somit ein kleineres P/S-Geschwindigkeitsverhältnis (Beilecke et al., 2015b).



**Abbildung 1.1.16:** Abgeleitete elastische Parameter entlang eines P-Wellenprofils, das das S-Wellenprofil PROTECT 3 lateral zwischen 0,3-0,8 km überstreicht. Das Verhältnis von P- zu S-Wellengeschwindigkeit (links) und das Poisson Verhältnis (rechts) zeigen oberflächennah eine höhere Detaillierung durch die gemessenen Scherwellenanteile.



Die sich daraus ergebenden Poissonzahlen sind entsprechend als Werte abgebildet, die rein auf gemessenen P-Wellendaten und auf gemessenen P-Wellendaten plus gemessenen S-Wellendaten beruhen (*Abb. 1.1.16*, rechts). Die sich aus den P- und SV-Wellendaten ergebenden Werte erscheinen zu hoch, wohingegen die Werte aus den SH-Messungen in der Größenordnung von erwarteten Werten liegen. Unterschiede in den Scherwellengeschwindigkeiten zwischen SV und SH können ihre Ursache in scheinbarer Anisotropie aufgrund der dünnen Schichten im Kalkstein haben. Dies wird ebenso wie eine Einbindung von vorhandenen Bohrungsdaten zurzeit noch untersucht (Beilecke et al., 2015b).

### **1.1.3 Kooperation innerhalb des Verbunds**

AP1 war eng mit APs2-4 für die Interpretation und den Aufbau des 3-D Strukturmodells verknüpft; AP2 untersetze durch die verfeinerte Abbildung die Störungsbewertung iterativ; der Austausch von gesteinsphysikalischen Parametern zur geomechanischen Modellierung fand mit AP3 statt (elastische Eigenschaften,  $V_p$ ,  $V_s$ , etc.); strukturelle Parameter und Modelle lieferten wir an AP4 zur Visualisierung.

### **1.1.4 Zusammenfassung**

Die neu erarbeitete Interpretation des 3-D Untergrundmodells und die gründliche Bearbeitung von Störungsflächen haben die detaillierte strukturelle Bestandsaufnahme des Untersuchungsgebietes und das Verstehen von dessen Entwicklung ermöglicht. Die Retrodeformation belegt die Segmentierung des untersuchten Bereiches und die daraus abgeleitete sichere Position der Injektionsbohrung.

Die vorhergesagten Bereiche erhöhter Deformation wurden an den wichtigsten Stellen im Untersuchungsgebiet mit hochauflösenden, scherwellenseismischen Experimenten vermessen. Der im Explorationsvolumen seismisch nicht abgebildete Bereich der obersten 500 m des Untergrunds konnte komplett erfasst, vermutete Störungen abgebildet und die Geschwindigkeiten bis ca. 250 m Tiefe bestimmt werden. Mit Hilfe der neuen Daten konnten schliesslich elastische Parameter flächig abgeleitet werden.

Insgesamt haben wir damit zur sub-/seismischen Abbildung beigetragen, die subseismische Lücke verkleinert, und Lokationen für ein angepasstes Überwachungskonzept vorgeschlagen.

## 1.2 Räumliche Kartierung von Brüchen und Störungen (Arbeitspaket 2)

*Einrichtung:* TEEC GmbH Isernhagen (FKZ 03G0797B)

*Projektleitung:* Dr. Henning Trappe

*Beteiligte Wissenschaftler\_innen:* Andrea Lippmann, Dr. Jürgen Prüssmann

*Zusammenarbeit mit anderen Stellen:* keine.

### 1.2.1 Aufgabenstellung

Brüche und Störungen bieten bevorzugte Wege für den Aufstieg und die mögliche Leckage von CO<sub>2</sub>. Deshalb sollten mit hochauflösendem Kohärenzprocessing klein-skaligen Brüche bis groß-skalige Störungen detektiert werden. Eine Reihe von störungs- und bruchbezogenen Attributen wird aus 2-D und 3-D seismischen Daten abgeleitet, indem Attribute wie Bruchdichte und spezifische Konnektivität berechnet werden. Zwei weitere Attribute sollten implementiert werden: ein richtungsabhängiges Attribut zur räumlichen Verteilung von Störungsrichtungen als direkte Verbindung zum lokalen Stressfeld sowie die lokale *Curvature*, die ein Maß dafür ist, wie stark eine Oberfläche an einem spezifischen Punkt gebogen ist. Dies hilft dabei, Störungen als Ergebnis von Stress vorher zu sagen. Ebenfalls können so morphologische Merkmale wie Kanäle einfacher detektiert werden. Falls eine 3-D seismische Basismessung und deren 3-D Wiederholung in gleicher Untergrundüberdeckung vorhanden wären, ist die Zeitkomponente ebenfalls zu betrachten.

### 1.2.2 Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Hier werden zunächst die grundlegenden Prinzipien für die Software-Implementierung beschrieben und danach die Anwendung auf den Datensatz im Otway Becken erläutert. Nur die wichtigsten Abbildungen sind hier direkt im Berichtsteil eingefügt. Weitere Abbildungen sind im Anhang (Teil IV, *Abbildungen A1-A81*) zu finden, um den Bericht lesbar zu halten.

#### *Detailbeschreibung zur Softwareentwicklung*

Gemäss der Beschreibung der Aufgaben im Antrag, werden hier die Softwaremodule beschrieben.

#### Krümmungsberechnung an Horizonten und Störungen

Bei der Auswertung von Horizonten, die als eine Fläche der seismischen Laufzeit oder der Tiefe ermittelt wurden, werden vor allem die lokale Neigungsrichtung und deren Änderung bestimmt, so dass die hier eingesetzten Verfahren als richtungsabhängige Werkzeuge bezeichnet werden können. Die lokale Neigungsrichtung ergibt sich als Gradient aus der ersten Ableitung des Horizontes nach den horizontalen räumlichen Koordinaten mit Neigungsazimut und Neigungswinkel. Die Neigungsänderung folgt aus der zweiten räumlichen Ableitung des Horizontes und wird auch als Krümmung oder *curvature* bezeichnet. Die Krümmung ist allgemein von der Raumrichtung abhängig, und wird daher in der Regel durch zwei Krümmungswerte und eine Richtung angegeben. Die hier implementierte Horizontauswertung folgt dem Algorithmus von Roberts (2001).

In der geologischen Interpretation wird der Verlauf von Störungen durch diskrete Punkte gekennzeichnet. Die Krümmungsberechnung an Störungen geht davon aus, dass jeder dieser Punkte als sogenannter Wendepunkt eine Krümmung definieren kann. Die Krümmung an einem vorhandenen Störungspunkt wird daher aus dem teilweise interpolierten Störungsverlauf berechnet, indem zwei Hilfspunkte um diesen vorhandenen zentralen Punkt gesetzt werden. Diese Prozedur wird entlang der gesamten Störung ausgeführt. Der Abstand dieser Hilfspunkte auf den Störungen zum zentralen Störungspunkt ist frei wählbar, allerdings muss softwareseitig sichergestellt sein, dass es keine Überschneidungen der Hilfspunkte von zwei benachbarten Störungspunkten gibt. Außerhalb

des Bereichs der Hilfspunkte ist die Krümmung der Störung Null. Die Krümmungswerte werden auf einem Gitter bestimmt, dessen Größe vom Benutzer frei wählbar ist. Für jede Gittereinheit wird ein Wert ausgegeben. Gibt es in einer Einheit mehrere Wendepunkte oder mehrere Störungen, wird je nach Benutzerwunsch der Minimalwert, Maximalwert, Mittelwert oder Median ausgewählt und berechnet. Gittereinheiten ohne Störung werden als NAN-Werte (Not A Number) gekennzeichnet.

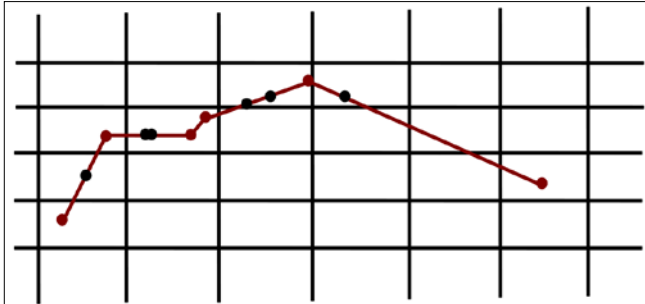


Abbildung 1.2.1: Prinzip der Krümmungsberechnung (Störungspunkte: braun, Hilfspunkte: schwarz).

### Richtungsberechnung der Störungen

Zur Richtungsberechnung wird der Winkel der Störung gegen Nord berechnet. Dies geschieht wie bei der Krümmung anhand des vom Benutzer durch diskrete Punkte bestimmten Störungsverlaufs. Am Anfang der Störung und zwischen allen internen Wendepunkten wird die Abweichung von der Nordrichtung berechnet. Auch die Winkel der Störungen werden nun auf das horizontale Gitter übertragen. Dafür werden für jede Gittereinheit die Winkel der darin liegenden Störungsabschnitte ermittelt. Für eine gewichtete Bestimmung wird auch die Länge eines Störungsabschnittes zusammen mit seiner Richtung berücksichtigt.

Die Winkel werden ausgewertet, eine Hauptrichtung ermittelt und der in dieser Gittereinheit liegenden Störung zugewiesen. Gibt es mehrere Winkel in einer Einheit, kann der Winkel gewählt werden, welcher der Hauptrichtung am nächsten kommt oder der mit der längsten oder kürzesten Störung in diesem Bereich. Die Software gibt außerdem an, wie viele Winkel in einer Analyseeinheit gefunden wurden und ob mehr als eine Hauptrichtung gefunden wurde.

### Implementierung von Multiattributen

Es wurden verschiedene arithmetische Operationen innerhalb der 2-D und 3-D Visualisierung implementiert. Diese können auf einzelne oder mehrere Attribute angewendet werden. Dabei ist eine beliebige Kombination der arithmetischen Operationen zu sogenannten Multiattributen möglich. Die einfachen Operatoren wurden um gewichtete Operatoren ergänzt, welche zusätzlich die geologische Modellvorstellung berücksichtigen.

### Visualisierung der Ergebnisse in 2-D und 3-D

Im Rahmen dieses Projekts wurde eine neue Visualisierung der Ergebnisse in der 2-D und 3-D Darstellung implementiert. Diese berücksichtigt in der 3-D Darstellung den Horizont als Reliefdarstellung. Durch die Wahl der Farbgebung, Intensität und Beleuchtung können die Fragestellungen durch die Hervorhebung unterschiedlicher Teilbereiche besser analysiert werden.

Die bisherigen Darstellungen erfolgten über In- und Crossline-Darstellung. Die neue Visualisierung bezieht sich auf Koordinaten, und die Darstellung erfolgt wie auf einer Landkarte, wobei die Nordrichtung zum oberen Bildrand zeigt. Dies ermöglicht einen besseren Vergleich mit anderen Darstellungen oder Literaturbeispielen. Alle Abbildungen in diesem Bericht wurden so erstellt.

Die Anwendung der IHS-Methode, eine Gestaltung des Farbverlaufes durch *Intensity*, *Hue* und *Saturation*, kann zusätzlich eine detaillierte Darstellung des Störungsinventars zeigen. Dabei wird die

Kohärenz als Intensität oder Graustufe, der Azimut als *Hue* oder Farbton, und der Neigungswinkel als *Saturation* oder Farbsättigung dargestellt. Durch die Änderung der Farbzuoordnung für diese drei Attribute (z.B. Endres et al., 2008) werden auch komplizierte Störungssysteme gut abgebildet.

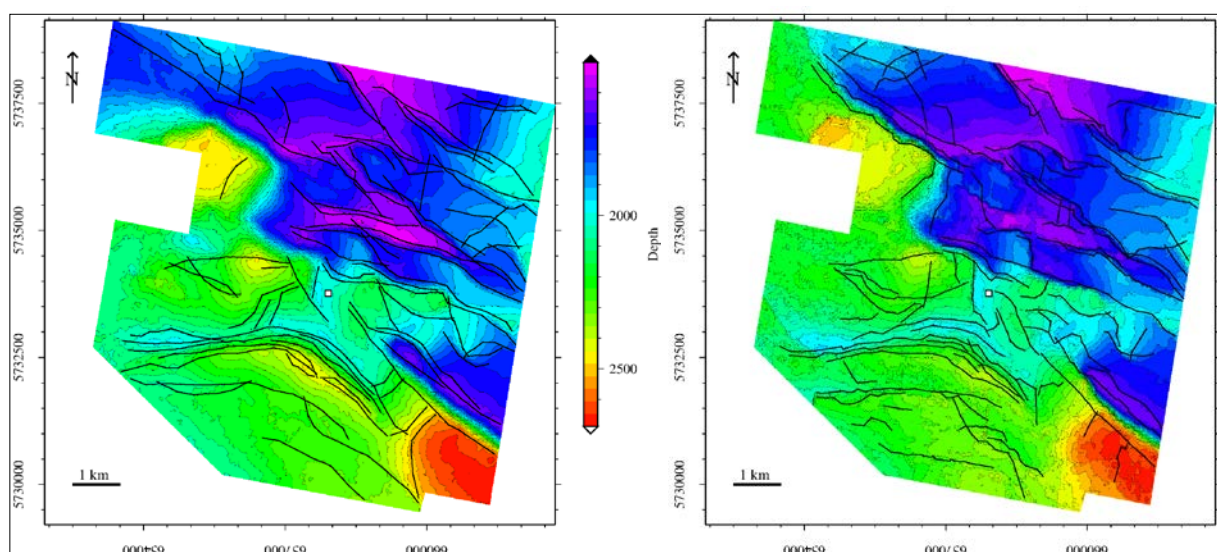
### **Projekteinrichtung und vorbereitende Arbeiten für die Kohärenzberechnung**

Die Konzentration der Arbeiten lag in der ersten Projektphase auf der Entwicklung der neuen, richtungsabhängigen Werkzeuge. Die aus Australien erhaltene 3-D Seismik im Zeitbereich enthielt jedoch interpretierte Horizonte, die als Voraussetzung für die Kohärenzberechnung und die richtungsabhängigen Attribute noch nicht ausreichten. Die Horizonte und die Störungen wurden daher von APs 1 und 3 neu interpretiert (Kap. 1.1; Ziesch et al., 2015a).

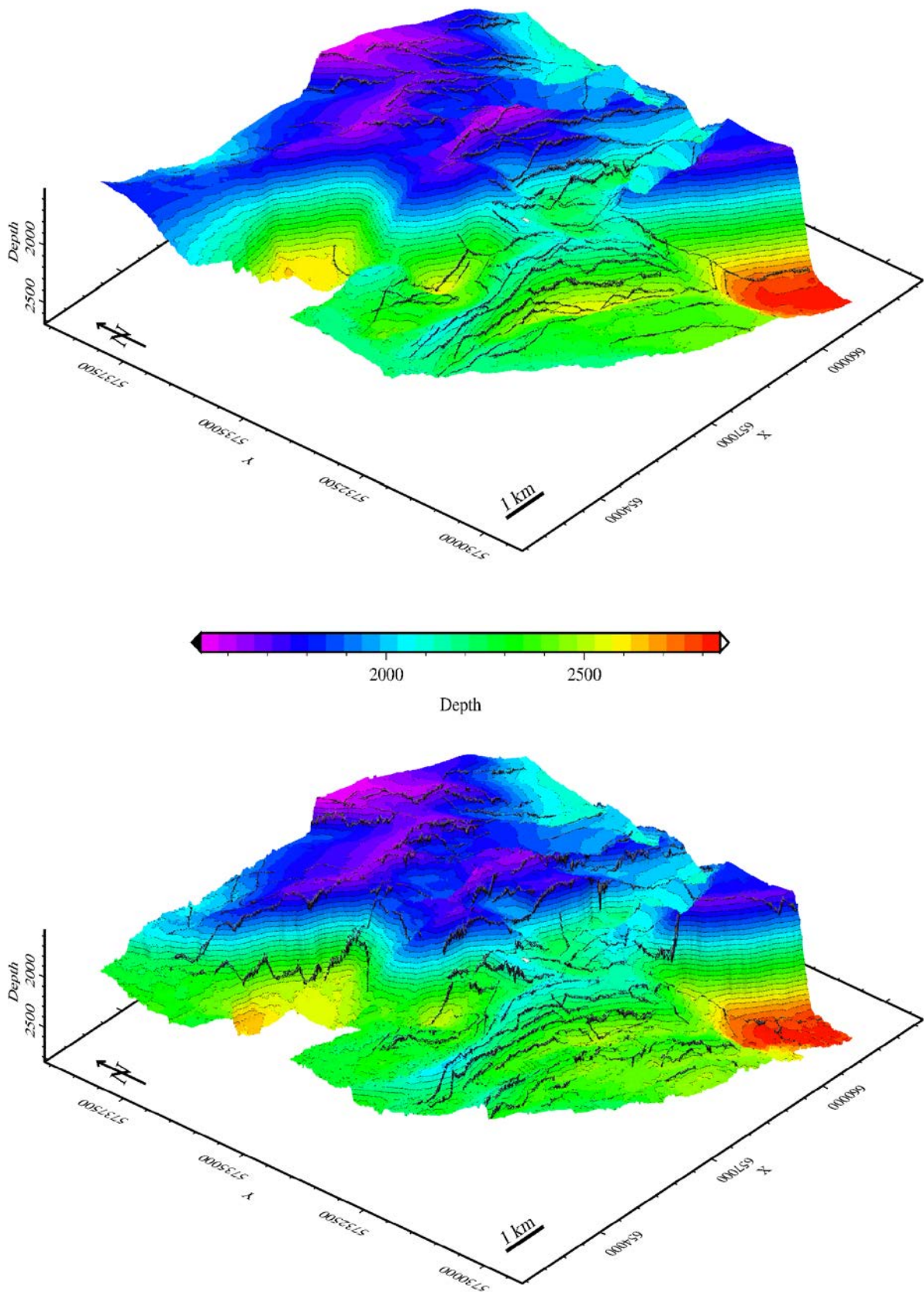
Aufgrund der variablen und vielfach schlechten seismischen Datenqualität war die Konsistenz dieser Horizontabschätzung jedoch zu gering, um eine Interpolation von diesen Linien auf die gesamte Fläche zu ermöglichen, so dass eine komplette Überarbeitung des vorliegenden Horizontes vorgenommen wurde. Es wurden unterschiedliche Softwareprogramme verwendet, um zuerst eine manuelle Horizont-Bestimmung auf *In-* und *Crosslines* vorzunehmen. Eine konsistente Horizont-Bestimmung erwies sich als sehr schwierig. Deshalb kam in einem weiteren Versuch ein Programm zum Einsatz, welches eine automatische Horizont-Bestimmung, ausgehend von einigen Startpunkten (*seeds*) entlang der seismischen Phase des Horizonts berechnet.

Die generelle Unsicherheit des Horizontverlaufes in den Bereichen mit geringer seismischer Datenqualität zeigt sich auch in lokalen Inkonsistenzen. Es wurden daher verschiedene Algorithmen zur lokalen Glättung dieser Inkonsistenzen implementiert, welche mittels Median-Berechnung oder durch gewichtete Mittelwerte bestimmt und beseitigt werden konnten. Mit dieser Bearbeitung, welche die Artefakte im Horizont deutlich verringerte, konnten die Kohärenz berechnet, die Störungsinterpretation vorgenommen und die Attribute bestimmt werden.

Die im Zeitbereich vorliegenden seismischen Daten des Otway Beckens inklusive der Horizont- und Störungsinformationen wurden von AP1 mit den Geschwindigkeitsinformationen aus den Bohrungen in die Tiefe gestreckt und zur Verfügung gestellt. In diesem Tiefenvolumen wurde die Horizontbestimmung genauso überarbeitet, wie es auf den zeitseismischen Daten zuvor geschehen war. Der daraus resultierende Tiefenverlauf der Top Waarre und Top Eumeralla Horizonte konnte dadurch in 2-D (*Abb. 1.2.2*) und 3-D (*Abb. 1.2.3*) dargestellt werden.



**Abbildung 1.2.2:** 2-D Tiefenverlauf der Horizonte Top Waarre (links) und Top Eumeralla (rechts) inklusive interpretierter Störungsspuren.



**Abbildung 1.2.3:** 3-D Tiefenverlauf der Horizonte Top Waarre (oben) und Top Eumeralla (unten) inklusive interpretierter Störungen.

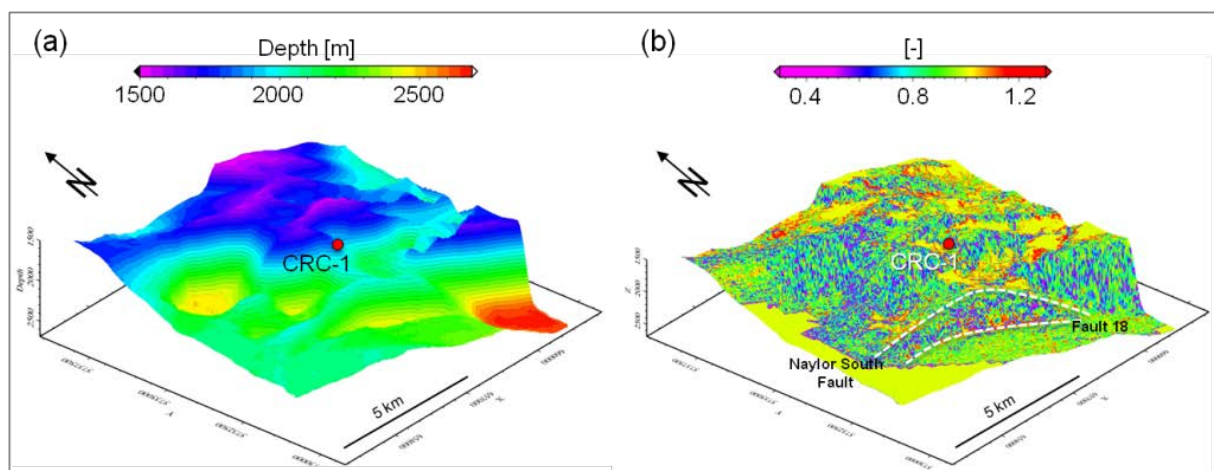


### Ergebnisse der Kohärenz und Krümmungsbearbeitung der 3-D-Seismik im Otway Becken

Die Horizontauswertung wurde auf das seismische Poststack-Volumen des Otway Beckens mit vielfältigen Möglichkeiten zur Analyse und Herausarbeitung bestimmter Strukturen angewendet. Es zeigte sich, dass eine äußerst detailreiche Horizont-Interpretation erforderlich ist, um eine gute Auflösung zu erzielen. Dies schließt die üblichen Interpolations- und Glättungsschritte aus, welche die Interpretation vereinfachen und stabilisieren. Diese Schritte beeinflussen direkt die räumlichen Ableitungen des Horizontverlaufs und damit die Neigungsberechnung und insbesondere die Krümmungsberechnung.

Die verschiedenen, oben beschriebenen Kohärenzwerkzeuge wurden angewendet. In den folgenden Abbildungen, insbesondere im Anhang (Teil IV) sind der Kohärenzwert als  $v$  und die Bohrung als rotes Quadrat dargestellt. Alle Berechnungen und Abbildungen beziehen sich auf eine  $\sim 80 \text{ km}^2$  große Fläche. Die Werte der Kohärenz liegen zwischen 0 und 1, wobei vollständig inkohärente Ereignisse mit dem Wert 0 schwarz und vollständig kohärente Ereignisse mit dem Wert 1 weiß dargestellt werden.

Es zeigte sich, dass für die Operatoren der Median-Kohärenz und der gewichteten Kohärenz ein deutlich besseres Auflösungsvermögen als bei Verwendung der anderen Algorithmen der Kohärenzberechnung auftritt (siehe Beispiel in **Abbildung 1.2.4**). Diese Auswertungen sind im Anhang ausführlich für die Horizonte Top Waarre (Teil IV, Abbildungen A7-A10) und Top Eumerella (Teil IV, Abbildungen A11-A14) dargestellt. Es lassen sich für beide Horizonte folgende Beobachtungen festhalten: 1) eine detailliertere Auflösung der lokalen Kohärenzmessung ergibt sich durch das kleinere Analysevolumen von  $3 \times 3 \times 3 \text{ km}$  (Teil IV, Abbildungen A7, A8, A11, A12) gegenüber dem Analysevolumen von  $5 \times 5 \times 5 \text{ km}$  (Teil IV, Abbildungen A9, A10, A13, A14); 2) die gewichtete Kohärenz zeigt einen deutlicheren Kontrast und ist besser für die Interpretation geeignet (Teil IV, Abbildungen A8, A10, A12, A14).



**Abbildung 1.2.4:** Abbildung des Top Waarre Horizonts (Reservoir) mit unterschiedlichen Attributen in 3-D (nach Krawczyk et al., 2015a). Die Tiefenkarte (a) ist wesentlich weniger aufgelöst als die Darstellung der kombinierten Attribute Median-Kohärenz und Minimumkrümmung (b).

Die 3-D Darstellung der besten Ergebnisse zeigt auch die Gebiete mit schlechter Datenqualität auf, die durch entweder Messung oder Unregelmäßigkeiten im Processing entstanden sind (Teil IV, Abbildungen A15-A18). Gebiete mit starker Morphologie sind durch geringe Kohärenz gekennzeichnet. Zusätzlich zeigen sich gute Ergebnisse in der Dispersion und für das beleuchtete Relief (Teil IV, Abbildungen A19-A22), für die strukturelle Entropie und andere Methoden. Diese

liefern zusätzliche Informationen und sind in Zusammenhang mit dem Median und der gewichteten Kohärenz zu interpretieren.

Unter den verschiedenen Attributen der Horizontkrümmung (Teil IV, Abbildungen A33-A37) wies die maximale absolute Krümmung die beste Auflösung von strukturellen Lineamenten auf. Die Krümmungsberechnungen für die Horizonte Top Waarre (Teil IV, Abbildungen A23-A26) und Top Eumeralla (Teil IV, Abbildungen A27-A30) belegen dies. Die maximale und minimale Krümmung besitzen eine höhere Auflösung, während bei dem größten und kleinsten vorzeichenbehafteten Wert (*most positive/most negative*) die internen Strukturen verschwimmen. Die Werte der Krümmung sind symmetrisch um Null verteilt.

Dieses Ergebnis entspricht den Erwartungen, da eine Neigungsänderung oder Krümmung vor allem an Störungen sehr wahrscheinlich ist und in beide vertikalen Richtungen verläuft. Auch bei einem rein linearen Versatz von zwei Schichten treten an der Störung oft lokale Neigungsänderungen durch Mitschleppen der Schichtenden auf. Die am stärksten positive Krümmung (Teil IV, Abbildungen A31, A32) zeigt in der 3-D Darstellung, dass die Krümmung mit der Morphologie korreliert.

### ***Interpretation der Störungen und Brüche***

Die Störungen wurden anhand der Kohärenz- und Krümmungsmethoden mittels der TEEC-Software interpretiert (Teil IV, Abbildungen A1, A2). Dabei wurde besonderes Gewicht auf die mediane Kohärenz und die maximale Krümmung gelegt. Die Störungen zeichnen sich durch niedrige Kohärenz und hohe Werte für die Krümmung aus. Die Vorzugsrichtung der interpretierten Störungen verläuft von West nach Ost. Im Untersuchungsgebiet wurden sowohl einzelne Störungen als auch große Störungssysteme analysiert, die durch mehrere parallel verlaufende Störungen charakterisiert sind. Einige Störungen verlaufen von Süd nach Nord und kreuzen die von West nach Ost verlaufenden Störungen. Diese Vorzugsrichtungen spiegeln sich auch in den FMI-Daten der Bohrung CRC-1 wider (Krawczyk et al., 2015a).

### ***Bestimmung der Störungsattribute***

Für die oben beschriebenen interpretierten Störungen wurden die Störungsattribute bestimmt. Diese umfassen die Dichte, die Länge der Störungen innerhalb einer Analysefläche und die Verbundenheit. Außerdem wurden die neu entwickelten Attribute angewendet: maximale, minimale, mediane und gemittelte Störungskrümmung der normale und gewichtete Störungswinkel gegen Norden sowie die maximale und minimale Totallänge der Störungen. Alle neu entwickelten Attribute wurden für die Horizonte Top Waarre und Top Eumeralla berechnet und sind im Anhang aufgeführt (Teil IV, Abbildungen A59-A61 und Abbildungen A67-A69).

Für das Reservoir, den Top Waarre Horizont, zeigen die Auswertungen die Anzahl der Störungen (Teil IV, Abbildungen A56, A64), die Gesamtlänge der Störungen innerhalb einer Analysefläche (Teil IV, Abbildungen A57, A65), die Verbundenheit (Teil IV, Abbildungen A58, A66) sowie die Kombination von der Verbundenheit mit der Länge der Störungen (Teil IV, Abbildungen A62, A70).

### ***Korrelation und Kombination von Attributen***

Für den Top Waarre Horizont und die gewichtete Kohärenz ist die Standardfarbzuordnung der IHS-Darstellung mit Rotation um vier verschiedene Azimute (0°, 90°, 180° und 270°) erstellt worden (Teil IV, Abbildungen A38-A41). Die Horizont-Krümmung wurde auch als Intensität dargestellt und für die vier verschiedenen Azimutrotationen der Farbzuordnung abgebildet (Teil IV, Abbildungen A42-A45). Für den Horizont Top Eumeralla ist die Darstellung mit der IHS-Methode für die Kohärenz (Teil IV, Abbildungen A46-A49) und für die Krümmung des Horizontes (Teil IV, Abbildungen A50-A53) zu sehen.

Die Kombination der Störungsattribute bietet vielseitige Möglichkeiten zur Auswertung. Folgende Kombinationen wurden ausgeführt: Länge und Verbundenheit sowie Länge und Anzahl für Top

Waarre (Teil IV, Abbildung A63) und für Top Eumeralla (Teil IV, Abbildung A81); schließlich Anzahl und fraktale Dimension (Teil IV, Abbildungen A75, A76). Die Vorarbeiten dazu (Teil IV, Abbildungen A72-A74) und ersten Auswertungen sind an Ende zusammen gefasst (Teil IV, Abbildungen A71-A81).

### ***Vergleich Multiattribute und ant-tracking***

Das *ant-tracking* ist eine Berechnung, die für die Störungsinterpretation verwendet wird und z.B. im Programmpaket PETREL implementiert ist. Für das seismische 3-D Volumen im Otway Becken hat AP3 diese Routine im Rahmen der Interpretation der Horizonte und Störungen erzeugt und zum Vergleich zur Verfügung gestellt.

Die in AP2 interpretierten Störungen und Strukturen basieren auf den Ergebnissen der Kohärenz- und Krümmungsberechnung, die durch das interaktive Wechseln zwischen den einzelnen Methoden alle Aspekte einbezieht. Anhand dieser Methode sind der Verlauf der Störungen und der Aufbau der Störungssysteme deutlicher nachvollziehbar, als wenn man sich nur auf eine Methode, beispielsweise das *ant-tracking* bezieht. Dies ist ein Vorteil der Störungsbestimmung anhand der Kohärenz, die des Weiteren eine höhere Auflösung besitzt. Weiterhin können durch die neue Visualisierung der Ergebnisse die Strukturen in der Kohärenz besser verdeutlicht werden.

Mit Kohärenz und Krümmungsberechnung können Störungssysteme mit inneren Störungsverläufen untergliedert und damit detaillierter bestimmt werden, wohingegen der selbe Bereich im *ant-tracking* eher verschwommen dargestellt wird. In Bereichen schlechter Datenqualität sind die Unterschiede zwischen den Kohärenz-Methoden und dem *ant-tracking* sogar ausgeprägter. Während in der Darstellung der Kohärenz die Gebiete mit schlechter Datenqualität eindeutig mit niedriger Kohärenz korrelieren, sind in den Daten des *ant-tracking* ähnliche Strukturen wie in den Bereichen mit guter Datenqualität sichtbar (Teil IV, Abbildungen A3-A21, mit TOP7-Top Waarre und TOP8-Top Eumeralla). Die Attributanalyse ermöglicht somit eine bessere Qualitätskontrolle der Interpretation.

### **1.2.3 Kooperation innerhalb des Verbunds**

AP2 war eng mit AP1 für die Interpretation des 3-D Strukturmodells verknüpft; mit AP3 wurde der Vergleich zum *ant-tracking* vorgenommen; strukturelle Parameter und Modelle sollten an AP4 zur Visualisierung zur Verfügung gestellt werden.

### **1.2.4 Zusammenfassung**

Die in PROTECT vorgenommenen Entwicklungen zur Kohärenz und Krümmungsberechnung entlang von Horizonten ergänzen vorhandene Techniken, indem die Berechnung der Krümmungs- und Richtungsattributen in die bestehende TEEC-Software integriert wurde (AP2). Diese Algorithmen verbessern die Interpretation des Störungs- und Bruchinventars. Die neuen Horizont- und Störungsattribute eröffnen zusätzliche Möglichkeiten zur Charakterisierung von bestimmten Bereichen eines Speichers bzw. einer Lagerstätte. Die physikalischen Parameter und das Speicherverhalten dieser Bereiche kann durch Korrelation mit Bohrungen genauer eingegrenzt werden, so dass flächendeckende Aussagen zum Speicher möglich sind.



### 1.3 Stressvorhersage mit geomechanischer Vorwärtsmodellierung (Arbeitspaket 3)

*Einrichtung:* TU Darmstadt (FKZ 03G0797C)

*Projektleitung:* Prof. Dr. Andreas Henk

*Beteiligte Wissenschaftler\_innen:* Chiara Aruffo, Bastian Weber

*Zusammenarbeit mit anderen Stellen:*

- Wissenschaftliche Kooperation mit Schlumberger Geomechanics Centre of Excellence, Bracknell, UK (Dr. N. Koutsabeloulis, Dr. J. Herwanger) zu hydro-mechanisch gekoppelten Modellierungen
- Wissenschaftlicher Austausch mit CISRO, Kensington, Australia (Dr. T. Dance) zur regionalen Geologie und zu geomechanischen Lagerstättenmodellierungen

#### 1.3.1 Aufgabenstellung

Die Aufgabe dieses APs ist die Entwicklung und Anwendung eines geomechanischen Modells, das die 3-D geometrische und lithologische Komplexität eines CO<sub>2</sub>-Reservoirs und seines Oberbaus beschreibt. Solche numerischen Modelle sind für eine robuste Vorhersage des rezenten tektonischen Stressfelds und insbesondere von lokalen Perturbationen in Stressmagnitude und -orientierung nahe von Störungen oder lithologischen Grenzen notwendig. Während die verwandte numerische Technik der Finiten Element Methode generell anwendbar ist, sind die Untergrundgeometrie, Materialparameter und Randbedingungen des Vorwärtsmodells ganz spezifisch für die CO<sub>2</sub>CRC-Studie im Otway Becken anzupassen (Teilaspekt a). Insbesondere sollte das numerische Modell mit mechanischen Eigenschaften versehen werden, die an Bohrungen kalibriert und ihrer räumlichen Verteilung (vertikal und lateral) an die Seismik angelehnt werden (Teilaspekt b). Damit sollte ein erprobter Workflow von allgemeiner Relevanz für die Untergrundcharakterisierung erzeugt werden, der geophysikalische Explorationsmethoden und geomechanische Modellierungen miteinander kombiniert.

#### 1.3.2 Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

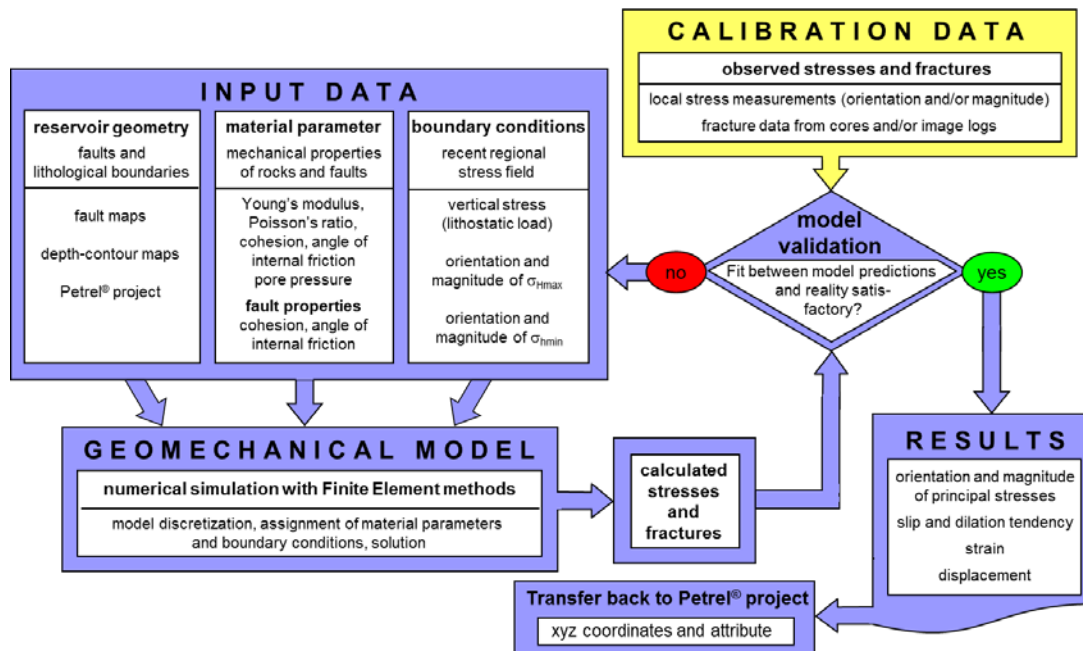
In diesem Arbeitspaket wurden zwei Hauptzielsetzungen verfolgt und dazu zwei Projektmitarbeiter beschäftigt. Deren Arbeiten werden deshalb nachfolgend in zwei Unterkapitel gegliedert und erläutert.

##### 1.3.2a Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse ‚Geomechanische Charakterisierung des Otway Site‘

Die Arbeiten dieses Teilprojektes zielten zum einen auf eine Charakterisierung des rezenten tektonischen Spannungsfeldes. Entsprechende Spannungsinformationen sind grundlegend für die optimale Erschließung und sichere Nutzung eines CO<sub>2</sub>-Speichers, z.B. für Fragen der Bohrlochstabilität bei der Planung von Injektionsbohrungen sowie für die Beurteilung der Störungsstabilität. Dazu wurde ein geomechanisch-numerisches Modell für das CO<sub>2</sub>CRC Otway Projekt erstellt, das sowohl Reservoirhorizont und Abdeckung als auch den gesamten Oberbau des Speichers erfasst. Zum anderen wurde im Rahmen des Teilprojektes die Porendruckentwicklung während der vorlaufenden Erdgasproduktion und der anschließenden CO<sub>2</sub>-Injektionsphase mittels eines hydromechanisch gekoppelten Detailmodells untersucht. Ein entsprechend an Daten kalibriertes Modell erlaubt Prognosen zu den für einen sicheren Betrieb des CO<sub>2</sub>-Speichers maximal möglichen Injektionsdrücken und damit zum maximale Speichervolumen der Untergrundstruktur – beides fundamentale Kennwerte zur Charakterisierung des CO<sub>2</sub>CRC Otway Projekt, die bislang nur mit einfachen analytischen Ansätzen betrachtet wurden.

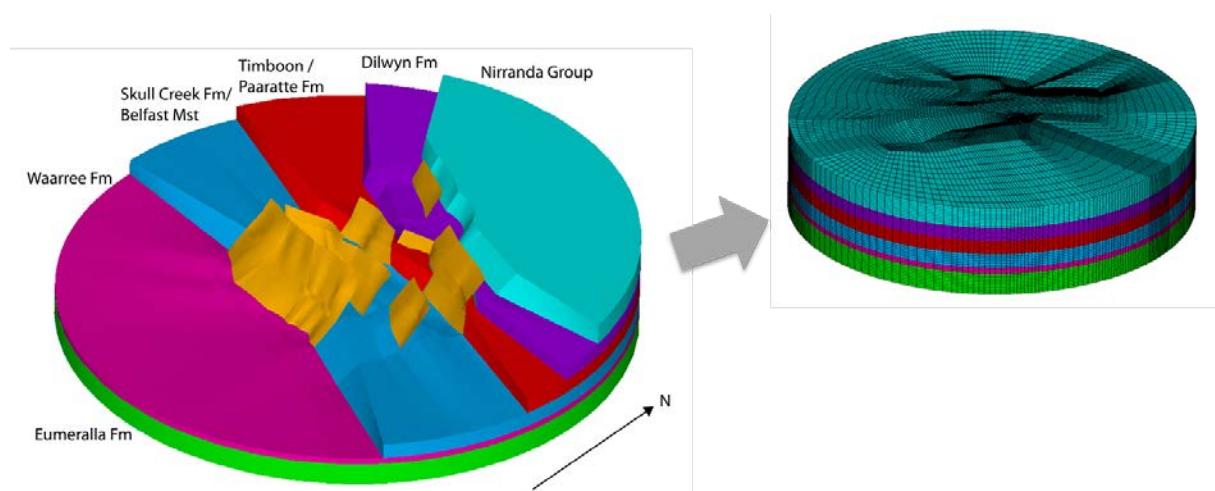
Sowohl die geomechanische als auch die hydromechanisch gekoppelte Simulation basieren auf dem Strukturmodell, das gemeinsam mit AP1 erarbeitet und auch für die Retrodeformation verwandt

wurde (Ziesch et al., 2015a). Für die geomechanisch-numerische Modellierung des rezenten Spannungsfeldes wurde ein Finite Element (FE) Modell auf Basis der kommerziellen Software Ansys erstellt. Der entsprechende Arbeitsablauf zur Erstellung und Kalibrierung des FE-Modells ist in *Abb. 1.3.1* in Form eines Flussdiagramms dargestellt.



*Abbildung 1.3.1:* Flussdiagramm zur Erstellung und Kalibrierung eines geomechanischen Lagerstättenmodells für die Berechnung von tektonischen Spannungen und Kluftnetzwerken.

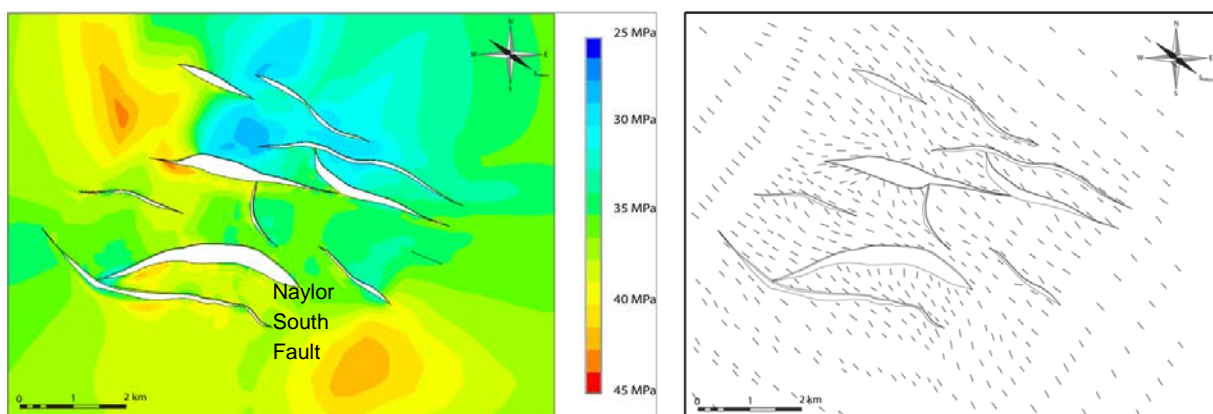
Die Untergrundgeometrie wurde aus der tiefenkonvertierten Interpretation der 3-D Seismik (Ziesch et al., 2015a) übernommen und beschreibt einen 8x7x2,8 km großen Block um die Bohrungen Naylor 1 und CRC-1. Das entsprechende FE-Modell umfasst 10 Störungen und sechs lithostratigraphische Einheiten, die vom Unterlager des Reservoirs bis zur Erdoberfläche reichen (*Abb. 1.3.2*).



*Abbildung 1.3.2:* Finite Element Modell des Otway CO<sub>2</sub>-Speichers (Zylinderdurchmesser 15 km). Links: Schnittmodell mit modellierten Störungen (orange) und lithostratigraphischen Einheiten. Rechts: Vollständig vernetztes Modell. Das regionale Spannungsfeld für das zylindrische Modell wird aus einem rechtwinkligen Lastrahmen (nicht dargestellt) übernommen, der parallel bzw. senkrecht zur Orientierung der maximalen und minimalen Horizontalspannungen ausgerichtet ist.

Die Störungen werden im FE-Modell durch sogenannte Kontaktelemente abgebildet, die eine getrennte Vernetzung einzelner Störungsblöcke und die Modellierung von differenziellen Bewegungen entlang der Störungen erlauben und damit eine deutliche Erweiterung des klassischen Kontinuumsansatzes der FE-Methode darstellen. Allerdings erfordern die Kontaktelemente die Definition der doppelten Anzahl von Knoten im Bereich der Störungen. Dies führt zu einem erheblichen manuellen Arbeits- und Zeitaufwand beim Übertrag der Modellgeometrie von Petrel in die FE Software Ansys. Für die verschiedenen lithostratigraphischen Modelleinheiten wurden anschließend möglichst Otway-spezifische Gesteinsparameter definiert. Während in der ersten Projektphase die vertikalen Variationen (*layer-cake mechanical stratigraphy*) erfasst wurden, konnte das Modell in dem zweiten Teilaspekt von AP3 durch die zusätzliche Berücksichtigung von lateralen Variationen der mechanischen Materialparameter innerhalb einer lithostratigraphischen Einheit weiter verfeinert werden (s.u.). Einführen von Randbedingungen in Form von Literaturdaten zum regionalen Spannungsfeld schlossen die Modellgenerierung ab.

Für die Kalibrierung des numerischen Modells standen in situ Spannungsmessungen aus den Bohrungen Naylor 1 und CRC-1 zur Verfügung. Durch Parametervariationen, insb. bei den nicht durch Messungen bekannten Reibungseigenschaften der Störungen, wurden die Modellierungsergebnisse iterativ so angepasst, dass eine befriedigende Übereinstimmung mit den tatsächlich gemessenen tektonischen Spannungen erreicht wurde. Das so validierte Modell kann jetzt für Prognosen zum rezenten tektonischen Spannungszustand im Oberbau des Speichers (z.B. für Bohrfadplanung) bzw. in den nicht erbohrten Lagerstättenbereichen genutzt werden. Die Modellierungsergebnisse umfassen dabei den vollständigen 3-D Spannungstensor für jeden Untergrundpunkt im Modellbereich. Beispielhaft sind in *Abbildung 1.3.3* die Magnitude und die Orientierung der maximalen Horizontalspannung in der Mitte des Speicherhorizontes dargestellt. Die Variationsbreite in den Spannungsmagnituden ist dabei im Wesentlichen auf die unterschiedliche Tiefenlage der Waarre Formation zurückzuführen; nur in kleinerem Umfang wirken sich Störungen aus. Hinsichtlich der Orientierung des Spannungsfeldes lassen die Modellierungen im Nahbereich der Störungen allerdings deutliche Umorientierung erwarten, die teilweise bis zu 90° vom regionalen Spannungsfeld abweichen. Diese lokalen Änderungen sind besonders an den Störungen mit großen Versatzbeträgen wie etwa der Naylor South Störung zu beobachten.



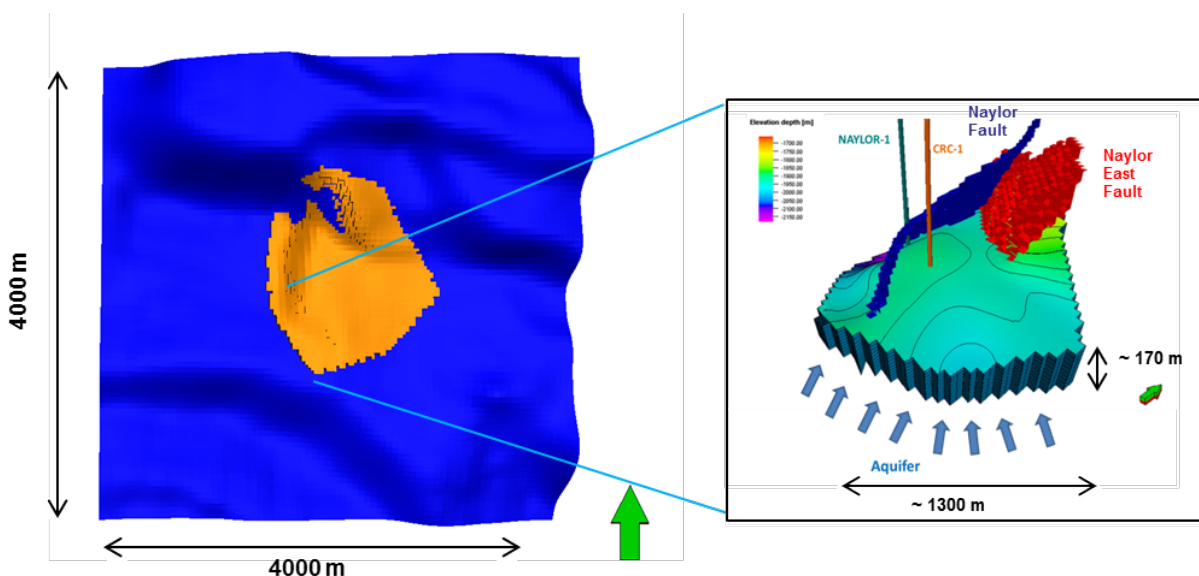
**Abbildung 1.3.3:** Magnitude (links) und Orientierung (rechts) der maximalen Horizontalspannung in der Mitte des Speicherhorizontes (Waarre Formation).

Für eine Klufftprognose wurde der Workflow (*Abb. 1.3.1*) durch die Einbeziehung von Paläospannungsfeldern erweitert. Dazu wurde die tektonische Entwicklung der Waarre Formation in verschiedene Zeitabschnitte mit jeweils unterschiedlichen tektonischen Regimen unterteilt. Die entsprechenden Modelle zeigen dann die lokale Verteilung der Paläospannungen, aus denen mögliche Klufftorientierungen (Extensions- und Scherklüfte) abgeleitet und mit dem tatsächlich

beobachteten Kluftinventar verglichen werden können. Während für diesen Ansatz die überregionalen Orientierungen der Paläospannungen (aus der geodynamischen Entwicklung des Otway Beckens) und die zeitliche Veränderung der Vertikalspannung (aus der Versenkungsgeschichte) plausibel gemacht werden können, wurden die Magnituden der Paläospannungen und die zeitlichen Veränderungen in den mechanischen Parametern aufgrund des begrenzten Kenntnisstands abgeschätzt. Der Vergleich der prognostizierten Kluftorientierungen mit den wenigen, aus FMI-Daten interpretierten Strukturen zeigt zumindest abschnittsweise eine gute Übereinstimmung. Für belastbare Prognosen erfordert der methodische Ansatz allerdings noch weitergehende Untersuchungen.

Neben diesen Modellierungen zum rezenten tektonischen Spannungsfeld und zu Paläospannungsfeldern wurden für einen Detailbereich im Umfeld der Injektionsbohrungen auch hydromechanisch gekoppelte Simulationen durchgeführt. Diese Modellierungen stellten die ersten numerischen 3-D Modellierungen zur Poromechanik des CO<sub>2</sub>CRC Otway Projektes dar, nachdem bisherige Arbeiten lediglich einfache analytische Lösungen genutzt hatten. Die Modellierungen wurden in Kooperation mit dem Schlumberger Geomechanics Centre of Excellence in Bracknell, UK, durchgeführt und verwenden einen *one-way-coupled* Ansatz, d.h. Porendruckänderungen durch Produktion und spätere Injektion wurden mittels einer hydraulischen Simulation in der Software Eclipse berechnet und zu definierten Zeitschritten auf die poroelastische Modellierung mit der Software Visage übertragen. Eine Veränderung der Permeabilitäten durch Spannungsänderungen und damit eine Rückkopplung vom mechanischen zum hydraulischen Modell wurden nicht betrachtet.

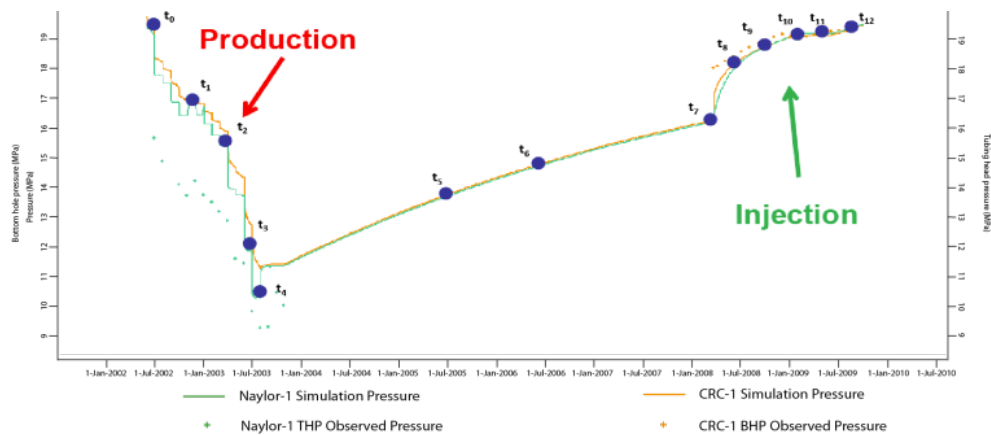
Die Geometrie dieses Detailmodells beschreibt einen 1,3 x 1,3 x 0,17 km großen Bereich in der Umgebung der Injektionsbohrungen in ca. 2 km Tiefe (Abb. 1.3.4). Das Modell umfasst zwei lithologische Einheiten (Speicherhorizont und Abdeckung) und die zwei begrenzenden Störungen (Naylor und Naylor South). Dieses Modell war zur Vermeidung von Randeffecten wiederum in ein 4 x 4 km großes Modell mit einer gröberen Diskretisierung und sechs Störungen eingebettet.



**Abbildung 1.3.4:** Hydromechanisch gekoppelte Simulation im Umfeld der Bohrungen Naylor 1 und CRC-1. Das Detailmodell (rechts) für Speicherhorizont und Abdeckung ist zur Vermeidung von Randeffecten in ein größeres Modell mit gröberer Diskretisierung (links) eingebettet worden.

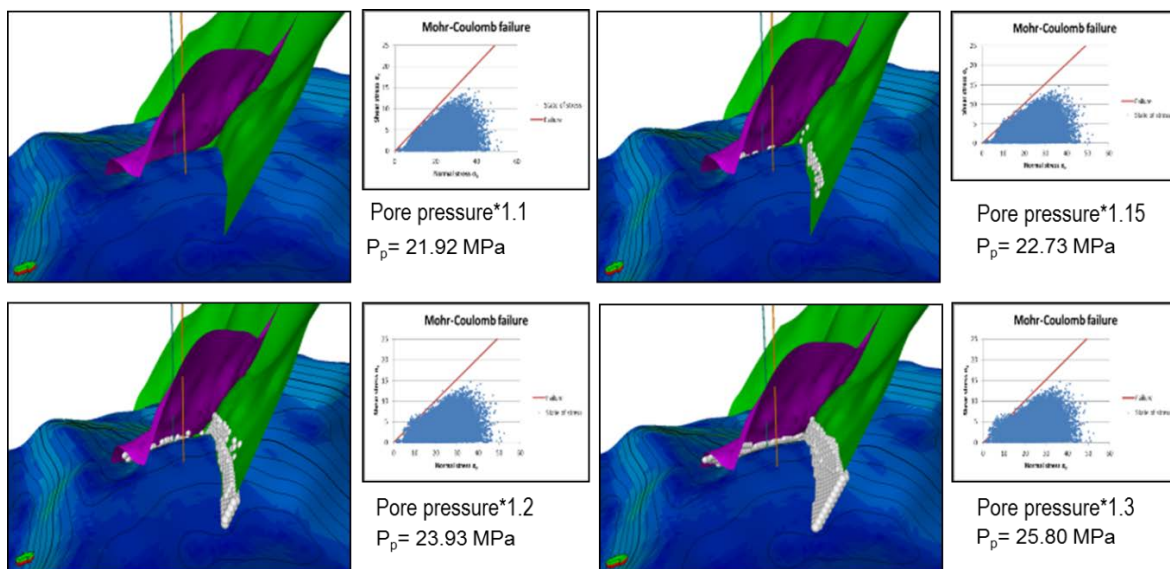
Für diese Modellierungen waren neben den mechanischen auch die hydraulischen Eigenschaften des Speichers und der Abdeckung erforderlich. Die Kalibrierung des hydromechanischen Detailmodells erfolgte anhand von Beobachtungsdaten, die die Entwicklung des Lagerstättendrucks vom initialen Zustand über die Abnahme während der Gasproduktion und dem Wiederanstieg in der anschließenden CO<sub>2</sub>-Injektionsphase dokumentieren (Abb. 1.3.5). Die Modellierungen zeigen, dass für

den Porendruck von 20.23 MPa, der am Ende der CO<sub>2</sub>-Injektion in der Bohrung CRC-1 erreicht wurde und der etwas über dem initialen Lagerstättendruck liegt, keine Reaktivierung der Störungen zu erwarten ist (bei einem angenommenen Reibungskoeffizienten der Störungen von 0.6).



**Abbildung 1.3.5:** *History match* zwischen beobachteten und modellierten Porendrücken (blaue Punkte – Zeitpunkte der Kopplung von hydraulischen und mechanischen Berechnungen).

Ausgehend von diesem *history match* und flankiert durch Parameterstudien wurden dann der für einen sicheren Betrieb maximal mögliche Injektionsdruck und damit das maximale Speichervolumen der Struktur untersucht. Die Modellierungen zeigen, dass erst bei einer Erhöhung auf mehr als das 1,15-fache des initialen Lagerstättendrucks mit einer Reaktivierung der Störungen und damit einer Beeinträchtigung der Integrität des Speichers zu rechnen ist (*Abb. 1.3.6*). Diese Abschätzung anhand detaillierte numerischer Modelle liefert deutliche konservativere Werte zum maximalen Injektionsdruck und Speichervolumen des CO<sub>2</sub>CRC Otway Projekts als bislang anhand der einfachen analytischen Modelle angenommen wurde (Aruffo et al., 2014).

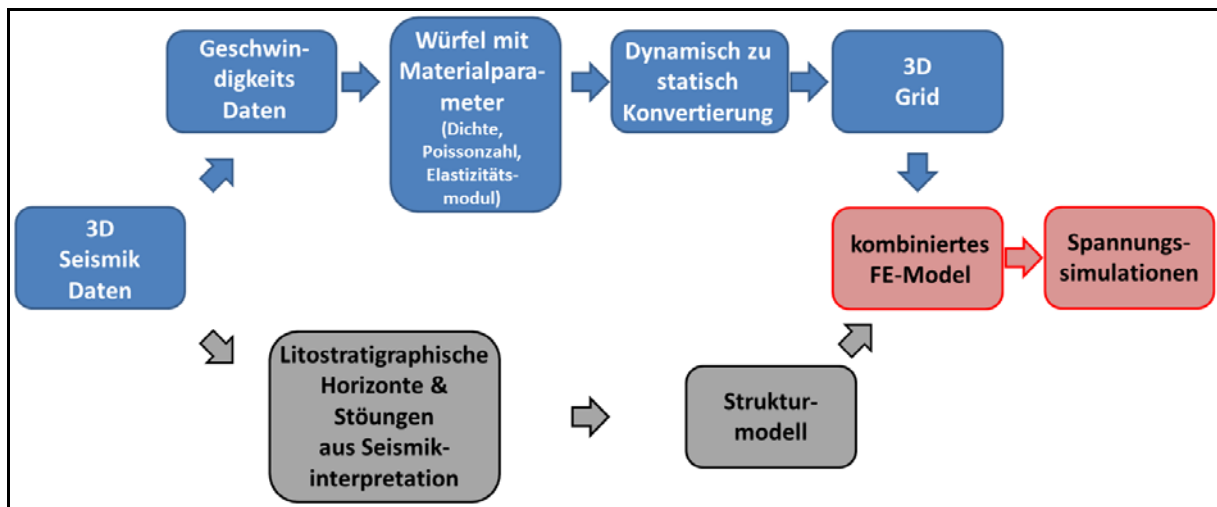


**Abbildung 1.3.6:** Parameterstudie zum für einen sicheren Betrieb maximal möglichen Porendruck des untersuchten Speichers (Aruffo et al., 2014). Bei Porendrücken vom 1,15-fachen des initialen Lagerstättendrucks erreichen erstmals Teilbereiche des Modells (weiße Zellen) das Versagenskriterium.



### 1.3.2b Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse ‚Räumliche Variationen elastischer Eigenschaften in geomechanischen Reservoirmodellen‘

Aufbauend auf dem erstellten geomechanischen Modell werden sowohl Dichte als auch die elastischen Gesteinsparameter Elastizitätsmodul und Poissonzahl um laterale und vertikale Variationen erweitert. Auf diese Weise werden faziell oder diagenetisch entstandenen Inhomogenitäten im Gestein Rechnung getragen und der allgemein gebräuchliche *layer cake* Ansatz ergänzt sowie ein verbessertes Abbild des realen Zustands erreicht. In **Abbildung 1.3.7** ist der Workflow zur Integration der räumlichen Variationen dargestellt. Auf dem oberen Ast werden die Materialparameter vorbereitet, um sie im vorletzten Schritt mit dem Strukturmodell zusammenzuführen. Der untere Ast beschreibt die Interpretation der seismischen Daten und den geometrischen Aufbau des späteren Finite Elemente (FE) Modells.

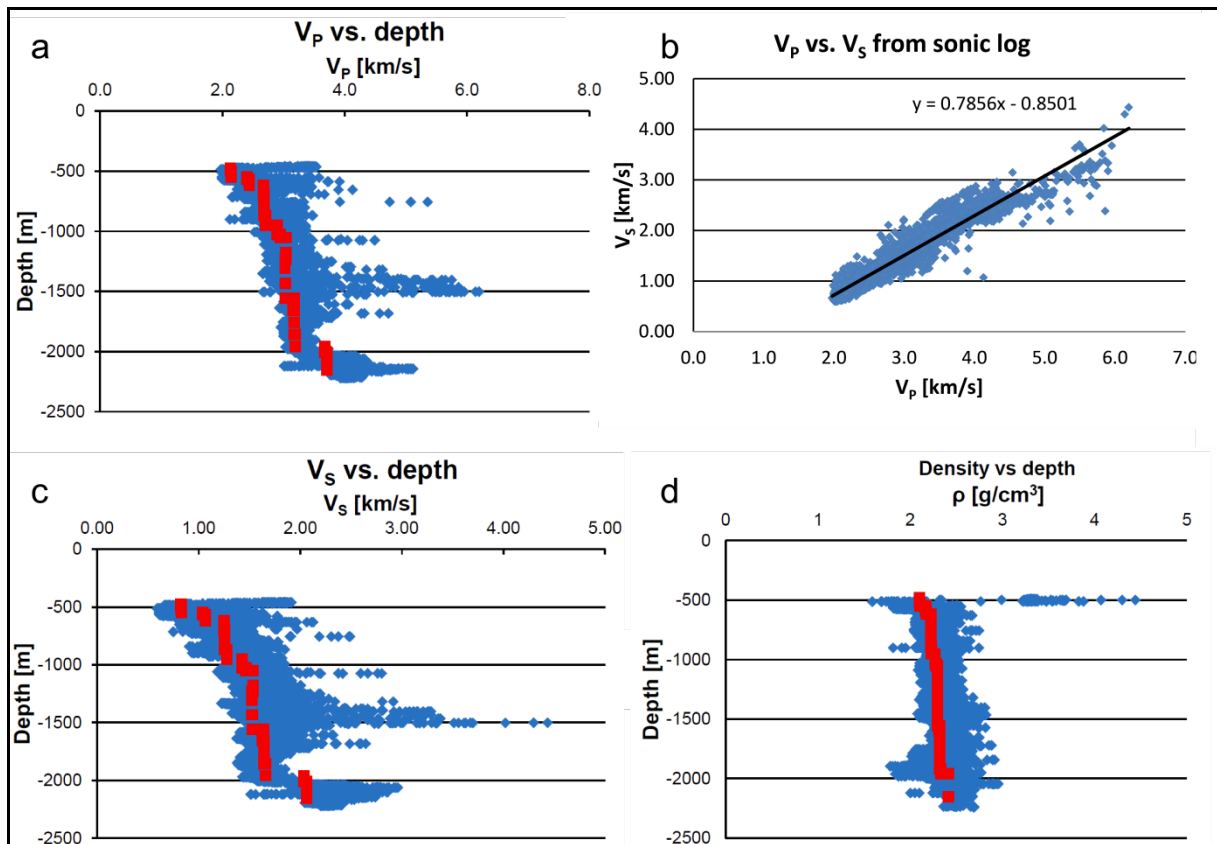


**Abbildung 1.3.7:** Genereller Workflow zur Einbindung von räumlichen Variationen mechanischer Materialparameter in geomechanische Modelle. In blau und rot sind die Arbeitsschritte markiert, die in diesem Teilaspekt behandelt werden; grau belegte Arbeitsschritte beinhalten die seismischen Interpretationen und den Bau des Strukturmodells (siehe Unterkapitel 1.3.2a).

Mit Ausnahme von seismischen Geschwindigkeiten lassen sich keine Materialparameter großmasstäblich bestimmen. Daher werden Kompressions- und Scherwellengeschwindigkeiten genutzt, um über empirische Zusammenhänge die erforderlichen Materialkennwerte zu berechnen. Der vorhandene Intervallgeschwindigkeitswürfel, sowie Messung in der CRC-1 Bohrung zu Geschwindigkeiten und Dichte bieten hierfür die Grundlage. Aus den vorhandenen Ultraschall-Logs wird im ersten Schritt eine lokal gültige Beziehung zwischen Kompressions- ( $V_P$ ) und Scherwellengeschwindigkeiten ( $V_S$ ) abgeleitet. Die Korrelation zwischen beiden Geschwindigkeiten zeigt eine gute Übereinstimmung mit Literaturwerten. Sie wurde deshalb weiter verwendet, um aus dem Intervallgeschwindigkeitswürfel einen zweiten Würfel mit Scherwellengeschwindigkeiten zu berechnen. Mit Hilfe der beiden Geschwindigkeitswürfel und einer Geschwindigkeits-Dichte-Beziehung wird im nächsten Schritt ein dritter Würfel für die Dichte berechnet. An den Koordinaten der CRC-1 Bohrung wird aus dem Würfel jeweils ein synthetisches Log zur Qualitätskontrolle erstellt. Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung der berechneten und der in situ gemessenen Daten (**Abb. 1.3.8**), was die Anwendbarkeit der gewählten empirischen Umrechnungsformeln im Otway Becken bestätigt.

Die Würfel der Geschwindigkeiten und Dichte wurden weiter benutzt, um Elastizitätsmodul und Poissonzahl abzuleiten. Da die Berechnung auf der Grundlage von seismischen Geschwindigkeiten erfolgt, liegen nur die dynamischen Moduln der jeweiligen Materialkennwerte vor. Für die Nutzung innerhalb geomechanischer Modelle sind allerdings statische Werte notwendig, da die Verformungs-

magnituden innerhalb statischer Experimente näher an der Größenordnung geomechanisch relevanter Prozesse liegen und zusätzlich das in situ Verhalten der Gesteine besser widerspiegeln.

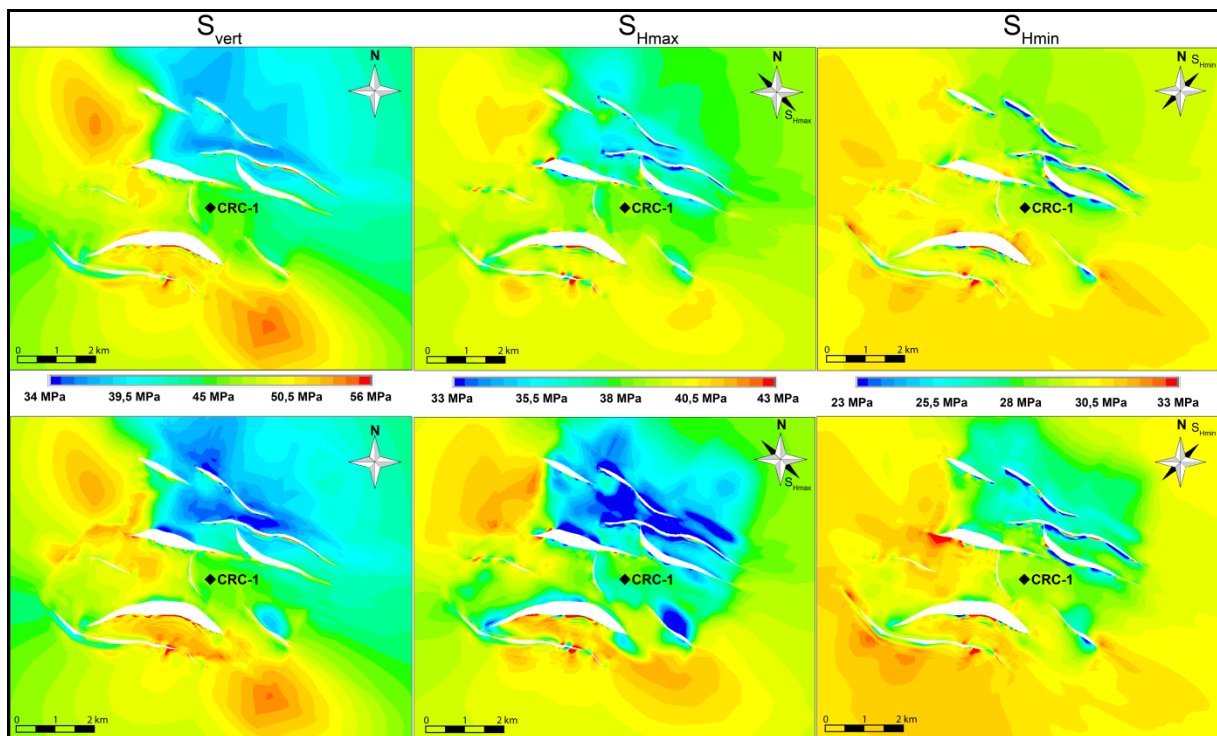


**Abbildung 1.3.8:** Vergleich der Variationen der Materialparameter mit der Tiefe: blau – in der CRC-1 Bohrung gemessene Daten; rot - berechnete Daten als synthetische Bohrlochprojektion. a) P-Wellen Intervallgeschwindigkeit; b) Kompressions- und Scherwellengeschwindigkeiten aus akustischen Logs; c) Scherwellengeschwindigkeiten; d) Dichte.

Für die Berechnung der statischen Parameter werden wiederum empirische Formeln genutzt, da keine spezifischen Werte aus Versuchen unter Laborbedingungen vorhanden sind. Die statischen Werte von Elastizitätsmodul und Poissonzahl werden im nächsten Schritt mit der bekannten Geometrie kombiniert. Dazu werden die Würfel mit einem dreidimensionalen Netz geschnitten, das den Würfel so in kleinere Zellen von ca. 50x50x50 m Größe unterteilt. Die Materialeigenschaften innerhalb einer Zelle werden gemittelt und als Punktinformation im Zentrum der Zelle gespeichert. Die Zellzentren werden mit ihren Koordinaten und jeweils einem Wert für Dichte, Poissonzahl und Elastizitätsmodul aus Petrel exportiert. Ein Export der gesamten Materialwürfel würde die Datenmenge zu stark ansteigen lassen und ist daher nicht möglich. Die exportierten Punktdaten werden im nächsten Schritt in Ansys importiert und die Materialeigenschaften zwischen den Punkten interpoliert, um so das Modell wieder flächendeckend mit Informationen zu füllen. Nach der Kombination der Lagerstättegeometrie mit den elastischen Materialwerten ist das Modell bereit zur Kalibrierung. Diese wird ausschliesslich anhand des äußeren Lastrahmens bewerkstelligt, d.h. das Modell enthält die vertikale Unterteilung entsprechend der geologischen Schichten, integriert allerdings noch keine Störungen. Die jeweiligen geologischen Einheiten bekommen Durchschnittswerte für Dichte, Poissonzahl und Elastizitätsmodul zugewiesen, die sich aus den entsprechenden Schichten in den Materialwürfeln berechnen. Als Referenz dient ein Messpunkt im Reservoirhorizont in ca. 2 km Tiefe aus der CRC-1 Bohrung. Die Orientierung der Hauptspannungsrichtungen wird von Bohrlochwandausbrüchen nach Vollendung der CRC-1 und CRC-2 Bohrungen gewonnen. Für den maximalen

horizontalen Stress ( $S_{Hmax}$ ) ergibt sich eine NW-SE Ausrichtung bei einem Gradienten von 19,0 MPa/km (van Ruth et al. 2007; siehe Teil I, Kap. 1.7). Der minimale horizontale Stress ( $S_{Hmin}$ ) ist 90° zu  $S_{Hmax}$  orientiert, und aus Formationsintegritäts- und Formationsdrucktests (LOT) ergibt sich ein Wert von 14,62 MPa/km (van Ruth 2007; van Ruth et al. 2007). Der vertikale Stress ( $S_v$ ) resultiert aus dem Integral der Normalenkraft über die Tiefe der überdeckenden Gesteine und Fluide und erreicht einen Wert von 21,45 MPa/km (van Ruth et al. 2007). Aus dem Größenverhältnis der Spannungsgradienten ( $S_v > S_{Hmax} > S_{Hmin}$ ) ergibt sich so ein Abschiebungsregime. Neben dem geomechanischen Modell mit den räumlichen Variationen der elastischen Materialparameter wird ein zweites Modell erstellt, das dem *layer cake* Ansatz folgt und die berechneten Durchschnittswerte für Poissonzahl, Dichte und Elastizitätsmodul nutzt. Dies ermöglicht einen Vergleich beider Modelle, um den Einfluss der räumlichen Variation in den Materialkennwerten auf die Spannungsrichtungen zu quantifizieren.

Die Ergebnisse der Spannungsberechnungen beider Modellansätze für einen horizontalen Schnitt innerhalb des Reservoirhorizontes in ca. 2 km Tiefe sind in **Abbildung 1.3.9** gezeigt. Die obere Reihe zeigt die Ergebnisse des *layer cake* Ansatzes, die untere Reihe die des Modells mit Variationen. Beim Vergleich beider Ansätze zeigt sich, dass lokal starke Unterschiede in der Spannungsmagnitude auftreten. Das *layer cake* Modell liefert im Norden und Nordosten höhere Werte für alle drei Hauptspannungen, während im gesamten südlichen und nordwestlichen Bereich des Bildausschnitts das Modell mit Variationen höhere Magnituden erreicht. In den Bereichen ohne Störungen erzielen beide Ansätze ungefähr gleiche Ergebnisse. Deutlich werden die Unterschiede erst in direkter Umgebung der vorhandenen Störungen. Die Extremwerte an den Rändern der Störungen sind vermutlich künstlich erzeugte Artefakte und stammen aus dem Interpolationsalgorithmus.

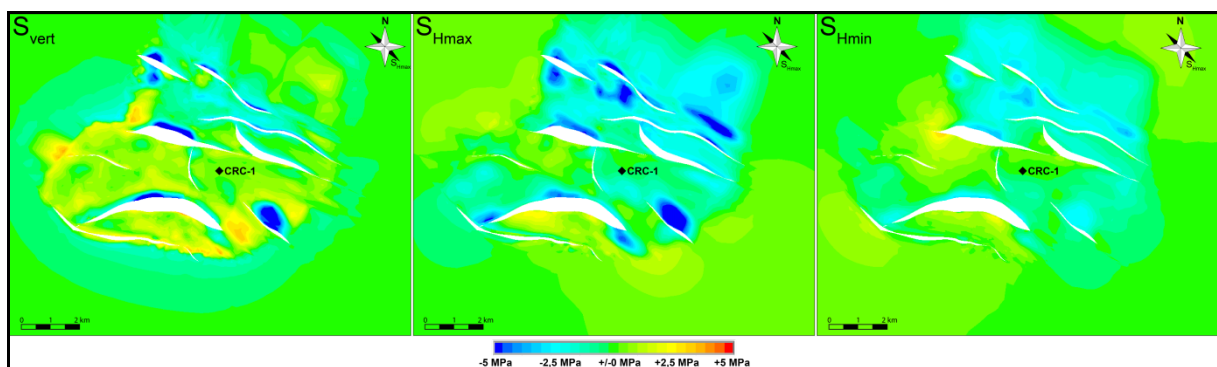


**Abb. 1.3.9:** Berechnete Werte für die drei Hauptspannungsrichtungen für einen Schnitt durch den Reservoirhorizont in ca. 2 km Tiefe. Obere Reihe: Ergebnisse des *layer cake* Ansatzes mit Durchschnittswerten für Dichte, Poissonzahl und Elastizitätsmodul. Untere Reihe: Ergebnisse der Modellierung mit räumlichen Variationen der mechanischen Materialparameter.



Subtrahiert man die Spannungsmagnituden der beiden Modelle voneinander (*Abbildung 1.3.10*), unterscheiden sich die Ergebnisse generell um eine maximale Differenz von +/- 5 MPa. Die überwiegenden blauen Bereiche zeigen, dass aus dem *layer cake* Modell höhere Spannungen resultieren als aus dem Modell mit Variationen. Abgesehen von wenigen Ausnahmen zeigt das Variationsmodell nur in der Vertikalspannung eine höhere Spannungsmagnitudo. Die größten Unterschiede sind in der maximalen horizontalen Spannung vorhanden. Insbesondere im nördlichen Bildausschnitt liegen mehrere Zentren mit Extremwerten in den schmalen Bereichen zwischen Störungen dicht beieinander. In der Darstellung der minimalen Horizontalspannung befinden sich die Orte der lokalen Extremwerte an gleicher Stelle, allerdings ist hier die Differenz deutlich kleiner und liegt bei nur etwa 2 MPa.

Die Hauptunterschiede beider Modellansätze liegen in Ort und Größe der Minimal- bzw. Maximalwerte. Allerdings benötigen die Ergebnisse weitere Validierung durch in situ Spannungsmessungen und Laboruntersuchungen zu den Materialparametern, um das Modell bei signifikanten Unterschieden neu kalibrieren zu können.



**Abb. 1.3.10:** Berechneter Unterschied zwischen beiden Ansätzen zur Spannungsberechnung für einen Schnitt durch den Reservoirhorizont in ca. 2 km Tiefe. Von den Ergebnissen des *layer cakes* wurden die Ergebnisse des Modells mit räumlicher Variation subtrahiert. Blaue Farben stehen für höhere Werte im *layer cake* Modell, rote für höhere Spannungen im Modell mit Variationen.

### 1.3.3 Kooperation innerhalb des Verbunds

Für die Interpretation und den Aufbau des 3-D Strukturmodells war AP3 eng mit AP1 verknüpft; der Austausch von gesteinsphysikalischen Parametern fand ebenfalls mit AP1 statt (elastische Eigenschaften,  $V_p$ ,  $V_s$ , etc.); an AP4 wurden Daten zur Visualisierung übergeben. Darüberhinaus wurden die mit den verschiedenen Modellierungsansätzen berechneten Deformationsverteilungen mit den Ergebnissen der Kohärenzanalyse aus AP2 verglichen.

### 1.3.4 Zusammenfassung

AP3 hat die ersten geomechanisch-numerischen Modelle zu den tektonischen Spannungen und Porendrücken des CO2CRC Otway Projektes erarbeitet. Während bislang nur einfache analytische Lösungen vorlagen, wurde durch die detaillierten hydromechanisch gekoppelten Simulationen gezeigt, dass der für einen sichereren Betrieb des Speichers maximal mögliche Injektionsdruck und damit auch das Speichervolumen der Struktur deutlich geringer als bislang angenommen sind.

Mit der Modellierung des rezenten tektonischen Spannungsfeldes im Umfeld des Reservoirs sowie im gesamten Oberbau liegen darüberhinaus wichtige Basisinformationen für die Planung weiterer Erschließungsbohrungen vor. Die Modellierungen zeigen, dass insbesondere im Nahbereich der Störungen mit erheblichen Spannungsfeldperturbationen zu rechnen ist.

## 1.4 Benchmarking von CO<sub>2</sub>-Speicherprozessen (Arbeitspaket 4 – CO2BENCH)

*Einrichtung:* UFZ, Leipzig (FKZ 03G0797D)

*Projektleitung:* Prof. Dr. Olaf Kolditz

*Beteiligte Wissenschaftler\_innen:* Lars Bilke, Dr. Norbert Böttcher, Dr. Uwe-Jens Görke, Dr. Ashok Singh, Dr. Norihiro Watanabe, Dr. Björn Zehner

*Zusammenarbeit mit anderen Stellen:*

- Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung zu CO2BRIM
- Universität Erlangen, Department Geographie und Geowissenschaften zu CO2ISO-LABEL
- Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum zu CO2RINA
- Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, UFZ – Department Monitoring zu MONACO
- Bohrlochmessung-Storkow GmbH zu SAMOLEG

### 1.4.1 Aufgabenstellung

Eine realitätsnahe Abbildung der physiko-chemischen Prozesse bei der CO<sub>2</sub>-Injektion und Speicherung erfordert die Erfassung der gekoppelten thermo-hydro-mechanisch-chemischen (THMC) Prozesse. Eine Möglichkeit der Überprüfung der Genauigkeit numerischer Modelle für solche nichtlinearen Problemstellungen sind numerische Benchmarks, die bei größerer Komplexität als Code-Vergleich für definierte Testbeispiele anzulegen sind. In diesem Zusammenhang verfolgte das hier dargelegte Projekt als integrativer Bestandteil des Projektverbundes PROTECT die zwei grundsätzlichen Ziele a) Entwicklung numerischer CO<sub>2</sub>-Benchmarks für konzeptionelle Modellentwicklungen und die Qualitätssicherung von Simulationssoftware sowie b) die Vernetzung zwischen einzelnen Vorhaben über numerisches Benchmarking und wissenschaftliche 3-D Visualisierung.

Inhaltlich sollte eine Systematik für CO<sub>2</sub>-Benchmarks entwickelt werden, welche die relevanten Prozesse, typische Reservoirbedingungen sowie Speicherszenarien reflektieren. Datengrundlage für die Definition numerischer Benchmarks bildeten Experimente in den kooperierenden Verbundprojekten. Zudem wurden geologische Struktur-, Mess- und Simulationsdaten genutzt, um die 3-D Visualisierung von Ergebnissen, beispielsweise von PROTECT, zu gestalten. Insgesamt nahm CO2BENCH eine wichtige Brückenfunktion zwischen verschiedenen CO<sub>2</sub>-Verbundprojekten wahr.

### 1.4.2 Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Im Zentrum des hier dargestellten APs stand die koordinierte Entwicklung numerischer Benchmarks zur Charakterisierung typischer Prozesse bei der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung. Diese Arbeiten wurden gemeinsam mit einer Reihe von Verbundprojekten aus dem GEOTECHNOLOGIEN-CO<sub>2</sub>-Programm ausgeführt, die unterschiedliche, spezifische Aspekte der Injektion und Speicherung von CO<sub>2</sub> im geologischen Untergrund betrachteten. Diese Benchmark-Entwicklungen dienten ebenso der Vernetzung unterschiedlicher Akteure wie auch die wissenschaftliche 3-D Visualisierungen für die synoptische Darstellung von Struktur- und Prozessdaten aus unterschiedlichen Quellen.

Nachfolgend werden in diesem Bericht die Modellierungskonzepte und -ansätze sowie exemplarische Ergebnisse von Benchmark-Entwicklungen skizziert. Dabei liegt der Schwerpunkt auf potenziellen Fluid- oder Gasauftiegen über vorhandene Wegsamkeiten in porösen Medien sowie auf der wissenschaftlichen 3-D Visualisierung.

#### 1.4.2a Modellierung THMC gekoppelter Prozesse bei der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung

Die konzeptionelle Grundlage der für die Simulation numerischer Benchmarks im Projekt genutzten Transport- und Deformationsmodelle in porösen Medien stellt die Mischungstheorie, ergänzt um das Konzept der Volumenanteile, dar. Im Rahmen dieser erweiterten Mischungstheorie können Bewe-

gungsvorgänge und physikalische Prozesse der einzelnen Bestandteile eines porösen Mediums sowie auch des Gesamtkontinuums mit anerkannten phänomenologischen Methoden der Kontinuumsmechanik beschrieben werden. Entsprechend den Annahmen über poröse Medien wurden die betrachteten geologischen Formationen als Mischung eines Feststoffgerüsts (Gesteinsmatrix) und eines Porenfluids bestehend aus einem mischbaren Fluidgemenge verschiedener Komponenten angesehen.

Die bestimmenden Feldgleichungen für die Modellierung von Transport- und Deformationsprozessen in porösen Medien werden auf der Basis der lokalen, partikulären Bilanzbeziehungen der Bestandteile des betrachteten Mediums formuliert. Im Einzelnen handelt es sich dabei um die Masse- und Impulsbilanzen sowie, bei nichtisothermen Prozessen, die Energiebilanzen. Zusätzlich wird angenommen, dass die Bilanzbeziehungen sowohl der Bestandteile eines porösen Mediums als auch des Gesamtkontinuums analog zu den klassischen Beziehungen der Kontinuumsmechanik für Einphasenmaterialien formuliert werden können. Wechselwirkungsmechanismen zwischen den einzelnen Bestandteilen eines porösen Mediums werden mit Hilfe so genannter Austauschterme in den partikulären Bilanzbeziehungen beschrieben.

Während die aus den Bilanzbeziehungen abgeleiteten Feldgleichungen fundamentale physikalische, chemische und thermodynamische Eigenschaften der betrachteten Materie unabhängig von deren spezifischen Materialeigenschaften beschreiben, differiert die Reaktion eines physikalischen Körpers auf äußere Einflüsse in der Realität je nach dessen Beschaffenheit und konstitutiven Eigenschaften. Daher sind die grundlegenden Feldgleichungen um Materialgleichungen (konstitutive Beziehungen) zu ergänzen, die das materialspezifische Verhalten charakterisieren. Im Kontext der betrachteten Problemstellung werden folgende konstitutive Beziehungen benötigt:

- Relationen für die Austauschterme in spezifischen Bilanzbeziehungen individueller Bestandteile des Gesamtkontinuums (z.B. Annahmen für die Impulsaustauschterme zwischen festen und fluiden Phasen, mit deren Hilfe sich Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen fluiden Phasen ableiten lassen),
- Konstitutiv- und Zustandsgleichungen für Porenfluideigenschaften wie Druck, Dichte, Viskosität, kritische Parameter, relative Permeabilität sowie Sättigung.

Zu Details der konzeptionellen Grundlagen der verwendeten erweiterten Mischungstheorie sowie den konkreten Feld- und Konstitutivgleichungen, die als Basis für die im Teilprojekt durchgeführte Simulation numerischer Benchmarks im Bereich der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung dienen, wird auf Kolditz et al. (2012b) sowie die darin zitierte Literatur verwiesen.

### *Numerische Realisierung im Rahmen des Softwareprojekts OpenGeoSys*

Die numerische Behandlung der betrachteten nichtlinearen, gekoppelten Probleme für das numerische Benchmarking basiert auf der Auswertung der relevanten Feldgleichungen in Verbindung mit geeigneten Zeit- und Ortsdiskretisierungsverfahren. Unter Nutzung des Verfahrens der gewichteten Residuen werden zunächst die schwachen Formulierungen (integrale Variationsdarstellungen über das gesamte betrachtete Simulationsgebiet) der als lokales System von Differentialgleichungen vorliegenden Feldgleichungen abgeleitet. Dabei werden, im Rahmen einer Standard-Galerkin-Prozedur, die lokalen Bilanzbeziehungen mit geeigneten Testfunktionen multipliziert und über das Simulationsgebiet integriert, das über das Volumen der Gesteinsmatrix definiert wird. Um das System der schwachen Formulierungen in den gewünschten Primärvariablen zu definieren, werden zweckmäßige konstitutive Beziehungen integriert (z.B. Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen der festen Phase des porösen Mediums bzw. Druck-Dichte- und/oder Druck-Sättigungs-Relationen für die fluiden Phasen des porösen Mediums). Nachfolgend werden die kontinuierlichen Funktionen der Primärvariablen durch Ansatzfunktionen in geeigneten Finite-Element-Räumen ersetzt (Ortsdiskretisierung). Als Ergebnis dieser Ortsdiskretisierung liegt in der Regel ein algebraisches System nichtlinearer, miteinander gekoppelter Gleichungen mit den Knotenwerten der Primärvariablen als Unbekannte vor. In dessen rechter Seite sind die Wirkungen äußerer Einflüsse integriert (Oberflächenbelastungen, Flüsse durch die Oberfläche des betrachteten Berechnungsgebiets).

Im partiellen Lastschritt (auch: Zeitschritt) einer Finite-Element-Simulation ist jeweils ein, gegebenenfalls gekoppeltes, lineares algebraisches Gleichungssystem zu lösen. Aus diesem Grund sind die Ableitungen der Primärvariablen in dem oben genannten, nach dem Ort diskretisierten System der schwachen Formulierungen durch geeignete Zeitdiskretisierungsverfahren zu eliminieren. Danach ist eine Linearisierung des Systems nach einem gängigen inkrementell-iterativen Verfahren vorzunehmen. Somit ist in jedem Lastschritt ein lineares Gleichungssystem mit den Inkrementen der Knotenwerte der Primärvariablen als Unbekannte zu lösen.

Die in AP4 für das Benchmarking erforderlichen numerischen Modelle und Algorithmen sind in der wissenschaftlichen open-source Softwareplattform OpenGeoSys implementiert. OpenGeoSys ist ein internationales Softwareprojekt zur Modellierung von gekoppelten THMC-Prozessen in porösen Medien, dessen Entwicklung vom UFZ koordiniert wird (vgl. Kolditz et al., 2012a, b).

OpenGeoSys nutzt bezüglich der Zeitdiskretisierung ein verallgemeinertes Einschritt-Differenzenverfahren. Das Diskretisierungsschema enthält einen Wichtungsfaktor, mit dem spezifische Ansätze eingestellt werden können. Von denen wird das implizite Euler-Verfahren (auch: Euler Rückwärts) wegen seiner unbedingten numerischen Stabilität von den Autoren favorisiert und ist das in der Praxis komplexer Problemstellungen am häufigsten genutzte. Für die Linearisierung der nicht-linearen Finite-Element-Gleichungen können in OpenGeoSys die konsistente Linearisierung nach der Newton-Raphson-Methode oder das Picard-Verfahren genutzt werden, bei dem die Systemmatrizen vereinfachend während der Iterationen innerhalb eines Lastschritts konstant gehalten werden.

Nach Orts- und Zeitdiskretisierung sowie Linearisierung der schwachen Formulierungen ist im Rahmen der Lösung des gemischten Anfangs-Randwert-Problems in jedem Zeitschritt ein lineares algebraisches Gleichungssystem auszuwerten, für dessen Lösung in OpenGeoSys vorrangig iterative Verfahren (z.B. Methode der konjugierten Gradienten) mit Vorkonditionierung verwendet werden.

### ***Benchmarking***

Geschlossene Lösungen für Problemstellungen aus Natur- und Ingenieurwissenschaften sind auf Situationen beschränkt, die unter stark vereinfachenden Annahmen definiert sind, verglichen mit den Prozessen, Eigenschaften und Bedingungen, die in der Realität typischerweise modelliert werden. Das ist besonders für Anwendungen im geowissenschaftlichen Bereich relevant, die durch das miteinander gekoppelte Wirken unterschiedlicher physikalischer und chemischer Prozesse in porösen Mehrphasenmedien, ausgeprägte Heterogenitäten der Untersuchungsgebiete und eingeschränkte Verfügbarkeit von in situ Messergebnissen charakterisiert sind. Die Entwicklung geeigneter numerischer Modelle und die Nutzung entsprechender Simulationssoftware sind die alleinigen Optionen für komplexe Zustandsanalysen und Prognosestudien in den Geowissenschaften.

Um ihre Relevanz für die Geowissenschaften zu demonstrieren, können Modelle und Software zur Analyse relevanter Anwendungen vor ihrem Einsatz hinreichend mit so genannten numerischen Benchmarks getestet werden. Benchmarks sind klar definierte Beispiele für die Prozesssimulation unter vereinfachenden Annahmen, die mit existierenden analytischen Lösungen oder experimentellen Daten verglichen werden können. Liegen für komplexe Situationen weder analytische noch experimentelle Ergebnisse vor, ist der Vergleich zwischen unterschiedlichen Softwarelösungen eine erprobte Methode, die Funktionalität, Zuverlässigkeit und Genauigkeit von Softwareentwicklungen zu beurteilen. Die Strategie zur Benchmarkdefinition basiert auf drei wesentlichen Aspekten:

- prozessorientierte Benchmarks für die numerischen Analyse partikulärer und gekoppelter Prozesse (physikalisch-chemische Einzelprozesse, gekoppelte Aufgaben zunehmender Komplexität),
- konstitutiv orientierte Benchmarks (Einfluss der Verwendung unterschiedlicher thermodynamischer Zustandsgleichungen für Fluideigenschaften sowie der Deformationsgesetze für die Feststoffmatrix poröser Medien),
- szenarienbasierte Benchmarks (insbesondere für Code-Vergleiche).

In der Literatur und aus den Ergebnissen bereits abgeschlossener BMBF-Verbundvorhaben im Bereich der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung ist bereits eine Vielzahl von vorrangig prozess- und konstitutiv orientierten Benchmarks bekannt. Im Verlauf des hier dargelegten Projekts wurden mit einer Reihe kooperierender Verbundvorhaben zusätzliche, spezifische Benchmarks definiert und mit OpenGeoSys simuliert, die Geometrie, Geologie, Materialeigenschaften und Prozessbedingungen realer Anwendungssituation in vereinfachender Form berücksichtigen. Die wichtigsten dieser Aktivitäten betrafen konkret folgende Verbundvorhaben und Aufgabenstellungen:

- CO2ISO-LABEL zum Thema Modelle auf der Porenskala für ein verbessertes Prozessverständnis (Naumov & Kolditz, 2013)
- CO2RINA zum Thema der adäquaten Beschreibung thermodynamischer Fluideigenschaften (Böttcher et al., 2012),
- MONACO zum Thema der Simulation des diffusiven Transports von CO<sub>2</sub> aus flachen, natürlichen Quellen an die Erdoberfläche,
- SAMOLEG zum Thema des potenziellen Aufstiegs von Porenfluid über vorhandene Wegsamkeiten im Gestein bei erfolgter CO<sub>2</sub>-Injektion.

Als Beitrag zur weiteren Vernetzung unterschiedlicher Verbundprojekte und wissenschaftlicher Einrichtungen wurden im Rahmen des hier dargelegten Projekts entwickelte Benchmarks neben externen, nationalen und internationalen Fachtagungen u. a. auch auf dem von CO2BENCH im November 2013 in Leipzig organisierten internationale Benchmark-Workshop SSBench/CO2BENCH sowie den jährlichen OpenGeoSys Community Meetings vorgestellt und diskutiert.

In folgenden Abschnitten werden die gemeinsam mit den Verbundprojekten MONACO und SAMOLEG erarbeiteten Testbeispiele etwas ausführlicher vorgestellt. Exemplarisch für die synoptische 3-D-Visualisierung von Daten unterschiedlicher Quellen wird eine Visualisierung aus dem Verbund PROTECT eingehender erläutert.

#### ***Verbundprojekt MONACO: Diffusiver Transport von CO<sub>2</sub> aus flachen, natürlichen Quellen***

Natürlich vorhandene CO<sub>2</sub>-Quellen stellen einzigartige elementare Analogien dar, die zur Analyse der Langzeit-Speichereigenschaften und der Sicherheit einer anthropogenen geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung genutzt werden können. Die Untersuchung natürlicher CO<sub>2</sub>-Freisetzungen aus dem Untergrund liefert wertvolle Informationen zum besseren Verständnis physikalischer und chemischer Prozesse, die bei der Lagerung von CO<sub>2</sub> in geologischen Formationen ablaufen. Diese Informationen unterstützen die Entwicklung geeigneter Erkundungs- und Monitoringverfahren sowie numerischer Simulationsprojekte für die Auslegung und Überwachung geologischer CO<sub>2</sub>-Speichersysteme. Zudem vermitteln natürliche Analogien wesentliche Einsichten in Prozesse, die mit der Ausbreitung, dem Fixieren sowie potenzieller Leckagen von injiziertem CO<sub>2</sub> verbunden sind.

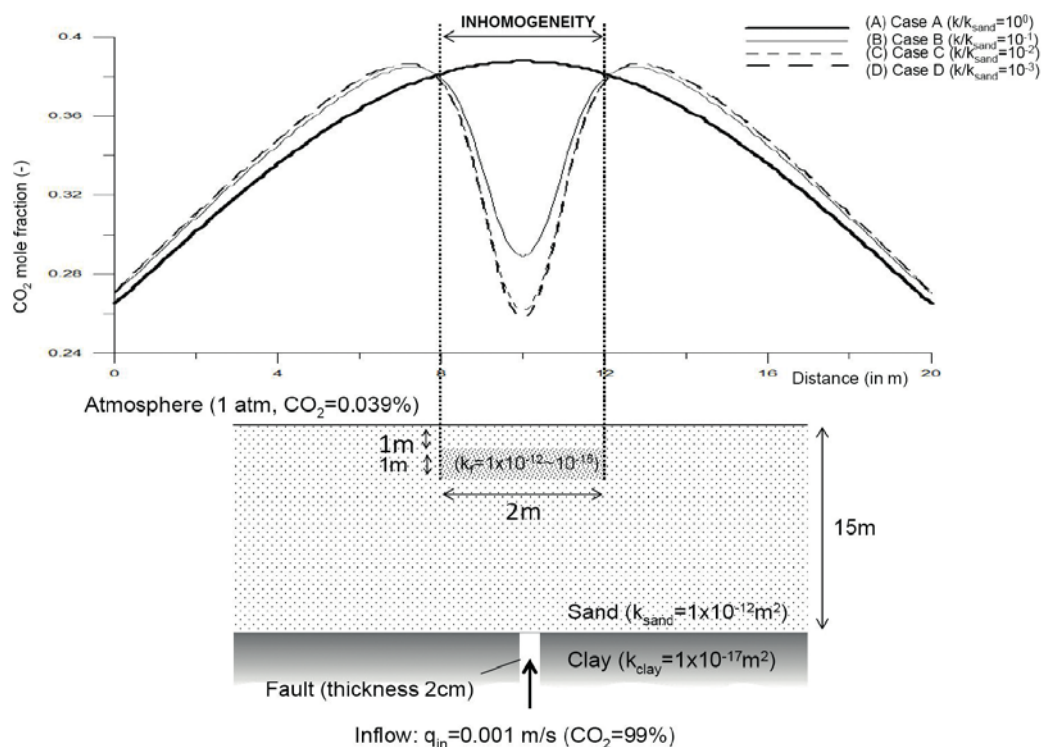
Im Verbundprojekt MONACO werden an Standorten im Egerbecken (Tschechische Republik) verschiedene geophysikalische Monitoringverfahren zur Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Konzentration sowie des CO<sub>2</sub>-Flusses an der Oberfläche getestet (z. B. Elektrische Widerstandstomographie, Eigenpotenzialverfahren, Bodengasmessungen). Diese Verfahren erlauben zuverlässige Einsichten in die Fließmuster des entweichenden CO<sub>2</sub> in Abhängigkeit von den Bodeneigenschaften und unterstützen die Analyse der Ausdehnung potenzieller Leckagesysteme. Das Egerbecken ist dabei von besonderem Interesse, da dort verschiedene Formen der Freisetzung von CO<sub>2</sub> auftreten (Mofetten, Störungen).

Standortspezifische geologische Eigenschaften oberflächennaher Schichten (z. B. Dicke, Permeabilität) sowie die meteorologischen Bedingungen erwiesen sich als die wichtigsten Parameter zur Beeinflussung der Freisetzungsmuster von CO<sub>2</sub>. Unter der Annahme, dass im oberflächennahen Untergrund vorrangig hoch-permeable Sedimente anzutreffen sind (Sand, Kies), können drei typische Situationen definiert werden: (A) die bevorzugten Fließpfade sind trocken, so dass das CO<sub>2</sub> frei durch die Poren diffundieren und direkt an die Oberfläche sowie in die Atmosphäre transportiert werden kann; (B)

durch die meteorologischen Bedingungen trocknen einige Poren des ursprünglich gesättigten Bodens aus, sodass Wasserdampf dann gemeinsam mit CO<sub>2</sub> an die Oberfläche transportiert werden kann und es zu moderateren Freisetzungsraten von CO<sub>2</sub> als in (A) kommen kann; (C) vollständig gesättigter Boden (z. B. als Folge von Regenfällen oder gestiegenem Grundwasserspiegel) wirkt als Barriere für aufsteigendes CO<sub>2</sub>, sodass es nicht an die Oberfläche gelangen kann und sich unter der gesättigten Sedimentschicht akkumuliert. Gering-permeable, z.B. tonreiche Sedimentschichten wirken analog.

Zur numerischen Analyse diffusiver Freisetzungsmuster von CO<sub>2</sub> aus natürlichen Quellen wurde im Sinne eines Benchmarks das vereinfachte Modell eines oberflächennahen Bodenbereichs erstellt, in den aus tieferen Schichten CO<sub>2</sub> gelangt (Abb. 1.4.1; Sauer et al., 2014). Ziel des Benchmarks ist es, den Einfluss von Strukturen mit variabler Permeabilität auf das Freisetzungsverhalten von CO<sub>2</sub> zu untersuchen und damit beobachtete Konzentrationsmuster von CO<sub>2</sub> zu erklären.

Das 2-D Simulationsmodell besteht aus einer 15 m dicken, inhomogenen sandigen Zone im unmittelbaren Oberflächenbereich, die sich oberhalb einer Tonschicht befindet. Diese Tonschicht enthält eine vertikale Störungszone. Die Inhomogenität der Sandschicht wird konzeptionell durch eine horizontale, 2 m lange und 1 m dicke Zone geringerer Permeabilität dargestellt, die sich 1 m unterhalb der Oberfläche befindet und aus Sand mit Tonanteilen besteht. Durch die Vorgabe variabler Werte für die Permeabilität dieser lokal abgegrenzten Zone können die oben beschriebenen, unterschiedlichen Situationen und der Einfluss unterschiedlicher Permeabilitätsverhältnisse auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration nahe der Oberfläche numerisch nachgebildet werden. Das CO<sub>2</sub> wird kontinuierlich durch die Störungszone in der unteren Tonschicht zugeführt. Die betrachteten statischen Transportprozesse unter isothermen Bedingungen (15° C) wurden mit OpenGeoSys analysiert. Für alle Bereiche des Modells wird eine Porosität von 0,2 angenommen, die Permeabilität der unteren Tonschicht mit 10<sup>-17</sup> m<sup>2</sup>, die der Sandschicht mit 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>. Die Permeabilität der lokalen Sandzone mit veränderlichem Tonanteil wird zwischen 10<sup>-15</sup> m<sup>2</sup> und 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup> variiert, um die unterschiedlichen Freisetzungsfälle abzubilden.



**Abbildung 1.4.1:** Diffusiver CO<sub>2</sub>-Transport in oberflächennahen Schichten. Numerische Ergebnisse für das horizontale Profil einer CO<sub>2</sub>-Verteilung (oben) werden für ein Modell mit einer inhomogenen Zone (unten) für die Tiefe von 0,5 m simuliert (Sauer et al., 2014).

In Abbildung 1.4.1 wird als Ergebnis der Simulationen die CO<sub>2</sub>-Konzentration entlang eines Profils in 0,5 m Tiefe unterhalb der Erdoberfläche für unterschiedliche Permeabilitätsverhältnisse zwischen dem Sandboden und der Sandzone mit Tonanteilen dargestellt.

Für den homogenen Fall einer einheitlich permeablen Sandschicht wird das Maximum der CO<sub>2</sub>-Konzentration erwartungsgemäß oberhalb der Störungszone detektiert (Kurve A). Die Konzentration nimmt mit wachsender horizontaler Entfernung von der Lage der Störungszone ab. Mit diesem Ergebnis wird der oben beschriebene Fall (A) der CO<sub>2</sub>-Freisetzung durch eine trockene Bodenschicht charakterisiert.

Weicht das Permeabilitätsverhältnis hingegen vom Wert 1 ab, d. h. die lokalisierte Sandzone mit Tonanteil wird weniger permeabel dargestellt, ändern sich Ort und Wert der maximalen CO<sub>2</sub>-Konzentration (Kurven B-D). Die Konzentration oberhalb der Störungszone strebt dabei asymptotisch einem lokalen Minimum zu, und das Konzentrationsmaximum verschiebt sich zu Orten neben den Rändern der Sandzone mit Tonanteil. Mit diesen Szenarien können die oben beschriebenen Fälle (B) der CO<sub>2</sub>-Freisetzung bei teilgesättigten Bedingungen (vergleichbar mit Kurve B in *Abb. 1.4.1*) sowie die Barrierefunktion des gesättigten Bodens im Fall (C) (vergleichbar mit dem asymptotischen Verhalten der Kurven C und D in *Abb. 1.4.1*) dargestellt werden.

Die Simulationsergebnisse dieses Benchmarks implizieren, dass es von großer Bedeutung ist, präzise Kenntnisse über die Permeabilitätsverhältnisse im oberflächennahen geologischen Raum zu haben, um gemessene Bodengaskonzentrationen adäquat interpretieren zu können. Dabei hat die Existenz von gering-permeablen Bereichen wesentlichen Einfluss auf Orte und Werte der höchsten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Gering-permeable Zonen können durch einen hohen Tonanteil in den Sedimenten oder einen hohen Sättigungsgrad der relevanten Bodenbereiche entstehen. Es wurde deutlich, dass die diffusive Freisetzung von CO<sub>2</sub> (oder anderen Gasen) streng mit (lokalen) Permeabilitätskontrasten der oberflächennahen Bodenstrukturen korreliert. Diese Vorgänge können zudem zeitlich veränderliche Charakteristika aufweisen, die beispielsweise vom jeweiligen Grad der Bodenfeuchte abhängen. Mit diesen numerischen Ergebnissen konnten im Verbundprojekt MONACO gemessene Vorgänge in ihrer Interpretation bestätigt werden (Sauer et al., 2014).

#### ***Verbundprojekt SAMOLEG: Potenzieller Aufstieg von Porenfluid über vorhandene Wegsamkeiten***

Die Ausbreitung und Fixierung von injiziertem CO<sub>2</sub> in geologischen Formationen ist sehr komplex und unregelmäßig. Um die Speicherphase von CCS-Technologien (Carbon Capture and Storage) praktikabel und sicher zu gestalten, ist es u. a. notwendig, die Möglichkeit und Mengen eines potenziellen Aufstiegs von Porenfluid (natürlich vorhandenes Porenwasser, CO<sub>2</sub> oder eine Mischung aus beidem) durch natürliche Störungszonen oder Rissysteme im Gestein abschätzen zu können. Zur Untersuchung relevanter Effekte wurde ein Benchmark definiert und mit Hilfe von OpenGeoSys realisiert, der für eine hypothetische Reservoirsituation unter Annahme realistischer geologischer und konstitutiver Parameter den Einfluss eines CO<sub>2</sub>-Transport durch freie Konvektion auf die Rissöffnung bestehender Störungen adressiert.

Gegenstand der numerischen Studie ist der Transport von CO<sub>2</sub> im superkritischen Zustand in oberflächennahe geologische Schichten über eine existierende, geneigte Störungszone. Das poröse Matrixmaterial wird als isotrop und homogen angesehen. Da die Dichte des superkritischen CO<sub>2</sub> geringer ist als die des natürlichen Porenfluids, verursachen Auftriebskräfte ein Aufsteigen des CO<sub>2</sub>, das sich zunächst lateral unterhalb einer (nahezu) impermeablen Deckgebirgsschicht ausbreitet, durch dort vorhandene Störungen oder Risse jedoch weiter aufsteigen kann.

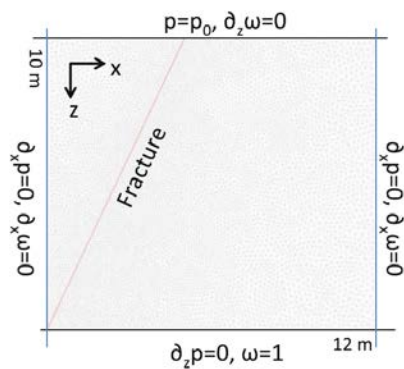
Das gekoppelte System der Feldgleichungen (Massebilanzen, Wärme- und Stofftransportgleichungen) wird gemeinsam mit dem Darcyschen Gesetz sowie den Zustandsgleichungen für Fluide nach einem volumenmodifizierten Ansatz von Peng-Robinson numerisch mittels des nichtisothermen Mehrkomponenten-Strömungsmodells für poröse Medien gelöst. Als Primärvariable wurden Druck, Temperatur und Masseanteil des CO<sub>2</sub> gewählt, deren numerische Ermittlung durch inkrementell-iterative Lösung der zeit- und ortsdiskretisierten sowie linearisierten Feldgleichungen mit monolithischen



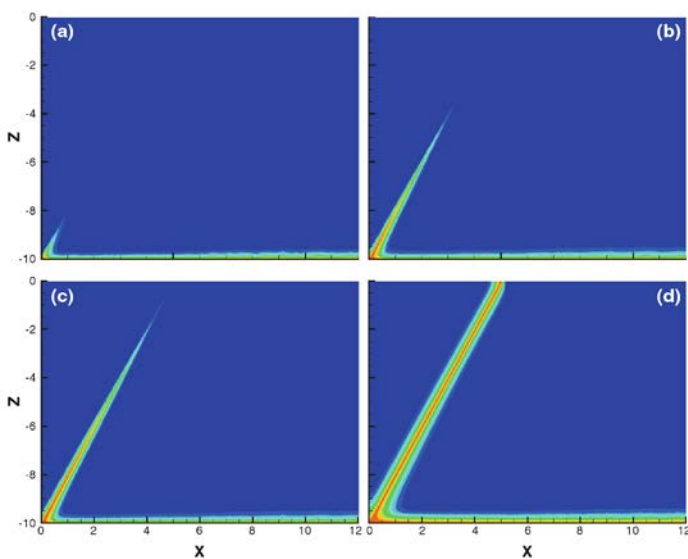
Ansätzen unter Berücksichtigung variabler Zeitschrittverfahren erfolgt. Für die Darstellung der Rissentwicklung, der durch zwei parallele Platten charakterisiert ist, wurde die Verknüpfung der intrinsischen Permeabilität mit der Rissöffnung über einen kubischen Ansatz gewählt.

Ein konzeptionelles Modell (Geometrie und Randbedingungen) für die 2-D Betrachtung der freien Konvektion von injiziertem CO<sub>2</sub> als Porenfluid erstreckt sich über einen geneigten Einzelriss im Gestein (*Abb. 1.4.2*). Das geometrische Modell wurde, unter Berücksichtigung einer Netzverfeinerung entlang des Risses, mit 14.618 Dreieckelementen räumlich diskretisiert. Der Riss selbst stellte eine eindimensionale Struktur aus 110 Linienelementen dar. Für den Anfangsdruck wurde ein Wert von 10 MPa angenommen, für die Reservoirtemperatur ein Wert von 318,15 K. Die Porosität des als isotrop und homogen angenommenen Matrixmaterials beträgt 0,1, dessen intrinsische Permeabilität 10<sup>-14</sup> m<sup>2</sup>. Zur Modellierung der Wegsamkeit des Risses wurde dessen Porosität mit dem Wert 1 charakterisiert. Der gesamte Prozess wurde über einen Zeitraum von zwei Tagen mit vorgegebenen konstanten Zeitschrittweiten von einer Stunde untersucht (Singh et al., 2013, 2014).

Das Ergebnis der Simulation wird als Entwicklung des Masseanteils von CO<sub>2</sub> für vier verschiedene Zeitpunkte dargestellt, während derer das superkritische Fluid in das gestörte Aquifersystem aufsteigt und sich insbesondere entlang des Risses ausbreitet (*Abb. 1.4.3*).



*Abbildung 1.4.2:* Simulationsmodell für die Untersuchung des potenziellen CO<sub>2</sub>-Aufstiegs über einen vorhandenen, geneigten Riss im Gestein (Singh et al., 2014).



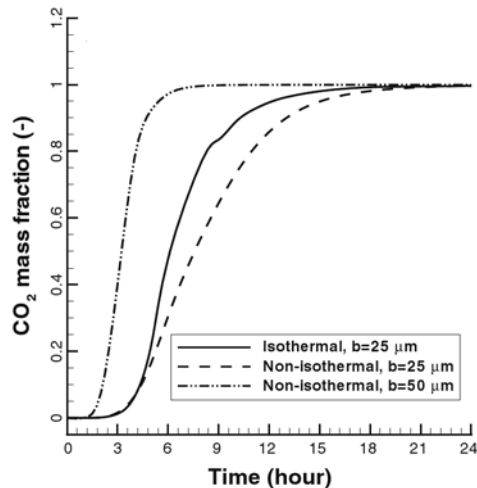
*Abbildung 1.4.3:* CO<sub>2</sub>-Aufstieg an einem Riss (Modellgröße 10x12 m; Singh et al., 2014), mit Einleitung des CO<sub>2</sub> über den unteren Modellrand. Der Stofftransport ist als Masseanteil von CO<sub>2</sub> (Werte: blau 0, rot 1) dargestellt und für verschiedene Zeitpunkte abgebildet: nach (a) 3 h, (b) 5 h, (c) 10 h, (d) 20 h.



Für den nichtisothermen Fall werden advective, dispersive und Sorptionsprozesse für den Stofftransport berücksichtigt. Durch die Dichteunterschiede gegenüber dem vorhandenen Porenfluid (Salzwasser) entstehen Auftriebskräfte, die für den advektiven Stofftransport verantwortlich sind. Da bei der gegebenen Rissöffnungsweite von 25  $\mu\text{m}$  die intrinsische Permeabilität des Matrixmaterials etwa vier Größenordnungen geringer ist als die des Risses, findet der  $\text{CO}_2$ -Transport vorrangig über diesen Riss statt. Lediglich eine geringe Menge  $\text{CO}_2$  dringt durch Dispersionsprozesse in das Matrixmaterial ein. Potenzielle Sorptionsprozesse von  $\text{CO}_2$  im vorhandenen Porenwasser werden durch das Henry-Gesetz beschrieben und verzögern des Stofftransport des injizierten Fluids (Singh et al., 2014).

Die Abhängigkeit der Stofftransporteigenschaften von der Rissöffnungsweite sowie von der Berücksichtigung von Wärmetransportvorgängen wurde ebenfalls untersucht. Ausgewählte Zeitverläufe am ersten Tag der Prozessbetrachtung (*Abb. 1.4.4*) im Zentrum des Risses zeigen, dass größere Rissöffnungsweiten, wie erwartet, den Stofftransport deutlich intensivieren. Für die Untersuchung des Einflusses der Berücksichtigung nichtisothermer Prozesse wurde das  $\text{CO}_2$  mit einer um elf Grad niedrigeren Temperatur gegenüber der Reservoirtemperatur eingeleitet. Die dadurch erhöhte Dichte des  $\text{CO}_2$  führt zu Beginn zu einer Verringerung der Wirkung von Auftriebskräften und somit zu einem verlangsamten (advektiven) Stofftransport.

Im Ergebnis der Definition und Realisierung des hier erläuterten numerischen Benchmarks konnten wesentliche Ergebnisse erzielt werden. So wurde beispielsweise die Zustandsgleichung für Fluide nach einem volumenmodifizierten Ansatz von Peng-Robinson in OpenGeoSys integriert, was eine verbesserte Beschreibung von Gas- und Fluideigenschaften in bestimmten, realitätsnahen Parameterbereichen gestattet. Eine Erweiterung auf die Betrachtung dichte-abhängiger Prozesse ist somit problemlos möglich. Es konnte bestätigt werden, dass in gestörten geologischen Systemen der advective Stofftransport gegenüber diffusiven/dispersiven Vorgängen dominiert und insbesondere Rissysteme bevorzugte Wegsamkeiten für den Porenfluidaufstieg darstellen.



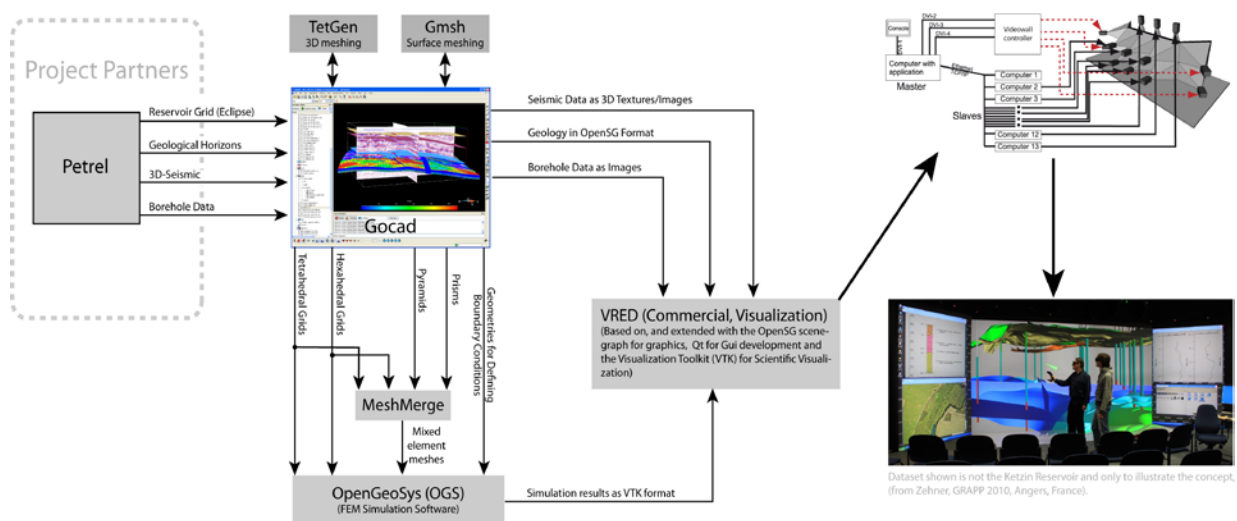
**Abbildung 1.4.4:** Untersuchung des potenziellen  $\text{CO}_2$ -Aufstiegs und Entwicklung des  $\text{CO}_2$ -Massanteils im Zentrum des Risses bei verschiedenen Rissöffnungsweiten ( $b$ ; Singh et al., 2014).

#### 1.4.2b Synoptische 3-D Visualisierung geologischer, geophysikalischer und numerischer Daten

Die wissenschaftliche 3-D Visualisierung entwickelt sich zunehmend zu einem integralen Bestandteil von Modellierungen, da sie erlaubt, komplexe oder große Datensätze sowie Mess- und Simulationsergebnisse verständlicher darzustellen, wie sie z.B. im Bereich der Reservoircharakterisierung vorliegen (z.B. Rink et al., 2013). Umgebungen mit hoch auflösenden, stereoskopischen virtuellen Realitäten, wie sie beispielsweise im Visualisierungszentrum des UFZ verfügbar sind, vereinfachen die Zusammenarbeit in Verbundprojekten mit verschiedenen Disziplinen. Zudem bietet sie

anschauliche Möglichkeiten der Präsentation von Forschungsergebnissen für Entscheidungsträger oder der Öffentlichkeit. Als große Herausforderung für die synoptische Darstellung von Daten aus unterschiedlichen Quellen stellt sich die Entwicklung geeigneter *workflows* für die Bearbeitung der Quelldaten bis hin zur 3-D Visualisierung dar. Am UFZ werden neben solchen *workflows* auch zugehörige Softwareanwendungen entwickelt.

Die Weiterentwicklung von *workflows* für die synoptische Visualisierung unterschiedlicher Datensätze aus Geologie, Geophysik und Simulation inklusive der für die Interaktion der verwendeten Softwaresysteme erforderlichen Softwarekomponenten war Ziel und ist Ergebnis der Arbeiten des hier dargelegten Projekts CO2BENCH als integratives Arbeitspaket des PROTECT-Verbunds (Abb. 1.4.5). Originale geophysikalische Daten sind beispielsweise Ergebnisse seismischer oder Bohrlochmessungen, daraus abgeleitete Daten sind z. B. seismische Attribute wie etwa Kohärenz (siehe Kapitel 1.2).



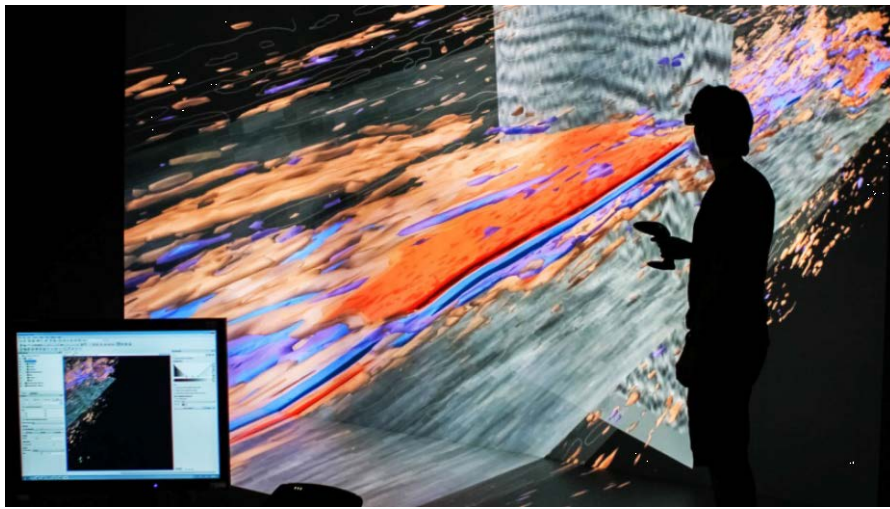
**Abbildung 1.4.5:** Workflow zur Erstellung eines synoptischen Visualisierungsmodells (Zehner, 2012), der auf beliebige geowissenschaftliche Fragestellungen angepasst werden kann.

Erste Schritte einer synoptischen 3-D Visualisierung von Daten aus dem Otway Becken waren die Darstellung eines verfügbaren, hoch aufgelösten geologischen 3-D Modells sowie Daten aus Messkampagnen mit 3-D Seismik im Softwaresystem ParaView. Da die Daten aus unterschiedlichen Quellen in unterschiedlichen Formaten vorlagen, war es zunächst erforderlich, ein abgestimmtes Softwareprotokoll für den Datenaustausch zwischen allen Partnern zu vereinbaren, wobei sich Petrel als zweckmäßigste Lösung heraus kristallisierte. Zur weiteren Bearbeitung der Quelldaten mit der universellen Visualisierungssoftware ParaView sowie dem OpenGeoSys Data Explorer wurden Konvertierungskomponenten erstellt, um Daten wie geologische Modelle (z. B. Gitter), Bohrlochinformationen aus Petrel, 3-D Seismik-Messungen aus dem SEG-Y Standardformat und geologische Horizonte aus GOCAD zu importieren. ParaView und der OpenGeoSys Data Explorer nutzen ihrerseits Elemente der Grafikkbibliothek VTK, die ein umfangreiches Angebot an Visualisierungsalgorithmen und Datenanalysemöglichkeiten zur Verfügung stellt. Über Details zu am UFZ entwickelten und vorhandenen Workflows, Algorithmen, Konvertierungskomponenten für Quelldaten und eine Vielzahl von Anwendungsbeispielen in der interaktiven wissenschaftlichen 3-D Visualisierung informiert exemplarisch die Arbeit von Bilke et al. (2014, und Referenzen darin).

Als Hauptergebnis der Visualisierungsanalysen im Rahmen des CO2BENCH liegt eine vollständige Prozedur für die synoptische wissenschaftliche 3-D Visualisierung von Daten unterschiedlicher Quellen und unterschiedlicher Formate vor. Darin eingeschlossen sind Algorithmen und Softwarekomponenten für die Interaktion der verwendeten Softwaresysteme. Diese Elemente können in einer Umgebung der virtuellen Realität zur interaktiven Sondierung, der spezifischen Auswahl

interessierender Bereiche und Ergebnisse sowie der Modifikation von Visualisierungsparametern genutzt werden. In *Abbildung 1.4.6* ist ein Moment der interaktiven Visualisierung von Struktur- und seismischen Daten aus dem Otway Becken dargestellt. Mit den entwickelten Visualisierungsmöglichkeiten war es beispielsweise möglich, durch die Darstellung seismischer Attribute (z. B. Varianz) Störungen mit geringerem Versatz zu identifizieren als mit der konventionellen Auswertung der 3-D P-Wellen Seismik. Diese ergänzende Untersuchung zur detaillierten Interpretation der 3-D Seismik unterstützt die Aufdeckung potenzieller Wegsamkeiten für Porenfluidaufstiege.

Die im Rahmen von CO2BENCH entwickelten *workflows*, Algorithmen und Softwarekomponenten gestatten synoptische 3-D Visualisierungen in stationären Systemen, wie dem TESSIN VISLab des UFZ, die Nutzung mobiler 3-D Projektoren (z. B. für die Präsentation auf Konferenzen, Workshops oder Arbeitstreffen von Projektpartnern) sowie mit Datenhelmen (head-mounted display – HMD).



*Abbildung 1.4.6:* Interaktive Visualisierung von Struktur- und seismischen Daten aus dem PROTECT-Verbund im Visualisierungszentrum des UFZ (Krawczyk et al., 2015a).

### 1.4.3 Kooperation innerhalb des Verbunds

Die *workflows* zur synoptischen 3-D Visualisierung von geologischen Strukturdaten, geophysikalischen Messergebnissen und numerischen Simulationen wurden mit den APs1-3 diskutiert und abgestimmt. Strukturelle Daten, Parameter und Modelle für die Realisierung der Visualisierung von geologischen und geophysikalischen Daten aus dem Otway Becken wurden von AP1 übernommen.

### 1.4.4 Zusammenfassung

In CO2BENCH wurde eine Systematik für CO<sub>2</sub>-Benchmarks entwickelt, die die relevanten physikalisch-chemischen Prozesse, typische Reservoirbedingungen sowie Speicherszenarien reflektieren. Dazu wurden prozessorientierte, konstitutiv orientierte und szenarienbasierte Benchmarks definiert.

Durch die Vernetzung mit anderen Verbänden wurden zusätzliche, spezifische Benchmarks erarbeitet und mit dem Finite-Element System OpenGeoSys simuliert. Es wurden folgende Themen adressiert: hydrogeologische Modelle auf Porenskala; Vergleich thermodynamischer Ansätze zur Beschreibung des konstitutiven Fluidverhaltens unter Berücksichtigung von Phasenwechseln; diffusiver Gastransport aus flachen, natürlichen Quellen; Simulation des potenziellen Fluidaufstiegs über vorhandene Wegsamkeiten in tiefen Reservoirs. Zudem konnten mit der Entwicklung von *workflows* und Algorithmen in PROTECT erste Ergebnisse einer synoptischen 3-D Visualisierung von geologischen und geophysikalischen Daten für das Otway Becken dargestellt werden.

Eine Reihe numerischer Benchmarks wurde beim in Leipzig ausgerichteten internationalen Benchmark-Workshop SSBench/CO2BENCH diskutiert.

## **2 Zahlenmäßiger Nachweis – wichtigste Positionen**

Die Zuwendungen des BMBF flossen bei allen Projektpartnern im Wesentlichen in Personalmittel. Darüber hinaus nahmen im LIAG die Mittel für Feldmessungen in Australien und die entsprechenden Transporte des Equipments dorthin eine größere Position ein.

## **3 Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführten Arbeiten**

Das Demonstrationsprojekt im Otway Becken bot für die geplanten Arbeiten ein ideales Untersuchungsgebiet, da dort neben vorhandenen Grunddaten die Möglichkeit bestand, unmittelbar zum laufenden Forschungsbetrieb und der Überführung der Ergebnisse in die Praxis beizutragen. Wichtig war ausserdem, dass die CO<sub>2</sub>-Speicherung in einen salinen Aquifer ein gutes Transferpotenzial auf Europa und Deutschland sowie die vorhandenen Antiklinalstrukturen im Untergrund eine direkte Vergleichbarkeit zum Norddeutschen Becken erwarten liessen. Somit sind die in PROTECT geleisteten Arbeiten die ersten ihrer Art weltweit an einem CO<sub>2</sub>-Demonstrationsobjekt.

Die Erarbeitung des geologischen Modells im Otway Becken und die daraus abgeleitete Störungsinterpretation waren eine Voraussetzung für die sich anschließenden Arbeiten in der Retrodeformation, der Vorwärtsmodellierung sowie Eingangsgröße für die Visualisierung. In diesem Zusammenhang sind besonders die im Antrag nicht in diesem Umfang vorgesehenen Bemühungen um die Interpretation der wichtigen Markerhorizonte (Reservoir, Seal, Überbau) als notwendig und angemessen zu erwähnen. Die wissenschaftliche 3-D Visualisierung war dabei für die Darstellung von seismischen Strukturen und Interpretationen aus unterschiedlichen Quellen wichtig.

Verfeinert wurde das strukturelle Modell ausserdem durch die Abbildung des Reservoirhorizontes mit neuen Attributen. So konnte im Verlauf der Arbeiten eine Aktualisierung des bestehenden Tiefenmodells stattfinden und dieses über eine zusätzliche Kooperation mit dem LBEG als 3-D pdf-file für die wissenschaftliche Allgemeinheit nutzbar gemacht werden. Diese Arbeiten waren erforderlich, um Vorhersagen zur Deformation im Untergrund und Abschätzung kritischer Drücke machen zu können.

Ein wesentlicher Baustein wurde durch die Analyse der subseismischen Verformung im Untersuchungsgebiet geliefert. Die sich daraus ergebende Kartierung für das Top Reservoir stellt im Vergleich zu einer üblichen Kartierung und Darstellung des Horizonts als Tiefenkarte eine Auflösung bereit, die mit keiner anderen Methode von der Oberfläche aus geleistet werden konnte. Dies gilt gleichermassen für die Anwendung der neuen seismischen Attribute.

Notwendig waren die methodisch grundlegenden Arbeiten zur Überprüfung der Algorithmen zur Retrodeformation. Nur so konnte deren robuste Anwendbarkeit gewährleistet werden. Im Sinne der Tragweite der damit erzielten Ergebnisse waren diese Schritte essenziell.

Ergänzend dazu sind die geomechanischen Modellierungen substanziell für das Verständnis der Variabilität der gesteinsphysikalischen Eigenschaften im Untergrund und deren Einfluß auf Vorhersagen. Insbesondere hinsichtlich belastbarer Prognosen zum rezenten tektonischen Spannungsfeld war eine möglichst lagerstätten-spezifische Modellierung erforderlich, da sich laterale und vertikale Materialunterschiede gemeinsam mit Störungen in erheblichem Umfang auf Spannungsmagnituden und –orientierungen auswirken können.

Wichtig waren hier auch die neuen Messungen mit der Scherwellenseismik, die eine Populierung der Modelle erlaubten, bzw. ein Proxy für die Variabilität innerhalb dieser Modelle lieferten. Erst so konnten besser an die Realität angelehnte Modelle berechnet und eine Aussage gemacht werden, wie sich eine potenzielle CO<sub>2</sub>-Ausbreitung in einem lateral inhomogenen Speicher auswirkt. Dies trägt massgeblich zum Verständnis der Wechselwirkungsprozesse zwischen heterogenen Gesteinen und Spannungsvariationen bei.

In Ergänzungen zu den vorhandenen P-Wellen Daten auch neue S-Wellen Daten zu messen hat sich als zielführend und ausschlaggebend für den Erfolg des Projekts heraus gestellt. Die neuen Profile

haben zum einen die strukturelle Verbindung zur Erdoberfläche und damit zu den Schutzgütern hergestellt, zum anderen war so die selbständige Validierung der Vorhersagen der Deformationsmodellierung erst möglich. Insofern sind die Bemühungen um die Durchführung der Feldmessungen als notwendig und darüber hinaus als essenziell für das Projekt zu betrachten. Der eigene Mitteleinsatz ist somit ausserdem als angemessen zu bewerten. Die Mithilfe der Partner vor Ort hat ausserdem zusätzlich unterstützt und ergänzt, was hier noch einmal heraus gestellt werden soll.

Die Entwicklung, numerische Realisierung, Validierung und Nutzung integrativer Modellierungsinstrumentarien für die Simulation problemspezifischer, gekoppelter Prozesse leistet einen wesentlichen methodischen Beitrag zur systematischen Analyse und Prognostizierung von Vorgängen bei der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung. In dem inhaltlich übergreifenden, konzeptionellen und methodischen Ansatz zum Benchmarking nehmen die hier erzielten Projektergebnisse eine führende wissenschaftliche Rolle bei der effizienten Planung und Bewirtschaftung der untersuchten geotechnischen Systeme ein. Die Erweiterung der bestehenden OpenGeoSys-Plattform ist dabei als angemessen zu bewerten, zumal zusätzliche Eigenmittel eingeflossen sind.

Mit den Arbeiten in PROTECT konnte insgesamt gezeigt werden, dass die geologische Speicherung von CO<sub>2</sub> am Pilotstandort im Otway Becken sicher und verlässlich erfolgen kann. Aufgrund der Tatsache, dass die erzielten Ergebnisse bereits direkt in die weiteren Monitoringkonzepte dieses Demonstrationsprojektes einfließen, bewerten wir die in PROTECT durchgeführten Arbeiten als wissenschaftlich erfolgreich und essenziell, auch aufgrund der guten Übertragbarkeit auf andere Zielgebiete. Die Arbeiten waren notwendig und angemessen.

#### **4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die in PROTECT gewonnenen Ergebnisse zur subseismischen Abbildung der Deformation im Untergrund und der Modellierung von kritischen Drücken zum Speicherbetrieb sind eine wesentliche Grundlage für den Betrieb des Demonstrationsprojektes im Otway Becken.

Die hier entwickelten Methoden sind ausserdem für viele Fragestellungen, die Wegsamkeiten im Untergrund betreffen, von Bedeutung. Hier sind neben der etablierten Kohlenwasserstoff-Exploration beispielhaft für neu wachsende Bereiche wie die Geothermie, Fragestellungen im Zusammenhang mit Grundwasser oder generell der Betrieb von Speichern oder Endlagern zu nennen.

Die in AP1 erzielten Ergebnisse zeigen beispielhaft die Erkenntniskette von der geologischen Interpretation über die subseismische Vorhersage von Deformation bis hin zur Überprüfung/Validierung der prognostizierten Bereiche auf. Hinzu kamen methodische Arbeiten zur Störungsdynamik, die in der Fachwelt auf breites Interesse stiessen. Hier ist zu erwarten, dass die grundlegende methodische Herangehensweise ausgebaut und vielfältig genutzt werden wird. Auch wenn dies zunächst in der eher akademischen Welt Berücksichtigung finden wird, ist eine weiterreichend Anwendung auf dem Explorationssektor zu erwarten. Gleiches gilt für die zunehmende Verbreitung der aktiven reflexionsseismischen Scherwellentechniken.

Die in PROTECT vorgenommenen Entwicklungen zur Kohärenz und Krümmungsberechnung entlang von Horizonten ergänzen vorhandene Techniken, indem die Berechnung der Krümmungs- und Richtungsattributen in die bestehende TEEC-Software integriert wurde (AP2). Die neuen Horizont- und Störungsattribute eröffnen zusätzliche Möglichkeiten zur Charakterisierung von bestimmten Bereichen eines Speichers bzw. einer Lagerstätte. Die physikalischen Parameter und das Speicherverhalten dieser Bereiche kann durch Korrelation mit Bohrungen genauer eingegrenzt werden, so dass flächendeckende Aussagen zum Speicher möglich sind. Wesentlich für die Vermarktung der neuen Horizont- und Störungsattribute ist die verbesserte und variabelere 2-D/3-D Darstellung, die für potenzielle Kunden einfacher zu integrieren ist als in der bisherigen Beschränkung auf eine Inline/Crossline-Darstellung. Hierauf beruht die Erwartung, eine höhere Nachfrage und Akzeptanz durch den Kunden zu erzielen.



Die in *AP3* erzielten Ergebnisse sind von grundsätzlicher Bedeutung für eine etwaige weitere Nutzung des Speichers im Otway Becken. Zum einen können die Modelle zum rezenten tektonischen Spannungsfeld für eine optimierte Bohrfadplanung genutzt werden. Zum anderen liefern die hydromechanisch gekoppelten Modelle entscheidende Eckdaten für den sicheren Betrieb des Speichers, d.h. die zur Vermeidung einer Reaktivierung der Störungen maximal möglichen Injektionsdrücke und damit das maximale Speichervolumen der Struktur. In methodischer Hinsicht ist insbesondere die Einbeziehung des gesamten Oberbaus in die Modellierung und die Population des Modells mit lateral und vertikal variierenden mechanischen Materialeigenschaften (in Zusammenarbeit mit AP1) als besonders innovativ zu bewerten. Diese methodischen Ansätze und die erfolgreiche Erprobung an dem Speicher des CO2CRC Otway Demonstrationsprojektes eröffnen weitreichende Anwendungen über die untertägige CO<sub>2</sub>-Speicherung hinaus (s.o.).

Das numerische Benchmarking wurde erfolgreich hinsichtlich einer einheitlichen Systematik weiter entwickelt (*AP4*), indem inhaltliche Zielstellungen für Code-Anforderungen definiert und gruppiert oder auch Vergleiche wissenschaftlicher Simulatoren durchgeführt wurden. Diese wurden anhand von Testbeispielen sowohl in Buchform dokumentiert als auch auf der Internetplattform des OpenGeoSys verfügbar gemacht. Durch den internationalen SSBench-Workshop in Leipzig und sich daran anschließende Initiativen sind die Ergebnisse verwertet worden und werden kontinuierlich von der entsprechenden Fachgruppe gepflegt und weiter entwickelt.

Die im Verbund erzielten Ergebnisse von PROTECT werden im internationalen Kontext positiv bewertet. Das CO2CRC-Konsortium verwendet die erreichten Aussagen zur Struktur- und Untergrundsabbildung mit physikalischen Parametern bereits, um neue Feldmessungen entsprechend anzupassen. Auf Geothermie ausgerichtete Projekte in der Bayerischen Molasse werden ebenfalls diese Kombination von Methoden für eine Bewertung des Karbonatsystems verwenden. Internationale Arbeitsgruppen sind an einem Datenaustausch interessiert, und neue Projektideen werden darauf aufbauend erarbeitet.

Die erfolgten und geplanten Publikationen in Fachzeitschriften (Kapitel 6) und die Qualifikationsarbeiten (Kapitel 7) belegen den wissenschaftlichen Erfolg von PROTECT. Die, z.T. auch eingeladenen, Präsentationen auf nationalen und internationalen Konferenzen haben die Sichtbarkeit und Anerkennung der Ergebnisse ebenfalls maßgeblich mitbestimmt. Die Projektergebnisse sind darüber hinaus auch Grundlage für das Erstellen von Handlungsempfehlungen, z.B. als Teil vom AUGÉ-Projekt.

Die Internetseite des Forschungsprojekts (<http://www.liag-hannover.de/s/s1/p1/protect.html>) wird weiterhin zugänglich bleiben und für die noch im Nachlauf befindlichen Publikationen in PROTECT genutzt werden.

Von den Projektpartnern sind keine eigenen Schutzrechtanmeldungen geplant, und es wurden auch keine fremden Schutzrechtanmeldungen in Anspruch genommen.

## **5 Fortschritt des Vorhabens bei anderen Stellen**

Nach Kenntnis der Autoren gibt es derzeit weltweit keine vergleichbaren Forschungsarbeiten oder Ergebnisse in den Arbeitsbereichen von *AP1*, *AP2* und *AP3*.

Mit Bezug zu *AP4* sind im numerischen Benchmarking insbesondere die internationalen Initiativen DECOVALEX (Hudson & Jing, 2013), SSBench und Sim-SEQ (Mukhopadhyay et al., 2015) zu nennen, in denen das UFZ überall Partner ist. Zur synoptischen, wissenschaftlichen 3-D Visualisierung gibt es nach Kenntnis der Bearbeiter von AP4 aktuell keine zu PROTECT vergleichbaren Veröffentlichungen.

Austausch und Diskussion bei Tagungen sowie das Verfolgen der Fachliteratur ermöglichen, den aktuellen internationalen Wissens- und Ergebnisstand zu den hier verwendeten Methoden kontinuierlich in die eigenen Arbeiten einfließen zu lassen. Durch Veröffentlichungen von dritter Seite wurden die Ziele und der Verlauf von PROTECT aber nicht berührt.

## 6 Veröffentlichung der Ergebnisse

Unmittelbar auf das Projekt bezogene und methodisch vorbereitende bzw. anknüpfende Publikationen sind hier aufgeführt. Weitere vorbereitende Arbeiten können zusätzlich in Teil I, Kapitel 1.7 nachgelesen werden.

### 6.1 Erfolgte Veröffentlichungen

Die genannten Publikationen sind durch Begutachtungsverfahren gelaufen (6.1.1) oder haben dazu gedient, mit Tagungsbeiträgen die Ergebnisse zu diskutieren und zu hinterfragen (6.1.2, 6.1.3).

#### 6.1.1 Publikationen

- Aruffo, C.M., Herrera Rodriguez, A., Tenthorey, E., Krzikalla, F., Minton, J., Henk, A. & PROTECT Research Group, 2014. Geomechanical Modelling to Assess Fault Integrity at the CO2CRC Otway Project, Australia. *Australian J. of Earth Sci.*, 61 (7), 987-1000; doi: 10.1080/08120099.2014.958876.
- Bilke, L., Fischer, T., Helbig, C., Krawczyk, C.M., Nagel, T., Naumov, D., Paulick, S., Rink, K., Sachse, A., Schelenz, S., Walther, M., Watanabe, N., Zehner, B., Ziesch, J. & Kolditz, O., 2014. TESSIN VISLab - Laboratory for Scientific Visualization. *Environmental Earth Sciences*; 72 (10), 3881-3899; doi: 10.1007/s12665-014-3785-5.
- Böttcher, N., Taron, J., Kolditz, O., Park, C. & Liedl, R., 2012. Evaluation of thermal equations of state for CO<sub>2</sub> in numerical simulations. *Environmental Earth Sciences*, 67 (2), 481-495; doi: 10.1007/s12665-012-1704-1.
- Kolditz, O., Bauer, S., Bilke, L., Böttcher, N., Delfs, J.-O., Fischer, T., Görke, U.-J. & 19 others, 2012. OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media. *Environmental Earth Sciences*, 67 (2), 589-599; doi: 10.1007/s12665-012-1546-x.
- Krawczyk, C.M., Henk, A., Tanner, D.C., Trappe, H., Ziesch, J., Beilecke, T., Aruffo, C.M., Weber, B., Lippmann, A., Görke, U.-J., Bilke, L. & Kolditz, O., 2015a. Seismic and sub-seismic deformation prediction in the context of geological carbon trapping and storage. *Advanced Technologies in Earth Sciences*, pp. 97-113; doi: 10.1007/978-3-319-13930-2\_5.
- Sauer, U., Watanabe, N., Singh, A., Dietrich, P., Kolditz, O. & Schütze, C., 2014. Joint interpretation of geoelectrical and soil-gas measurements for monitoring CO<sub>2</sub> releases at a natural analogue. *Near Surface Geophysics*, 12 (1), 165-187; doi: 10.3997/1873-0604.2013052.
- Singh, A.K., Delfs, J.-O., Goerke, U.-J. & Kolditz O., 2014. Towards physical aspects affecting a possible leakage of geologically stored CO<sub>2</sub> into the shallow subsurface. *Acta Geotechnica*, 9(1), 81-86; <http://dx.doi.org/10.1007/s11440-013-0237-4>.
- Tanner, D.C., Ziesch, J., Luebben, N., Krawczyk, C.M. & Beilecke, T., 2015. Propagation of synsedimentary faults within the Otway passive margin basin, Australia. *Special Publication of the Geological Society of London*, in revision.
- Ziesch, J., Tanner, D.C. & Krawczyk, C.M., 2014. Strain Associated with the Fault-Parallel Flow Algorithm During Kinematic Fault Displacement. *Mathematical Geosciences*, 46 (1), 59-73; doi: 10.1007/s11004-013-9464-3.
- Ziesch, J., Aruffo, C.M., Tanner, D.C., Beilecke, T., Dance, T., Henk, A. Weber, B., Tenthorey, E., Lippmann, A. & Krawczyk, C.M., 2015a. Geological structure of the CO2CRC Otway Project pilot site: fault kinematics based on quantitative 3D seismic interpretation. *Basin Research*, accepted.

#### Begutachtete Proceedings

- Aruffo, C.M. & Henk, A., 2014. Fault Stability and Potential Fault Reactivation Analysis in Otway Basin, Australia. 4<sup>th</sup> EAGE CO<sub>2</sub> Geological Storage Workshop, 4 pp.; doi: 10.3997/2214-4609.20140072.

- Kolditz, O., Görke, U.-J., Shao, H.B., Wang, W., Shao, H., Hudson, J.A. & Feng, X.-T., 2013. Thermo-hydro-mechanical-chemical processes in fractured rock. *3<sup>rd</sup> ISRM Sinorock Symposium*, Shanghai/PR China; CRC Press Hoboken, p. 49-60.
- Krawczyk, C., Tanner, D., Henk, A., Trappe, H. & Urosevic, M., 2011. Sub-/seismic deformation prediction - Development of a new seismo-mechanical workflow in the Otway Basin. *First Sustainable Earth Sciences Conference*, 5 pp.
- Krawczyk, C.M., Tanner, D.C. & PROTECT Research Group, 2014. Communication between reservoir and surface - sub-seismic deformation prediction as tool for leakage assessment. *4<sup>th</sup> EAGE CO<sub>2</sub> Geological Storage Workshop*, 4 pp.; doi: 10.3997/2214-4609.20140117.
- Krawczyk, C.M., Tanner, D.C., Ziesch, J., Beilecke, T. & Henk, A., 2015b. Deformation prediction in the Otway Basin – a seismo-mechanical workflow for sub-/seismic fault detection. *3<sup>rd</sup> Sustainable Earth Science Conference*, 5 pp.
- Rink, K., Bilke, L. & Kolditz, O., 2013. Visualisation strategies for modelling and simulation using geoscientific data. *Workshop on Visualisation of Environmental Sciences (EnvirVis)*, The Eurographics Association, p. 47-51; doi: 10.2312/PE.EnvirVis.EnvirVis13.047-051.
- Singh, A.K., Delfs, J.-O., Böttcher, N., Taron, J., Wang, W., Görke, U.-J. & Kolditz, O., 2013. A benchmark study on non-isothermal compositional fluid flow. *GHGT-11*; Energy Procedia, 37, 3901-3910; doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.288.
- Ziesch, J., Tanner, D.C., Beilecke, T. & Krawczyk, C.M., 2015. Fault kinematics based on quantitative 3-D seismic interpretation. *Deformation, Rheology and Tectonics (DRT)*, 4 pp.

### **Berichte**

- Beilecke, T., Tanner, D. & Singh, R., 2013. Operations Closeout Report\_LIAG Survey. *Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies*, CO2CRC Publication Number RPT13-4785, 27 pp.
- Beilecke, T., Krawczyk, C.M. & Tanner D.C., 2014. Seismic Program Closeout Report - Shallow Shear Wave Data Acquisition Survey. *Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies*, CO2CRC Publication Number RPT14-4950, 73 pp.
- Zehner, B., 2012. Scientific 3D visualization – representing complex data sets in a comprehensive way. *UFZ-Bericht 6/2012*, 82 pp.

### **6.1.2 Vorträge**

- Aruffo, C.M. & PROTECT Research Group (2014): Fault stability and potential fault reactivation analysis in the Otway Basin. Fourth EAGE CO<sub>2</sub> Geological Storage Workshop, Stavanger/Norway.
- Beilecke, T. (2013): Modellierung oberflächennaher Reflexionsseismik mit P- und SH-Quellen zum besseren Verständnis und zur Planung hochauflösender Feldmessungen. Geophysikalisches Seminar KIT, Karlsruhe.
- Beilecke, T., Krawczyk, C.M., Tanner, D.C., Ziesch, J. & PROTECT Research Group (2014): Comparison of shear-wave velocities found in SH-wave and in P-wave reflection measurements. SEISMIX conference, Barcelona/Spain.
- Beilecke, T., Krawczyk, C.M., Tanner, D.C., Ziesch, J. & PROTECT Research Group (2014): Poisson's ratio model derived from P- and S-wave reflection seismic data at the CO2CRC Otway Project pilot site, Australia. General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna/Austria.
- Beilecke, T., Krawczyk, C.M., Tanner, D.C. & Ziesch, J. (2014): Bestimmung eines Poissonzahlen-Modells aus reflexionsseismischen Messungen am CO2CRC Otway Project Pilot Site, Australien. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Karlsruhe.

- Görke, U.-J., Kolditz, O. & OpenGeoSys Developer Team (2014). How to validate dynamic models? AUGE Workshop at XXth Int. Conference Computational Methods in Water Resources, Stuttgart.
- Kolditz, O., Görke, U.-J., Shao, H.B., Wang, W., Shao, H., Hudson, J.A. & Feng, X.-T. (2013). Thermo-hydro-mechanical-chemical processes in fractured rock. The 3rd ISRM Symposium on Rock Mechanics, Shanghai/China.
- Krawczyk, C.M. & PROTECT Research Group (2012): The joint project PROTECT - Development of a new workflow for sub-/seismic deformation prediction. Keynote at CO2CRC Symposium 2012, Coolum/Australia.
- Krawczyk, C.M. & PROTECT Research Group (2012): Prediction Of deformation To Ensure Carbon Traps – the joint project PROTECT. GeoHannover, Hannover; SDGG, 80, p. 295.
- Krawczyk, C.M. & PROTECT Research Group (2012): The joint project PROTECT - Development of a seismo-mechanical workflow for sub-/seismic deformation prediction and verification in the Otway Basin. Kick-Off Seminar 'Geological Storage of CO2', Hannover.
- Krawczyk, C.M. & PROTECT Research Group (2013): The joint project PROTECT - First models and sub-/seismic predictions. CO2CRC Research Symposium, Hobart/Australia.
- Krawczyk, C.M. & PROTECT Research Group (2013): The joint project PROTECT – first models and sub-/seismic predictions. GEOTECHNOLOGIEN-Statusseminar, GFZ, Potsdam.
- Krawczyk, C.M. & PROTECT Research Group (2014): Seismic and sub-seismic deformation prediction for the assessment of possible pathways: the joint project PROTECT. CO2CRC Research Symposium, Torquay/Australia.
- Krawczyk, C.M. & PROTECT Research Group (2014): PROTECT- sub-seismic deformation prediction as tool for leakage assessment. GEOTECHNOLOGIEN-Statusseminar, UFZ, Leipzig.
- Krawczyk, C.M., Tanner, D.C. & PROTECT Research Group (2014): Seismic and sub-seismic deformation prediction for the assessment of possible pathways – the joint project PROTECT. AGU Fall Meeting, San Francisco/USA.
- Krawczyk, C.M., Tanner, D.C., Henk, A., Trappe, H. & Urosevic, M. (2011): Sub-/seismic deformation prediction - Development of a new seismo-mechanical workflow in the Otway Basin. 1st Sustainable Earth Sciences Conference & Exhibition, Valencia/Spain.
- Krawczyk, C., Tanner, D., Henk, A., Trappe, H., Kolditz, O. & Urosevic, M. (2011): Deformationsvorhersage zur Absicherung von CO<sub>2</sub>-Speichern - das Verbundprojekt PROTECT. LIAG-Austauschsitzung, Hannover.
- Krawczyk, C.M., Tanner, D.C. & PROTECT Research Group (2014): Seismic and sub-seismic deformation prediction for the assessment of possible pathways - the joint project PROTECT. AGU Fall Meeting, San Francisco/USA.
- Rink, K., Bilke, L. & Kolditz, O. (2013): Visualisation strategies for modelling and simulation using geoscientific data. Workshop on Visualisation of Environmental Sciences (EnvirVis), Leipzig.
- Tanner, D.C., Ziesch, J., Beilecke, T. & Krawczyk, C.M. (2014): Kinematic analysis of normal faults in the Otway Basin, Australia. Conference on Geometry and Growth of normal faults, London/UK.
- Tanner, D.C., Ziesch, J., Beilecke, T. & Krawczyk, C.M. (2014): Kinematic analysis of normal faults from 3D seismics within the Otway Basin, Australia: evidence for oblique movement in a passive margin. AGU Fall Meeting, San Francisco/USA.
- Weber, B. & Henk, A. (2014): Incorporation of spatial variations in elastic rock properties in geomechanical reservoir models- workflow and case studies. AAPG Conference, Istanbul/Turkey.
- Ziesch, J. & PROTECT Research Group (2013): Ein Projekt zur Vorhersage von Deformation zur Gewährleistung von Sicherheit eines CO<sub>2</sub>-Speichers. CCS-Dialog, Hannover.

- Ziesch, J., Aruffo, C.M., Tanner, D.C., Beilecke, T. & Krawczyk, C.M. (2013): Sub-seismic deformation prediction of potential pathways and seismic validation - joint project PROTECT. General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna/Austria.
- Ziesch, J., Tanner, D., Krawczyk, C.M., Aruffo, C., Beilecke, T. & PROTECT Research Group (2013): PROTECT - first models and sub-/seismic predictions. CO2CRC Symposium, LIAG/PROTECT workshop, Hobart/Australia.
- Ziesch, J. & Beilecke, T. (2014): PROTECT - Deformationsvorhersage zur Gewährleistung von Sicherheit eines CO<sub>2</sub>-Speichers. LIAG-Seminar, Hannover.
- Ziesch, J., Tanner, D.C., Dance, T., Beilecke, T. & Krawczyk, C.M. (2014): Fault kinematics and retro-deformation analysis for prediction of potential leakage pathways - joint project PROTECT. General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna/Austria.
- Ziesch, J., Beilecke, T., Tanner, D. & Krawczyk, C. (2015): PROTECT - Abbildung von seismischer und sub-seismischer Deformation. LIAG-Kuratorium, Hannover.
- Ziesch, J., Beilecke, T., Tanner, D. & Krawczyk, C. (2015): Seismische und sub-seismische Deformation im Kontext des australischen Demonstrationsprojekts zur geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung (Projekt PROTECT). LIAG-Seminar, Hannover.

### 6.1.3 Poster

- Aruffo, C.M., Henk, A. & PROTECT Research Group (2012): Workflow for geomechanical modeling of CO<sub>2</sub> storage in the Otway Basin/Australia. Kick-Off Seminar 'Geological Storage of CO<sub>2</sub>', Hannover.
- Aruffo, C.M. & PROTECT Research Group (2013): Workflow for geomechanical modeling to ensure CO<sub>2</sub> storage in the Otway Basin, Australia – joint project PROTECT. 4th IGSC Conference, Berlin.
- Aruffo, C.M., Henk, A. & PROTECT Research Group (2013): Seismo-mechanic workflow to ensure CO<sub>2</sub> storage in the Otway Basin, Australia. 75th EAGE Conference, London/UK.
- Aruffo, C.M., Henk, A. & PROTECT Research Group (2013): 3D structural model of the Otway project site, Australia. GEOTECHNOLOGIEN-Statusseminar, GFZ, Potsdam.
- Aruffo, C.M., Henk, A. & PROTECT Research Group (2013): Geomechanical workflow to ensure CO<sub>2</sub> storage in Otway Basin, Australia. CO2CRC Research Symposium, Hobart/Australia.
- Aruffo, C.M. & PROTECT Research Group (2014): Fault stability assessment of the CO2CRC Otway Project, Australia – A geomechanical approach. 76th EAGE Conference, Amsterdam/NL.
- Aruffo, C.M., Henk, A. & PROTECT Research Group (2014): Fault stability assessment of the CO2CRC Otway Project, Australia – A geomechanical approach. GEOTECHNOLOGIEN-Statusseminar, UFZ, Leipzig.
- Aruffo, C.M., Henk, A. & PROTECT Research Group (2014): Fault stability assessment of the CO2CRC Otway Project, Australia – A geomechanical approach. CO2CRC Research Symposium, Torquay/Australia.
- Beilecke, T. & PROTECT Research Group (2012): Finite Difference Modeling of the near surface seismic wavefield as a field work planning tool. Kick-Off Seminar 'Geological Storage of CO<sub>2</sub>', Hannover.
- Beilecke, T., Burschil, T. & Krawczyk, C.M. (2012): Finite-Difference Modelling of the Near-Surface Seismic Wavefield as a Planning and Evaluation Tool. Austauschsitung LIAG, Hannover.
- Beilecke, T., Krawczyk, C.M. & PROTECT Research Group (2013): Analysis of shear-wave information in P-wave seismic data. GEOTECHNOLOGIEN-Statusseminar, GFZ, Potsdam.
- Beilecke, T., Krawczyk, C.M. & PROTECT Research Group (2013): Detection of shear waves in seismic compressional wavefield measurements. CO2CRC Research Symposium, Hobart/Australia.



- Beilecke, T., Krawczyk, C.M., Tanner, D.C., Ziesch, J. & PROTECT Research Group (2014): PROTECT high-resolution 2-D shear wave reflection seismic at the CO2CRC Otway site. LIAG-Austauschsitzung, Hannover.
- Beilecke, T., Krawczyk, C.M., Tanner, D.C., Ziesch, J. & PROTECT Research Group (2012): PROTECT: Finite-Difference Modelling of P and S waves to Support Fieldwork Planning. LIAG-Austauschsitzung, Hannover.
- Beilecke, T., Krawczyk, C.M., Tanner, D.C., Ziesch, J. & PROTECT Research Group (2013): Finite-Difference Modelling of P and S Waves to Support Fieldwork Planning. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Leipzig.
- Beilecke, T., Krawczyk, C.M., Tanner, D.C., Ziesch, J., Urosevic, M., Henk, A., Trappe, H., Lippmann, A. & Kolditz, O. (2012): Quantitative mechanische Analyse seismischer Daten - Verbundprojekt PROTECT. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Hamburg.
- Beilecke, T., Krawczyk, C.M., Ziesch, J. & Tanner, D.C. (2015): High resolution fault detection at the CO2CRC Otway Project site using shear-wave reflection seismics. General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna/Austria.
- Beilecke, T., Krawczyk, C.M., Ziesch, J., Tanner, D.C. & PROTECT Research Group (2014): PROTECT high resolution 2-D shear wave reflection seismics at the CO2CRC Otway site. CO2CRC Research Symposium, Torquay/Australia.
- Beilecke, T., Ziesch, J., Tanner, D.C., Krawczyk, C.M. & PROTECT Research Group (2014): High resolution 2-D shear wave seismic survey in Australia as deformation validation tool within PROTECT. GEOTECHNOLOGIEN-Statusseminar, UFZ, Leipzig.
- Bilke, L. & Kolditz, O. (2012). Open source software engineering for geoscientific modeling applications. AGU Fall Meeting, San Francisco/USA.
- Bilke, L., Ziesch, J. & PROTECT Research Group (2013): Geological and geophysical data integration and visualization of the CO2CRC Otway project pilot site. GEOTECHNOLOGIEN-Statusseminar, GFZ, Potsdam.
- Bilke, L., Ziesch, J. & PROTECT Research Group (2013): Geological and geophysical data integration and visualization of the CO2CRC Otway project pilot site. CO2CRC Research Symposium, Hobart/Australia.
- Bilke, L., Ziesch, J. & PROTECT Research Group (2014): Integrated processing and 3D-visualization of geological and geophysical data of the CO2CRC Otway project pilot site. GEOTECHNOLOGIEN-Statusseminar, UFZ, Leipzig.
- Böttcher N., Singh, A.K., Taron, J., Liedl, R. & Kolditz, O. (2012): An open source modeling framework for CO<sub>2</sub> storage in depleted gas reservoirs and saline aquifers. AGU Fall Meeting, San Francisco/USA.
- Kolditz, O., Bauer, S., McDermott, C., Kosakowski, G., Park, C.-H., Taron, J., Shao, H. & OGS Team (2012). Thermo-hydro-mechanical-chemical processes in fractured-porous media: coupling & bench-marking. AGU Fall Meeting, San Francisco/USA.
- Krawczyk, C.M., Kolditz, O. & PROTECT Research Group (2013): Sub-seismic deformation prediction of potential pathways and seismic validation – the joint project PROTECT. AGU Fall Meeting, San Francisco/USA.
- Krawczyk, C.M., Tanner, D.C. & PROTECT Research Group (2014): Communication between reservoir and surface - sub-seismic deformation prediction as tool for leakage assessment. Fourth EAGE CO<sub>2</sub> Geological Storage Workshop, Stavanger/Norway.
- Krawczyk, C.M., Tanner, D.C., Urosevic, M., Henk, A. & Trappe, H. (2010): Development of a new seismo-mechanical workflow for sub-/seismic prediction and verification of communication between reservoir and surface. - Invited, CO2CRC conference, Melbourne/Australia.

- Naumov, D. & Kolditz, O. (2013): Validation of Direct Numerical Simulations in 3D pore geometries and Large-Eddy Simulations. General Assembly European Geosciences Union, Vienna/Austria.
- Singh, A.K., Delfs, J.-O., Böttcher, N., Taron, J., Wang, W., Görke, U.-J. & Kolditz, O. (2012). A benchmark study on non-isothermal compositional fluid flow. International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT), Kyoto/Japan.
- Singh, A., Delfs, J.-O., Görke, U.-J. & Kolditz, O. (2013). Assessment of well safety from pressure and temperature induced damage during CO<sub>2</sub> injection in deep saline aquifers. AGU Fall Meeting, San Francisco/USA.
- Singh, A.K., Delfs, J.-O., Shao, H. & Kolditz, O. (2013). Characterization of CO<sub>2</sub> leakage into the freshwater body. General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna/Austria.
- Singh, A., Watanabe, N., Sauer, U., Schütze, C., Görke, U.-J., Kolditz, O. & PROTECT Research Group (2013). Assessment of environmental impact from release of geologically stored CO<sub>2</sub>: benchmarking approach. GEOTECHNOLOGIEN-Statusseminar, GFZ, Potsdam.
- Singh, A., Watanabe, N., Sauer, U., Schütze, C., Görke, U.-J., Kolditz, O. & PROTECT Research Group (2013). Assessment of environmental impact from release of geologically stored CO<sub>2</sub>: benchmarking approach. CO<sub>2</sub>CRC Research Symposium, Hobart/Australia.
- Tanner, D.C., Krawczyk, C.M. & PROTECT Research Group (2014): PROTECT- workflow for sub-seismic deformation prediction as tool for leakage assessment. GEOTECHNOLOGIEN-Statusseminar, UFZ, Leipzig.
- Tanner, D., Ziesch, J., Beilecke, T., & Krawczyk, C.M. (2014): Kinematic analysis of normal faults from 3D seismics within the Otway Basin, Australia: evidence for oblique movement in a passive margin. AGU Fall Meeting, San Francisco/USA.
- Tanner, D., Ziesch, J., Beilecke, T., Krawczyk, C.M., & PROTECT Research Group (2013): Fault Activity of the CO<sub>2</sub>CRC Otway Project Pilot Site, Australia. CO<sub>2</sub>CRC Research Symposium, Hobart/Australia.
- Tanner, D., Ziesch, J., Beilecke, T., Krawczyk, C.M., & PROTECT Research Group (2013): Fault Activity of the CO<sub>2</sub>CRC Otway Project Pilot Site, Australia. GEOTECHNOLOGIEN-Statusseminar, GFZ, Potsdam.
- Tanner, D., Ziesch, J., Beilecke, T., Krawczyk, C.M., & PROTECT Research Group (2014): Kinematic analysis of normal faults at the CO<sub>2</sub>CRC Otway site. CO<sub>2</sub>CRC Research Symposium, Torquay/Australia.
- Tanner, D.C. & PROTECT Research Group (2012): Prediction of deformation to ensure carbon traps - PROTECT project overview. Kick-Off Seminar 'Geological Storage of CO<sub>2</sub>', Hannover.
- Weber, B., Henk, A. & PROTECT Research Group (2014): Incorporation of spatial variations in elastic rock properties in geomechanical reservoir models. GEOTECHNOLOGIEN-Statusseminar, UFZ, Leipzig.
- Weber, B., Henk, A. & PROTECT Research Group (2014): Incorporation of spatial variations in elastic rock properties in geomechanical reservoir models – workflow and application to the CO<sub>2</sub>CRC Otway project. CO<sub>2</sub>CRC Research Symposium, Torquay/Australia.
- Ziesch, J. & PROTECT Research Group (2012): Insights into the interpretation of a 3D seismic data set in the Otway Basin (South Australia) for sub-seismic deformation prediction of potential pathways. Kick-Off Seminar 'Geological Storage of CO<sub>2</sub>', Hannover.
- Ziesch, J. & PROTECT Research Group (2012): Prediction of potential leakage pathways to ensure CO<sub>2</sub> storage in the context of global climate change. 2nd PhD-Forum of the Leibniz Association and the Section E, ATB, Potsdam.
- Ziesch, J., Beilecke, T., Tanner, D.C., Krawczyk, C.M. & PROTECT Research Group (2012): Sub-seismic deformation prediction of potential pathways and seismic validation (PROTECT). GeoHannover.

- Ziesch, J., Beilecke, T., Tanner, D.C., Krawczyk, C.M. & PROTECT Research Group. (2012): Protect: sub-seismic deformation prediction of potential leakage pathways in the Otway Basin. LIAG-Austauschsitzung, Hannover.
- Ziesch, J., Tanner, D.C., Beilecke, T., Krawczyk, C.M. & PROTECT Research Group (2014): Retro-deformation analysis and strain maps of the CO2CRC Otway Project site, Australia. CO2CRC Research Symposium, Torquay/Australia.
- Ziesch, J., Tanner, D.C., Aruffo, C.M., Beilecke, T., Weber, B., Dance, T., Tenthorey, E., Henk, A., Krawczyk, C.M. & PROTECT Research Group (2013): Structural evolution of the CO2CRC Otway Project pilot site, Australia. CO2CRC Research Symposium, Hobart/Australia.
- Ziesch, J., Tanner, D.C., Aruffo, C.M., Beilecke, T., Weber, B., Dance, T., Tenthorey, E., Henk, A., Krawczyk, C.M. & PROTECT Research Group (2013): Structural analysis of the CO2CRC Otway Project pilot site, Australia. GEOTECHNOLOGIEN-Statusseminar, GFZ, Potsdam.
- Ziesch, J., Tanner, D.C., Beilecke, T. & Krawczyk, C.M. (2015): Prediction of sub-seismic faults and fractures to ensure carbon traps - joint project PROTECT. General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna/Austria.
- Ziesch, J., Tanner, D.C., Beilecke, T., Krawczyk, C.M. & PROTECT Research Group (2014): Fault kinematics and retro-deformation analysis of the CO2CRC Otway Project pilot site, Australia. GEOTECHNOLOGIEN-Statusseminar, UFZ, Leipzig.

## 6.2 Geplante Veröffentlichungen

Die hier genannten Publikationen sind sehr weit fortgeschritten und werden noch in 2015 eingereicht.

### 6.2.1 Publikationen

- Beilecke, T., Krawczyk, C.M., Ziesch, J. & Tanner, D.C., 2015a. Near-surface fault detection using high resolution shear wave reflection seismics at the CO2CRC Otway Project Site. *J. of Geophys. Research*.
- Beilecke, T. & Krawczyk, C.M., 2015b. Don't throw away your old P-wave seismic data before you've picked the shear wave. *Geophysical Research Letters*.
- Krawczyk, C.M., Henk, A., Tanner, D.C., Trappe, H., Gurevich, B. & PROTECT Research Group, 2015c. PRediction Of deformation To Ensure Carbon Traps (PROTECT) – a new seismo-mechanical workflow to predict sub-seismic deformation. *Int. J. of Greenhouse Gas Control*.
- Ziesch, J., Tanner, D.C. & Krawczyk, C.M., 2015b. 3-D structural restoration and strain analysis of a 3-D seismic cube: an example from the Otway Basin, Australia. *AAPG*.

### 6.2.2 Vorträge

- Krawczyk, C.M., Tanner, D.C., Ziesch, J., Beilecke, T., Henk, A. & PROTECT Research Group (2015): Deformation prediction in the Otway Basin – a seismo-mechanical workflow for sub-/seismic fault detection. SES conference, Celle/Germany, Oct. 2015.

### 6.3.3 Poster

- Weber, B., Henk, A. & PROTECT Research Group (2015): Incorporation of spatial variations in elastic rock properties in the geomechanical reservoir model of the CO2CRC Otway Project. EAGE Workshop on Geomechanics and Energy, Celle/Germany, Nov. 2015.
- Ziesch, J., Tanner, D.C., Beilecke, T. & Krawczyk, C.M. (2015): Fault kinematics based on quantitative 3-D seismic interpretation. Deformation, Rheology and Tectonics (DRT) Conference, Aachen/Germany, Sept. 2015.

## 7 Qualifikationsarbeiten

Im Rahmen des Verbundes oder methodisch begleitend dazu sind drei Dissertationen und drei weitere Arbeiten entstanden.

- Aruffo, C.M., 2015. Geomechanical characterization of the CO2CRC Otway Site, Australia. PhD thesis, TU Darmstadt, 150 pp.; Verteidigung am 13. Juli 2015.
- Grossmann, J., 2013: Seismic modelling of a geological cross section of the Leinetal Graben structure to optimize field measurements. MSc thesis, U Göttingen, 68 pp.
- Luebben, N., 2014. Retro-deformation of three geological cross-sections through the CO2CRC Otway Project site. BSc thesis, U Bremen, 62 pp.
- Weber, B., 2015. Incorporation of spatial variations in elastic rock properties in geomechanical reservoir models – workflow and case studies. PhD thesis, TU Darmstadt; Verteidigung in 2016.
- Weick, S., 2015. Geometrical analysis of the syn-rift faults in a reservoir formation of the Otway Basin, Australia. BSc thesis, U Göttingen, 71 pp.
- Ziesch, J., 2015. Prediction of seismic and sub-seismic deformation to ensure carbon traps in the Otway Basin - Australia. PhD thesis, TU Berlin; Abgabe im Juli 2015.

### TEIL III KURZFASSUNG DES WESENTLICHEN FACHLICHEN INHALTS

Die *Hauptzielsetzung* und Herausforderung des Verbundprojekts PROTECT war es, das spezifische Potenzial kommunizierender Systeme zwischen Reservoir und Oberfläche im Rahmen einer CO<sub>2</sub>-Injektion herauszufinden. Im Zusammenhang mit dem australischen Demonstrationsprojekt im Otway Becken war unsere Aufgabe, die Langzeitsicherheit des vorgesehenen Speichers abzusichern und angepasste Überwachungsstrategien zu ermöglichen.

Dazu war der Forschungsverbund PROTECT in vier thematische *Arbeitspakete (AP)* aufgeteilt; die institutionell angesiedelt waren:

- AP1 sub-/seismische Deformationsvorhersage potenzieller Wegsamkeiten und ihre Validierung mit hochauflösender Seismik (LIAG),
- AP2 räumliche Kartierung von Brüchen und Störungen mit Kohärenzanalyse (TEEC),
- AP3 Stress- und Deformationsvorhersage mit geomechanischer Vorwärtsmodellierung (TUDA),
- AP4 Visualisierung und Benchmarking von CO<sub>2</sub>-Speicherprozessen (UFZ).

Im Vorhaben haben alle beteiligten Partner über dreieinhalb Jahre an einer differenzierten, methodischen Erarbeitung der Abbildung und Quantifizierung von seismischen und subseismischen Wegsamkeiten im Untergrund geforscht. Die Lokation im Otway Becken diente dabei als Fallstudie, da dort Datensätze von hohem wissenschaftlichem Potenzial bereits vorlagen, die wir in Kooperation mit dem CO<sub>2</sub>CRC-Konsortium nutzen konnten. Damit wurde die Vorhersage und Evaluierung von Deformation, Störungen und Klüftigkeiten auf verschiedenen Skalen ermöglicht.

Methodisch hat sich der Verbund dabei auf verschiedene disziplinäre Arbeitsgebiete gestützt. Diese umfassten u.a. seismische Interpretation, Reflexionsseismik, Datenprozessing, Datenakquisition sowie rückwärts und vorwärts gerichtete Modellierungen und Simulationen. Die zunächst unabhängigen Forschungsansätze füllen den sub-/seismischen Raum: seismische Multiattribute stabilisieren mit der Abbildung von klein-skaligen Lineamenten die Interpretation des 3-D Strukturmodells; die Retrodeformation hat für die abdeckende Schicht eine Segementierung gezeigt und ca. 3% als höchste Deformationsmagnitude erbracht; die numerische Vorwärtsmodellierung belegt, dass der maximale horizontale Stress im Reservoir lokal durch Störungen überprägt ist und macht Angaben zur Kritikalität von Störungen und Schwellwerten für einen Reservoirbetrieb. Diese Vorhersagen haben wir außerdem mit neu gemessenen, oberflächennahen reflexionsseismischen Daten überprüft und mit neuen Visualisierungswerkzeugen bewertet.

***Der in diesem Vorhaben entwickelte, getestete und geprüfte mehr-phasige Workflow ermöglicht die Quantifizierung des Leckagepotenzials eines Reservoirs und seines Überbaus.***

Die wichtigen zu lösenden *wissenschaftlichen Fragen* des Antrags (Abbildung von Wegsamkeiten für CO<sub>2</sub> vom Reservoir durch seinen Überbau hindurch bis zur Oberfläche; strukturelle und physikalische Attribute; verlässliche Abschätzungen über die Kritikalität von Störungen und die Ausbreitung des Plumes; Aktivität/Reaktivierungspotenzial von Störungen) wurden damit beantwortet.

Es wurden ebenfalls die im Antrag definierten *technischen Ziele* (Anwendung fortschrittlicher hochauflösender Techniken für die sub-seismische Charakterisierung; Detektion und Vorhersage möglicher Wegsamkeiten; Kombination verschiedener geomechanischer Modellierungstechniken) vollständig abgedeckt. Nur eine zeitliche Komponente konnte mangels Daten nicht integriert werden.

Das Vorhaben begleitete schliesslich die Zusammenführung des Expertenwissens zur geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung im Projekt AUGER.

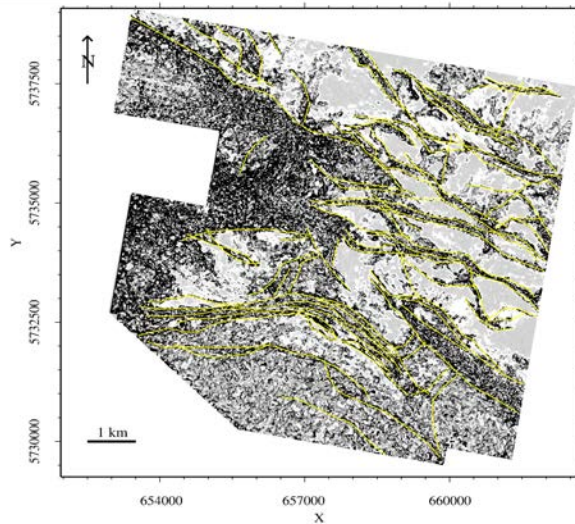




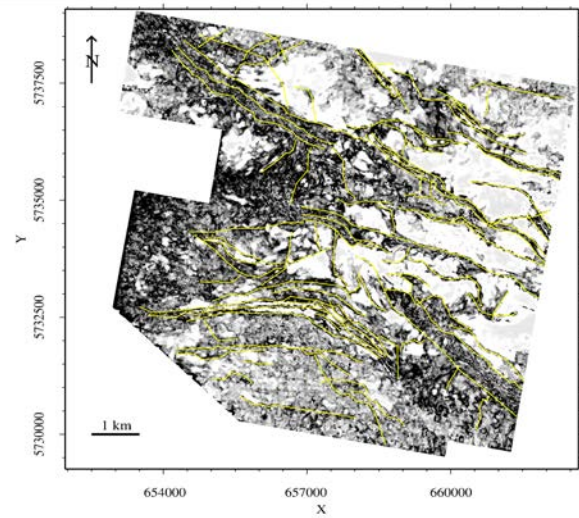
## TEIL IV ANLAGEN

<b>Abbildungen zur Multi-/attributanalyse (Arbeitspaket 2) .....</b>		<b>A1</b>
Abb. A1	Interpretation von Störungen Top Waarre Top.....	A3
Abb. A2	Interpretation von Störungen Top Eumeralla .....	A3
Abb. A3	<i>ant-tracking</i> Top Waarre .....	A3
Abb. A4	Mediane Kohärenz Top Waarre .....	A3
Abb. A5	<i>ant-tracking</i> Top Eumeralla.....	A3
Abb. A6	Mediane Kohärenz Top Eumeralla .....	A3
Abb. A7	Mediane Kohärenz (3x3x3 km) Top Waarre .....	A4
Abb. A8	Gewichtete Kohärenz (3x3x3 km ) Top Waarre.....	A4
Abb. A9	Mediane Kohärenz (5x5x5 km) Top Waarre .....	A4
Abb. A10	Gewichtete Kohärenz (5x5x5 km) Top Waarre.....	A4
Abb. A11	Mediane Kohärenz (3x3x3 km) Top Eumeralla .....	A4
Abb. A12	Gewichtete Kohärenz (3x3x3 km) Top Eumeralla.....	A4
Abb. A13	Mediane Kohärenz (5x5x5 km) Top Eumeralla .....	A5
Abb. A14	Gewichtete Kohärenz (5x5x5 km) Top Eumeralla.....	A5
Abb. A15	Mediane Kohärenz 3-D Top Waarre .....	A5
Abb. A16	Gewichtete Kohärenz 3-D Top Waarre.....	A5
Abb. A17	Mediane Kohärenz 3-D Top Eumeralla .....	A5
Abb. A18	Gewichtete Kohärenz 3-D Top Eumeralla.....	A5
Abb. A19	<i>shaded relief</i> Top Waarre .....	A6
Abb. A20	Dispersion Top Waarre .....	A6
Abb. A21	<i>shaded relief</i> Top Eumeralla .....	A6
Abb. A22	Dispersion Top Eumeralla.....	A6
Abb. A23	Minimale Krümmung Top Waarre .....	A6
Abb. A24	Negativste Krümmung Top Waarre .....	A6
Abb. A25	Maximale Krümmung Top Waarre.....	A7
Abb. A26	Positivste Krümmung Top Waarre .....	A7
Abb. A27	Minimale Krümmung Top Eumeralla .....	A7
Abb. A28	Negativste Krümmung Top Eumeralla .....	A7
Abb. A29	Maximale Krümmung Top Eumeralla.....	A7
Abb. A30	Positivste Krümmung Top Eumeralla .....	A7
Abb. A31	Positivste Krümmung 3-D Top Waarre.....	A8
Abb. A32	Positivste Krümmung 3-D Top Eumeralla.....	A8
Abb. A33	Azimut der Krümmung (3x3x3 km) Top Waarre.....	A8
Abb. A34	Neigung der Krümmung (3x3x3 km) Top Waarre .....	A8
Abb. A35	Azimut der Krümmung (3x3x3 km) Top Eumeralla .....	A8
Abb. A36	Azimut der IHS Darstellung (3x3x3 km) Top Eumeralla.....	A8
Abb. A37	Neigung der Krümmung (3x3x3 km) Top Eumeralla .....	A9
Abb. A38	IHS mit Kohärenz, Dip und Azimut Top Waarre (0° gegen N) .....	A9
Abb. A39	IHS mit Kohärenz, Dip und Azimut Top Waarre (90° gegen N) .....	A9

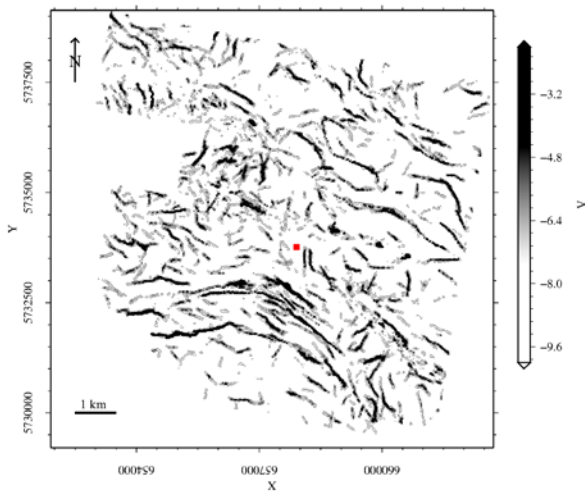
Abb. A40	IHS mit Kohärenz, Dip und Azimut Top Waarre (180° gegen N) .....	A9
Abb. A41	IHS mit Kohärenz, Dip und Azimut Top Waarre (270° gegen N) .....	A9
Abb. A42	IHS mit Krümmung, Dip und Azimut Top Waarre (0° gegen N) .....	A9
Abb. A43	IHS mit Krümmung, Dip und Azimut Top Waarre (90° gegen N) .....	A10
Abb. A44	IHS mit Krümmung, Dip und Azimut Top Waarre (180° gegen N) .....	A10
Abb. A45	IHS mit Krümmung, Dip und Azimut Top Waarre (270° gegen N) .....	A10
Abb. A46	IHS mit Kohärenz, Dip und Azimut Top Eumeralla (0° gegen N) .....	A10
Abb. A47	IHS mit Kohärenz, Dip und Azimut Top Eumeralla (90° gegen N) .....	A10
Abb. A48	IHS mit Kohärenz, Dip und Azimut Top Eumeralla (180° gegen N) .....	A10
Abb. A49	IHS mit Kohärenz, Dip und Azimut Top Eumeralla (270° gegen N) .....	A11
Abb. A50	IHS mit Krümmung, Dip und Azimut Top Eumeralla (0° gegen N) .....	A11
Abb. A51	IHS mit Krümmung, Dip und Azimut Top Eumeralla (90° gegen N) .....	A11
Abb. A52	IHS mit Krümmung, Dip & Azimut Top Eumeralla (180° gegen N) .....	A11
Abb. A53	IHS mit Krümmung, Dip & Azimut Top Eumeralla (270° gegen N) .....	A11
Abb. A54	Rosendiagramm Top Waarre .....	A11
Abb. A55	Rosendiagramm Top Eumeralla .....	A12
Abb. A56	Störungsattribut Anzahl Top Waarre .....	A12
Abb. A57	Störungsattribut Länge Top Waarre .....	A12
Abb. A58	Störungsattribut Verbundenheit Top Waarre .....	A12
Abb. A59	Maximale Störungskrümmung Top Waarre .....	A13
Abb. A60	Minimale Störungskrümmung Top Waarre .....	A13
Abb. A61	Normaler Störungswinkel Top Waarre .....	A13
Abb. A62	Störungsattribut Kombination Top Waarre .....	A13
Abb. A63	Multiattribut von Länge & Anzahl Top Waarre .....	A14
Abb. A64	Störungsattribut Anzahl Top Eumeralla .....	A14
Abb. A65	Störungsattribut Länge Top Eumeralla .....	A14
Abb. A66	Störungsattribut Verbundenheit Top Eumeralla .....	A14
Abb. A67	Maximale Störungskrümmung Top Eumeralla .....	A15
Abb. A68	Minimale Störungskrümmung Top Eumeralla .....	A15
Abb. A69	Normaler Störungswinkel Top Eumeralla .....	A15
Abb. A70	Störungsattribut Kombination Top Eumeralla .....	A15
Abb. A71	Multiattribut von Länge & Anzahl Top Eumeralla .....	A16
Abb. A72	Gruppenunterteilung zur Berechnung der Fraktalen Dimension für Top Eumeralla ....	A16
Abb. A73	Sortierung der Gruppen Top Waarre .....	A16
Abb. A74	Fraktale Dimension jeder Gruppe Top Waarre .....	A16
Abb. A75	Multiattribut von Anzahl multipliziert mit der Fraktalen Dimension Top Waarre .....	A17
Abb. A76	Multiattribut von Anzahl multipliziert mit der Fraktalen Dimension Top Eumeralla ....	A17
Abb. A77	Störungsattribut Länge der Gruppe 1 Top Waarre .....	A17
Abb. A78	Störungsattribut Anzahl der Gruppe 1 Top Waarre .....	A17
Abb. A79	Störungsattribut Kombination der Gruppe 1 Top Waarre .....	A18
Abb. A80	Neuronale Netze Analyse Top Waarre .....	A18
Abb. A81	Neuronale Netze Analyse Top Eumeralla .....	A18



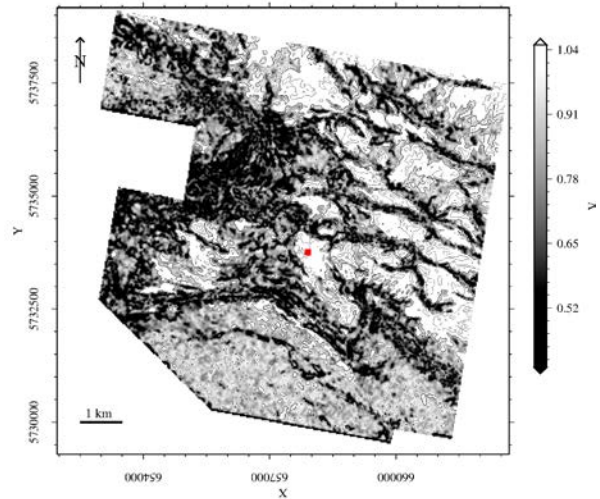
**Abbildung A1:** Interpretation von Störungen Top Waarre



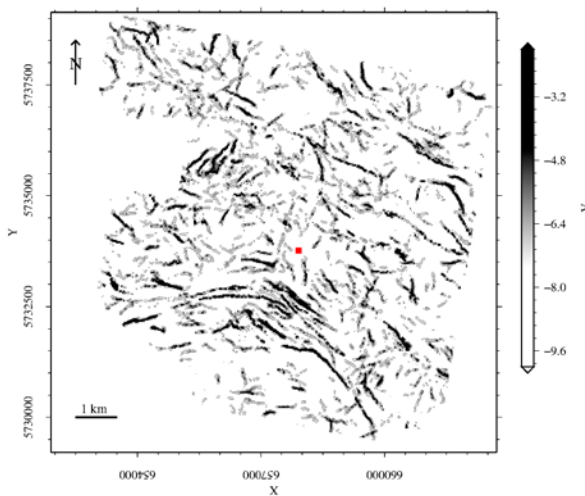
**Abbildung A2:** Interpretation von Störungen Top Eumeralla



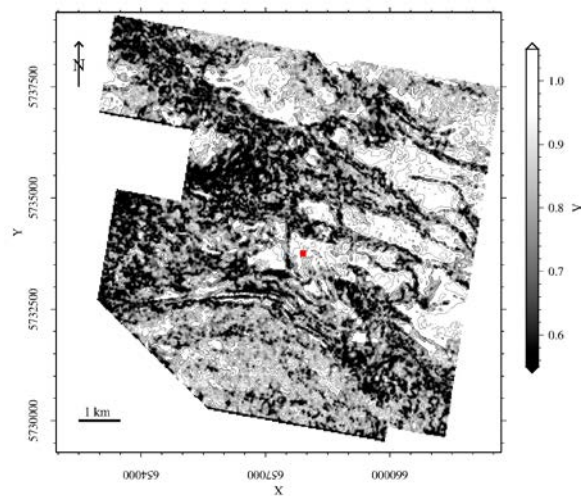
**Abbildung A3:** ant-tracking Top Waarre



**Abbildung A4:** Median-Kohärenz Top Waarre

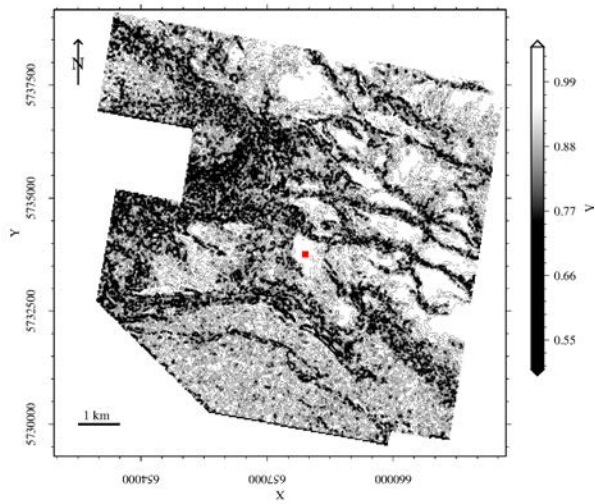


**Abbildung A5:** ant-tracking Top Eumeralla

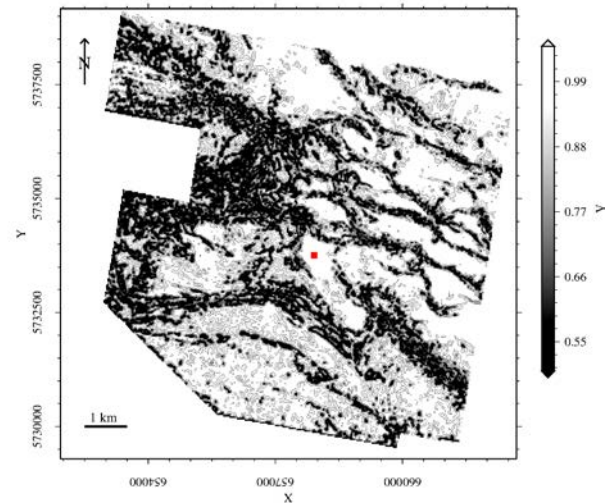


**Abbildung A6:** Mediane Kohärenz Top Eumeralla

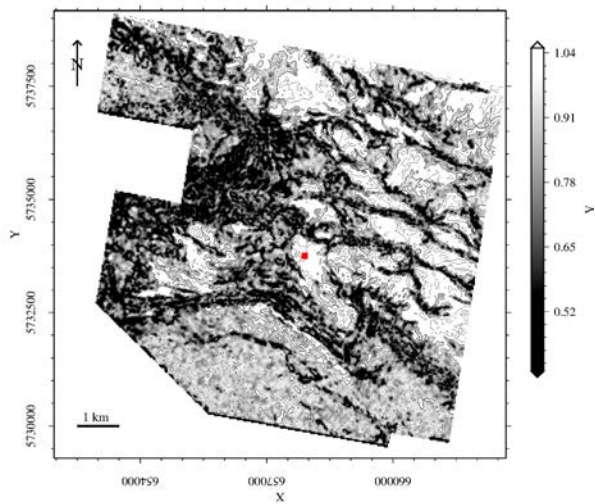




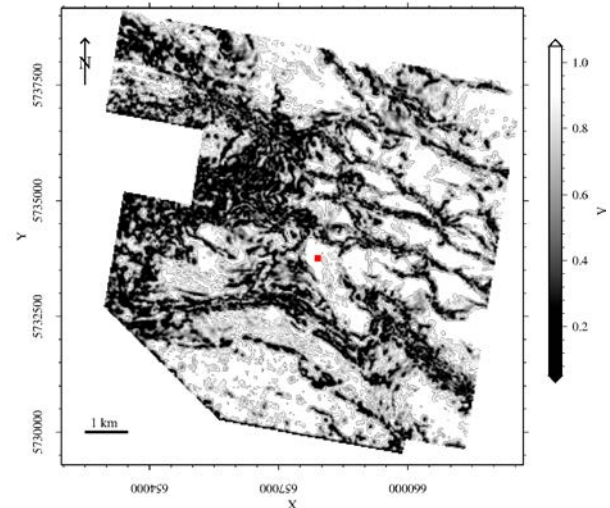
**Abbildung A7:** Mediane Kohärenz  
(3x3x3 km) Top Waarre



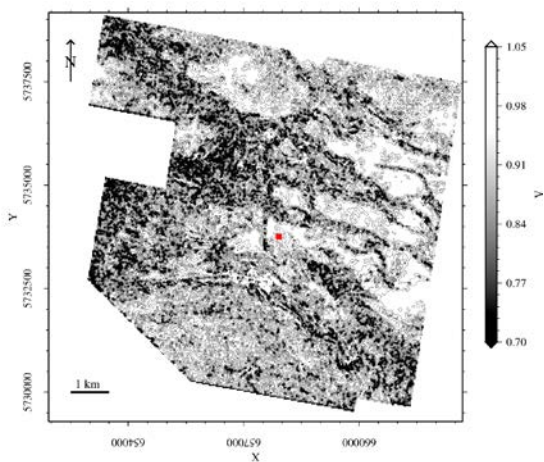
**Abbildung A8:** Gewichtete Kohärenz  
(3x3x3 km) Top Waarre



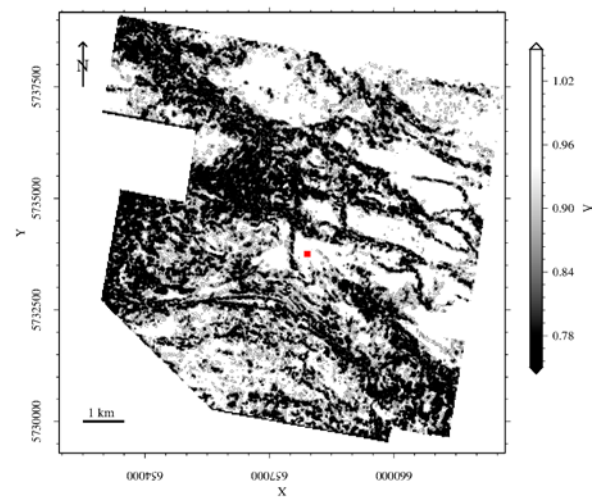
**Abbildung A9:** Mediane Kohärenz  
(5x5x5 km) Top Waarre



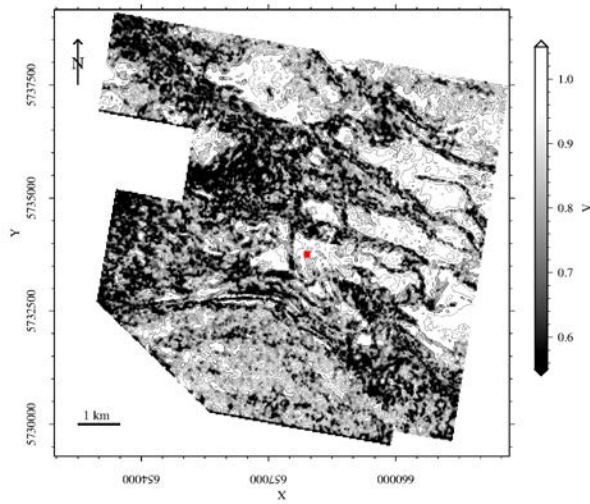
**Abbildung A10:** Gewichtete Kohärenz  
(5x5x5 km) Top Waarre



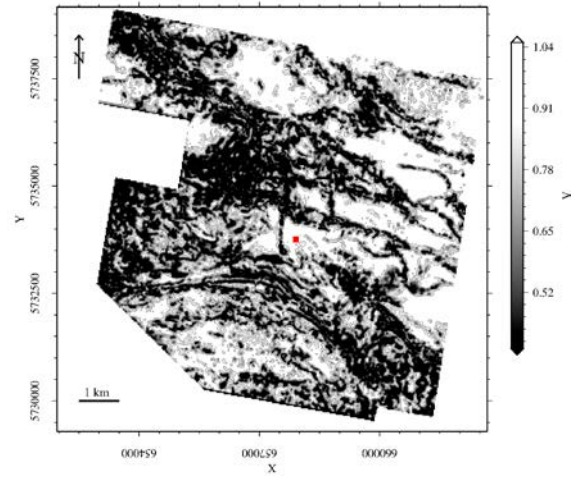
**Abbildung A11:** Mediane Kohärenz  
(3x3x3 km) Top Eumeralla



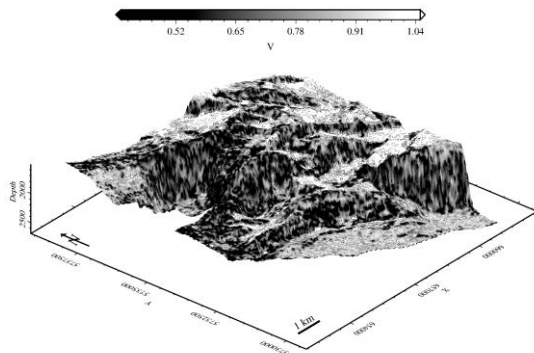
**Abbildung A12:** Gewichtete Kohärenz  
(3x3x3 km) Top Eumeralla



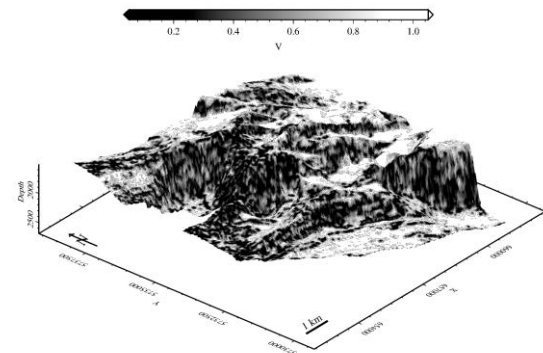
**Abbildung A13:** Mediane Kohärenz (5x5x5 km) Top Eumeralla



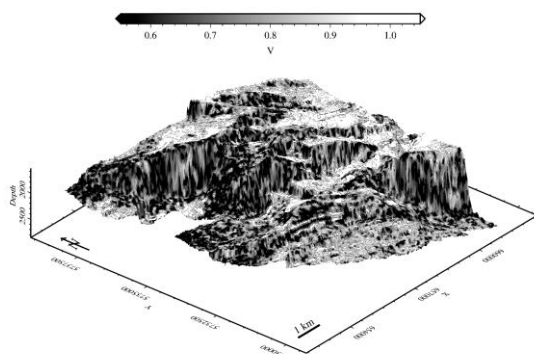
**Abbildung A14:** Gewichtete Kohärenz (5x5x5 km) Top Eumeralla



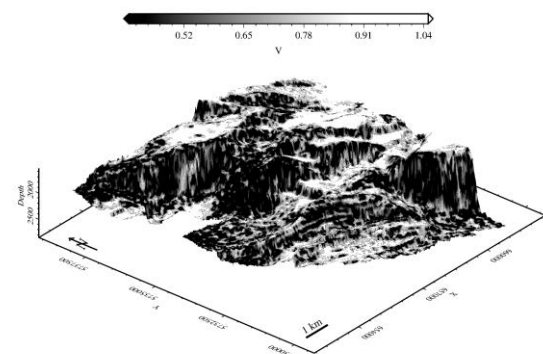
**Abbildung A15:** Mediane Kohärenz 3-D Top Waarre



**Abbildung A16:** Gewichtete Kohärenz 3-D Top Waarre



**Abbildung A17:** Mediane Kohärenz 3-D Top Eumeralla



**Abbildung A18:** Gewichtete Kohärenz 3-D Top Eumeralla



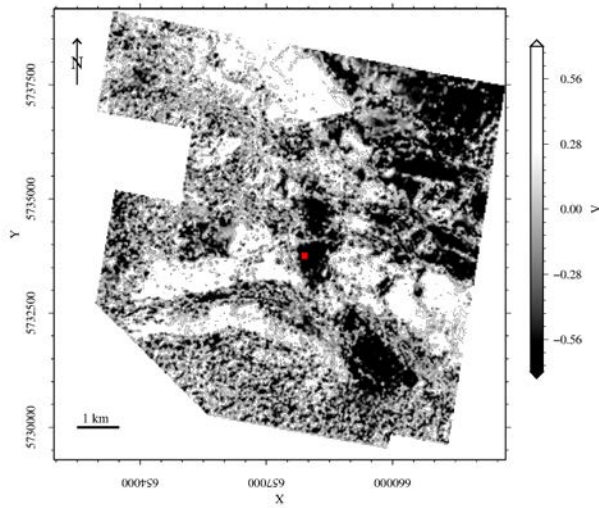


Abbildung A19: shaded relief Top Waarre

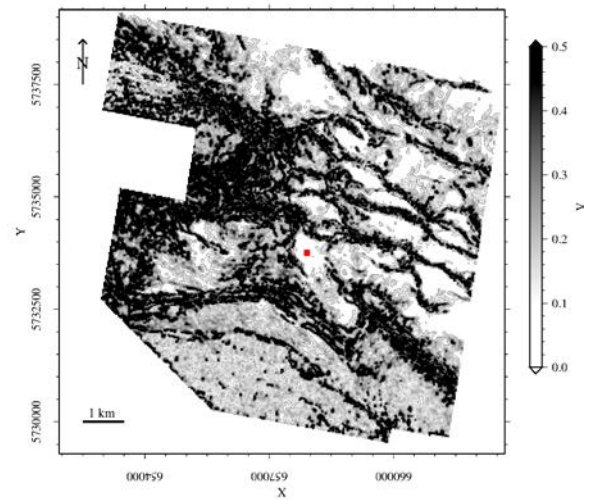


Abbildung A20: Dispersion Top Waarre

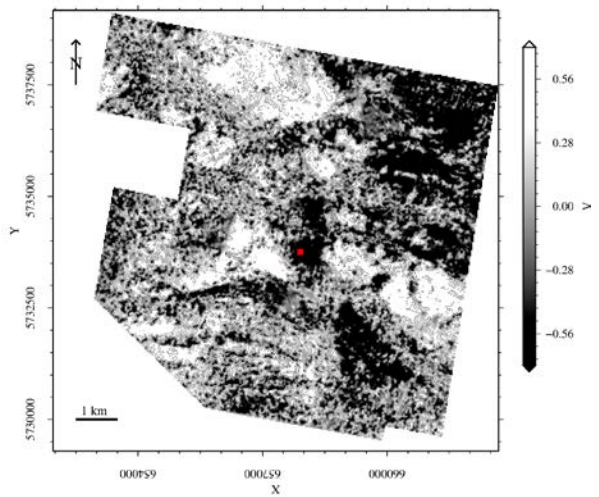


Abbildung A21: shaded relief Top Eumeralla

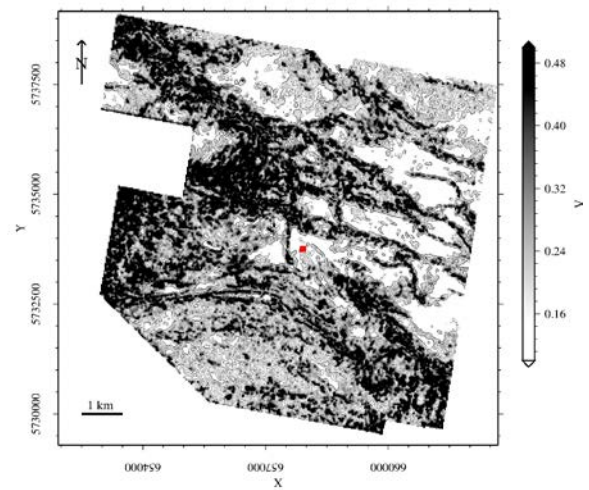


Abbildung A22: Dispersion Top Eumeralla

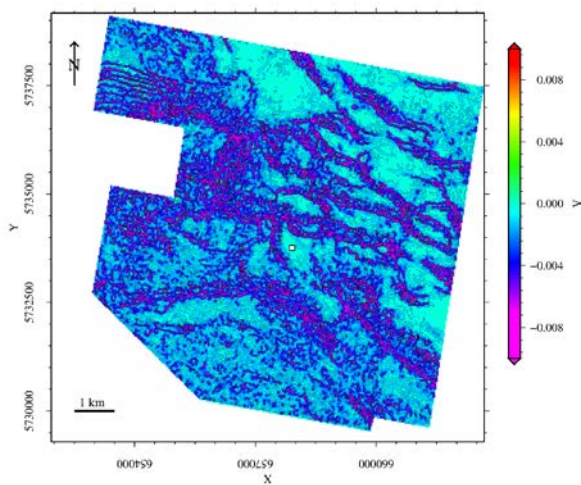


Abbildung A23: Minimale Krümmung Top Waarre

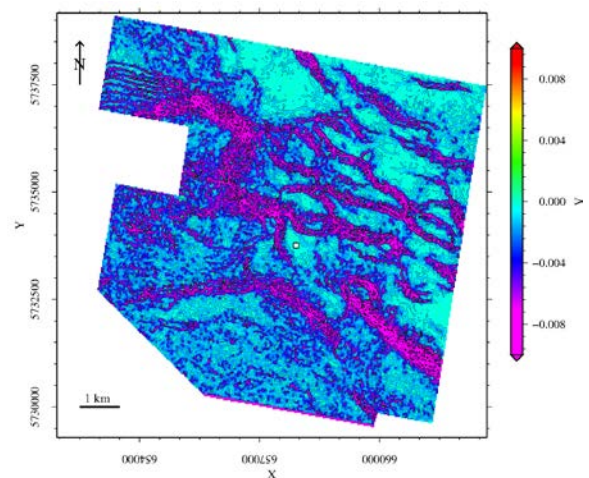


Abbildung A24: Negativste Krümmung Top Waarre



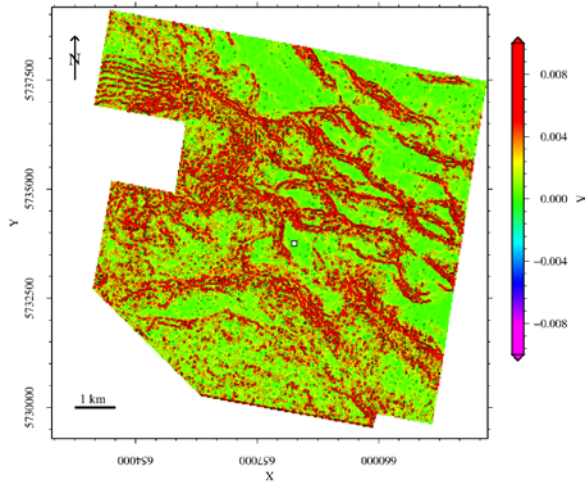


Abbildung A25: Maximale Krümmung Top Waarre

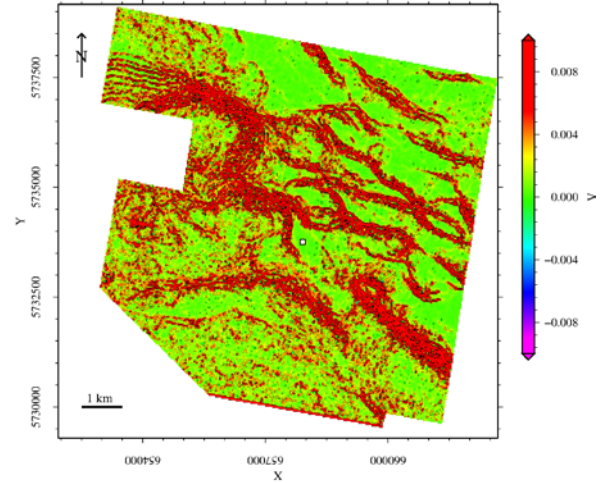


Abbildung A26: Positivste Krümmung Top Waarre

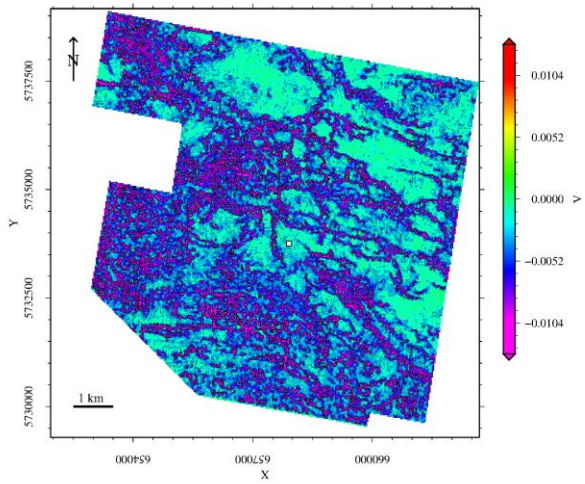


Abbildung A27: Minimale Krümmung Top Eumeralla

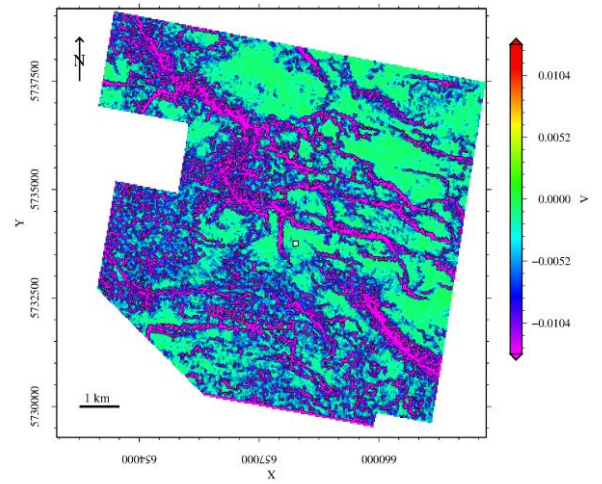


Abbildung A28: Negativste Krümmung Top Eumeralla

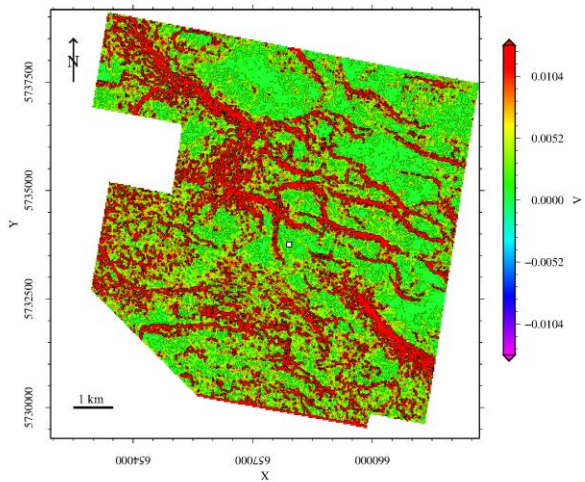


Abbildung A29: Maximale Krümmung Top Eumeralla

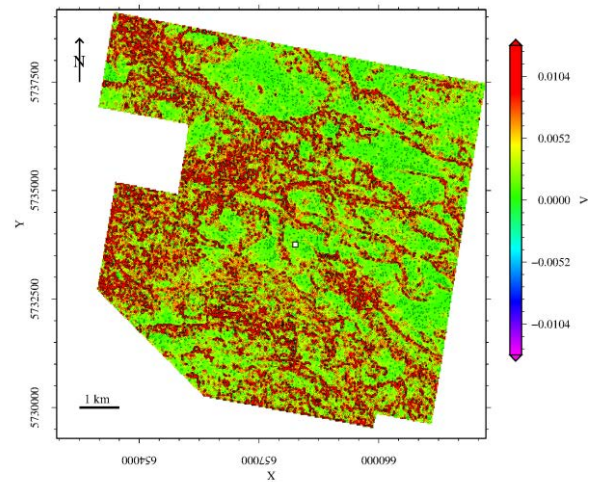


Abbildung A30: Positivste Krümmung Top Eumeralla

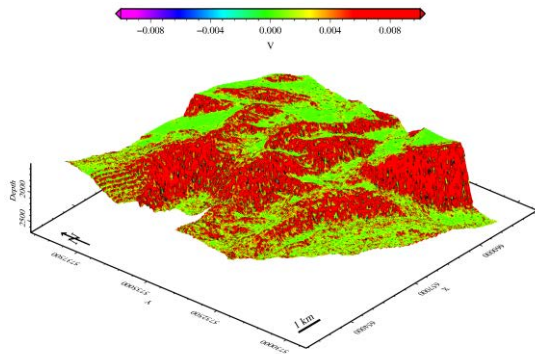


Abbildung A31: Positivste Krümmung 3-D Top Waarre

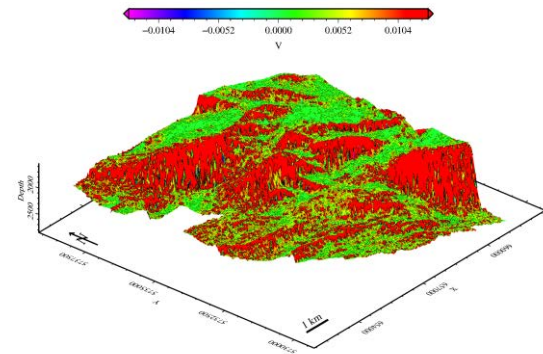


Abbildung A32: Positivste Krümmung 3-D Top Eumeralla

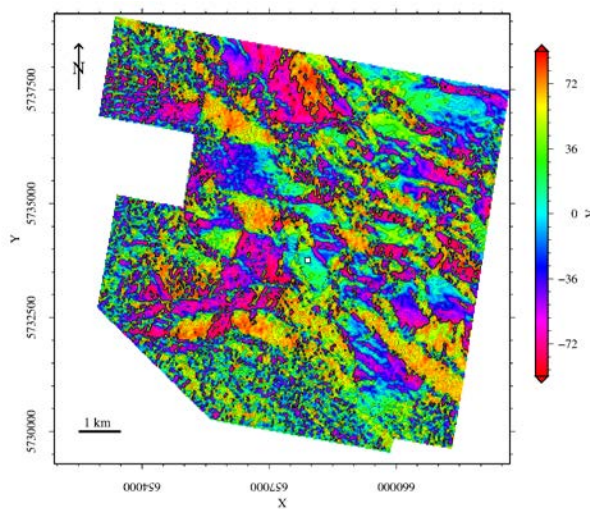


Abbildung A33: Azimut der Krümmung (3x3x3 km) Top Waarre

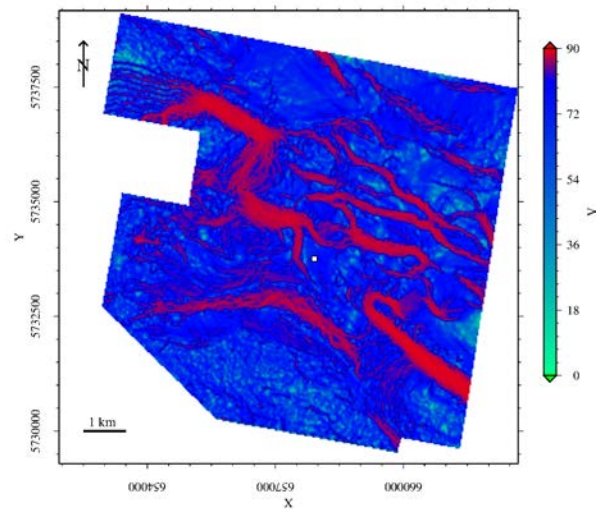


Abbildung A34: Neigung der Krümmung (3x3x3 km) Top Waarre

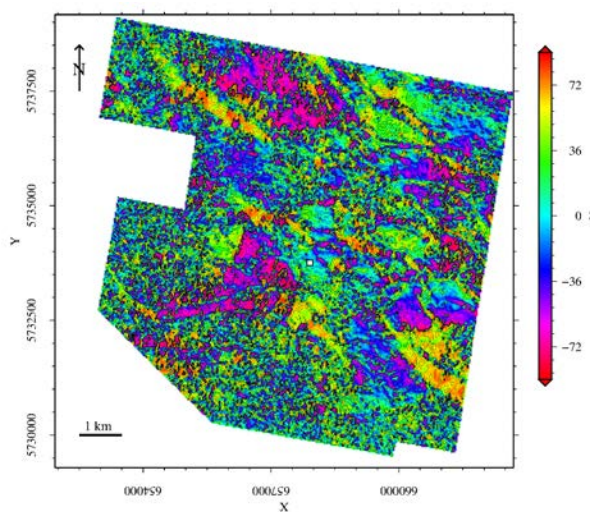


Abbildung A35: Azimut der Krümmung (3x3x3 km) Top Eumeralla

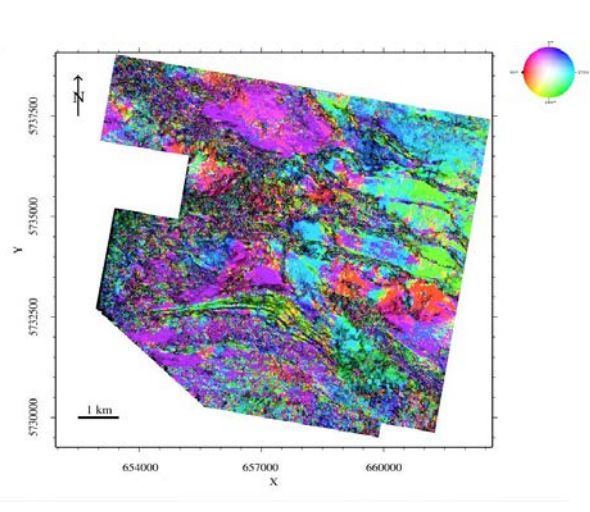
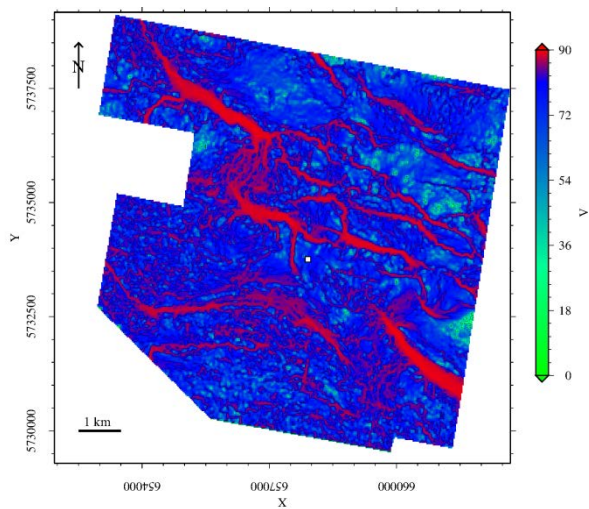
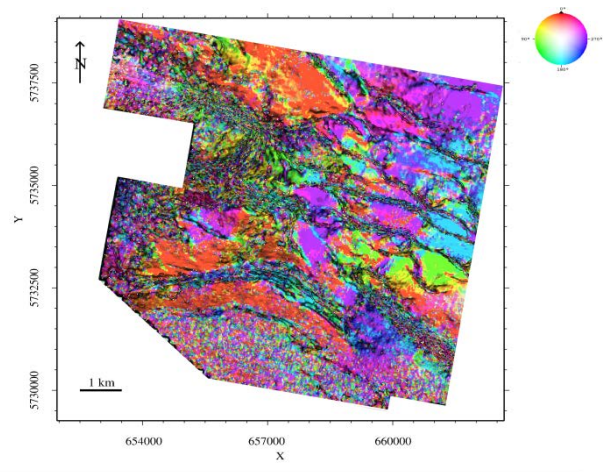


Abbildung A36: Azimut der IHS Darstellung (3x3x3 km) Top Eumeralla

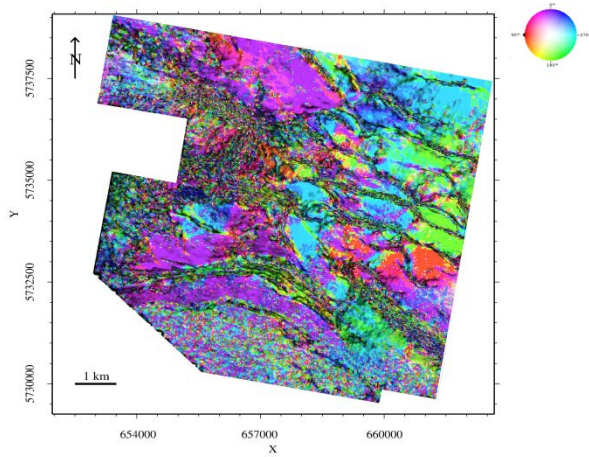




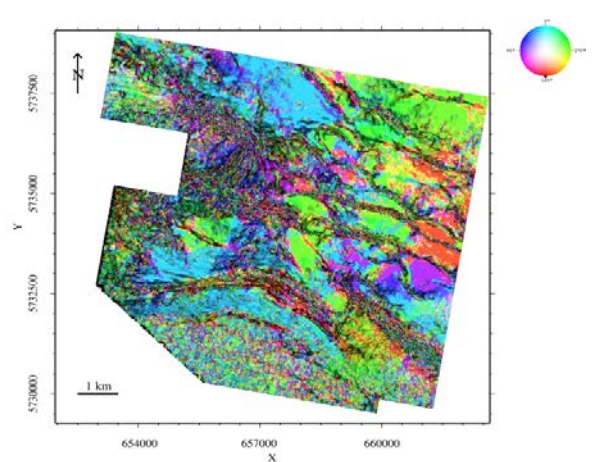
**Abbildung A37:** Neigung der Krümmung (3x3 km) Top Eumeralla



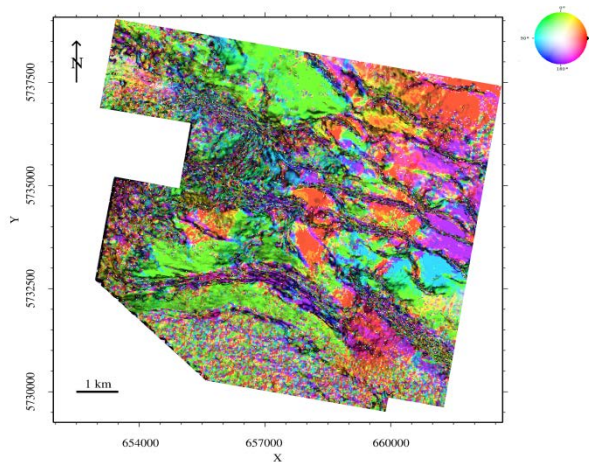
**Abbildung A38:** IHS mit Kohärenz, Dip und Azimut Top Waarre (0° gegen N)



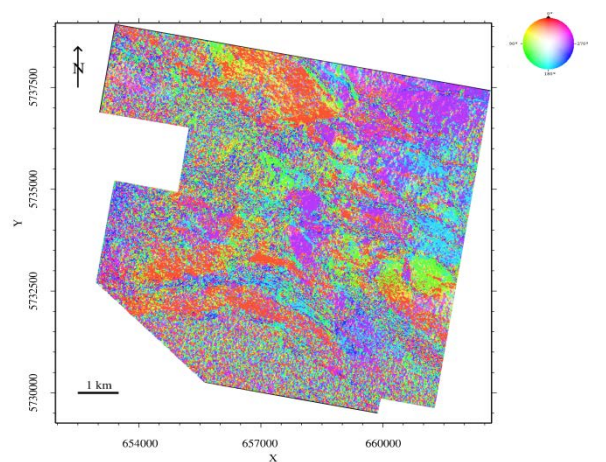
**Abbildung A39:** IHS mit Kohärenz, Dip und Azimut Top Waarre (90° gegen N)



**Abbildung A40:** IHS mit Kohärenz, Dip und Azimut Top Waarre (180° gegen N)

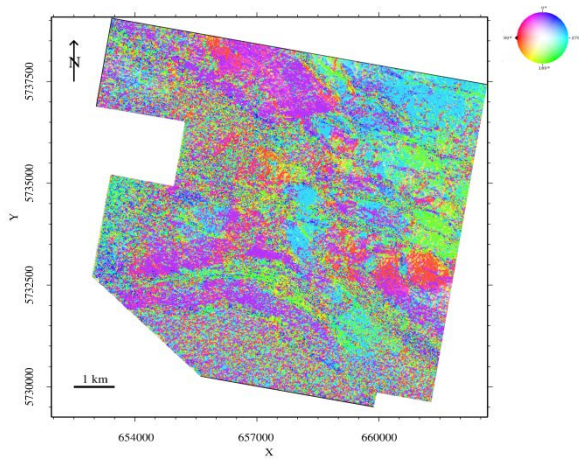


**Abbildung A41:** IHS mit Kohärenz, Dip und Azimut Top Waarre (270° gegen N)

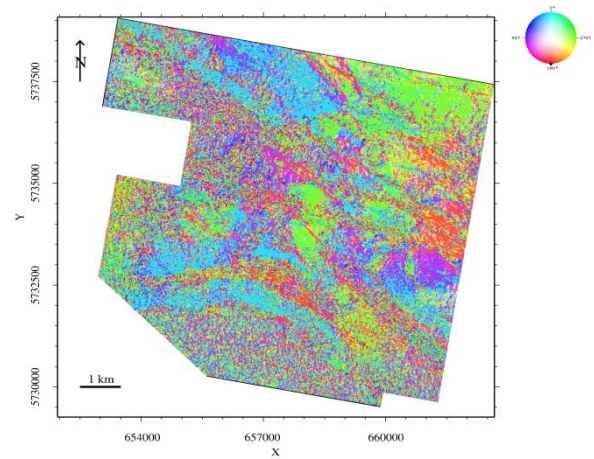


**Abbildung A42:** IHS mit Krümmung, Dip und Azimut Top Waarre (0° gegen N)

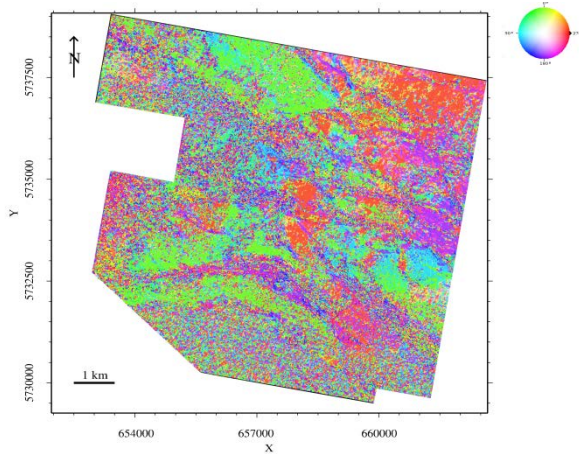




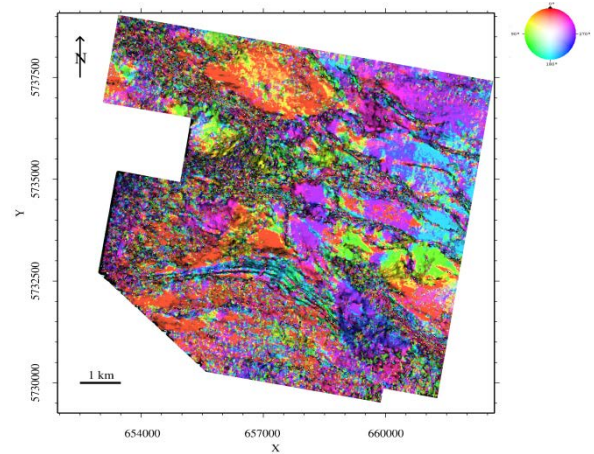
**Abbildung A43:** IHS mit Krümmung, Dip und Azimut Top Waarre (90° gegen N)



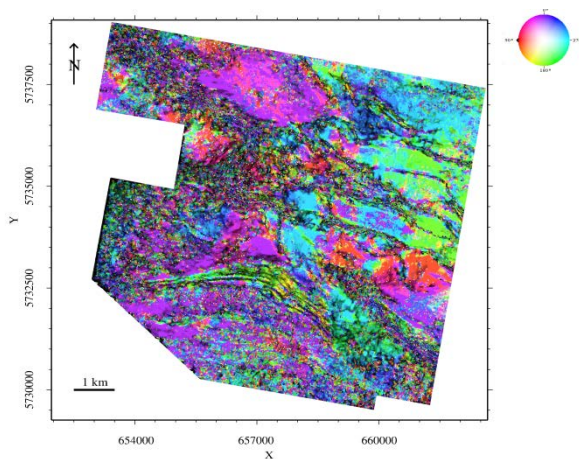
**Abbildung A44:** IHS mit Krümmung, Dip und Azimut Top Waarre (180° gegen N)



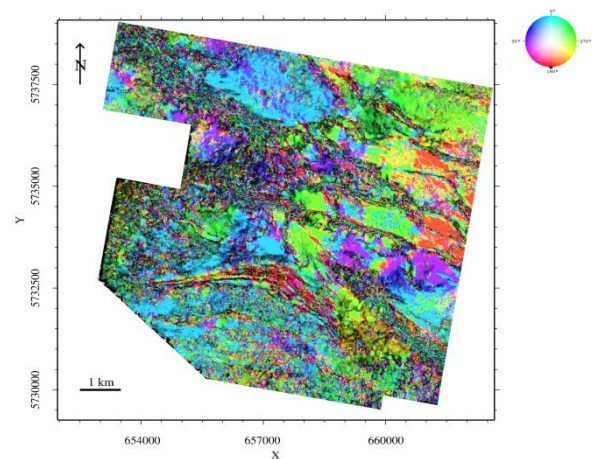
**Abbildung A45:** IHS mit Krümmung, Dip und Azimut Top Waarre (270° gegen N)



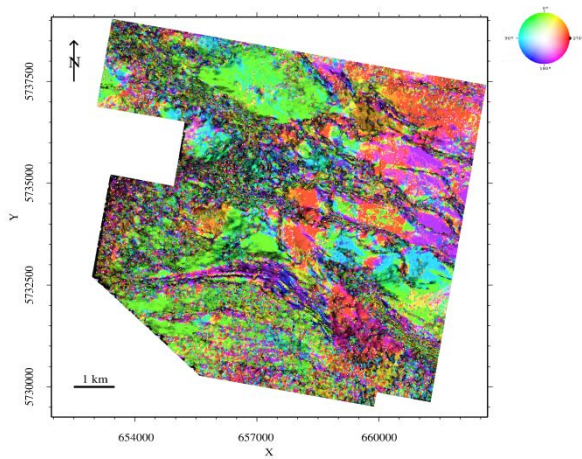
**Abbildung A46:** IHS mit Kohärenz, Dip und Azimut Top Eumeralla (0° gegen N)



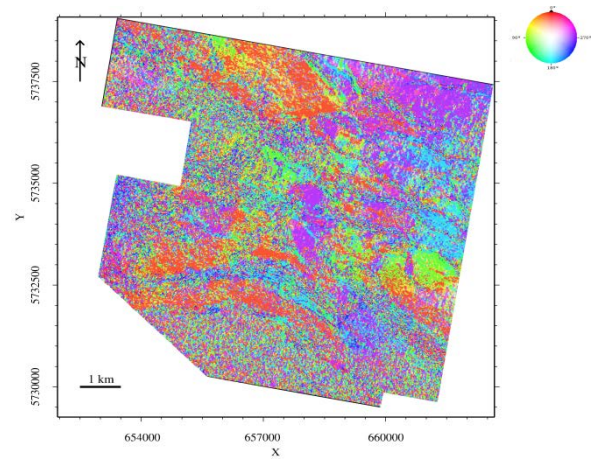
**Abbildung A47:** IHS mit Kohärenz, Dip und Azimut Top Eumeralla (90° gegen N)



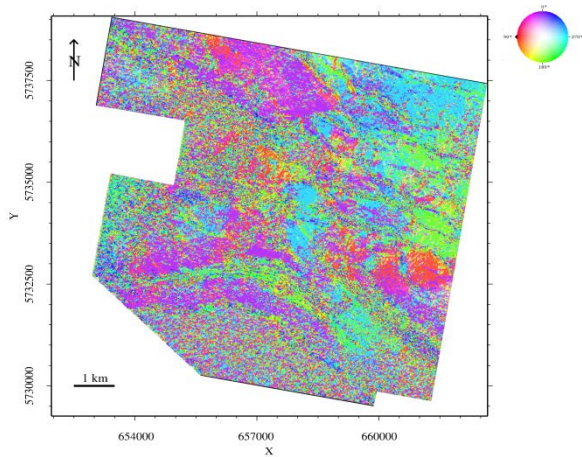
**Abbildung A48:** IHS mit Kohärenz, Dip und Azimut Top Eumeralla (180° gegen N)



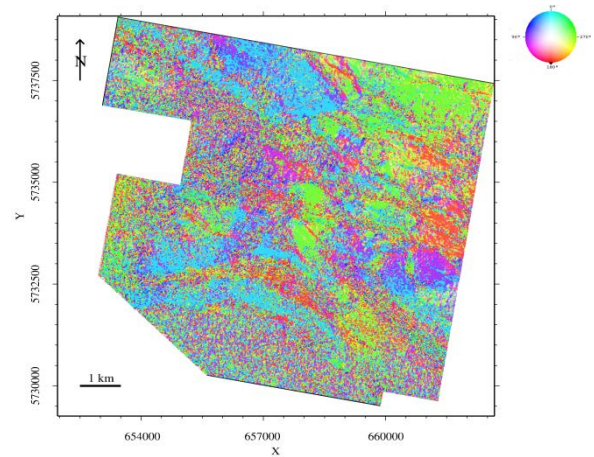
**Abbildung A49:** IHS mit Kohärenz, Dip und Azimut Top Eumeralla (270° gegen N)



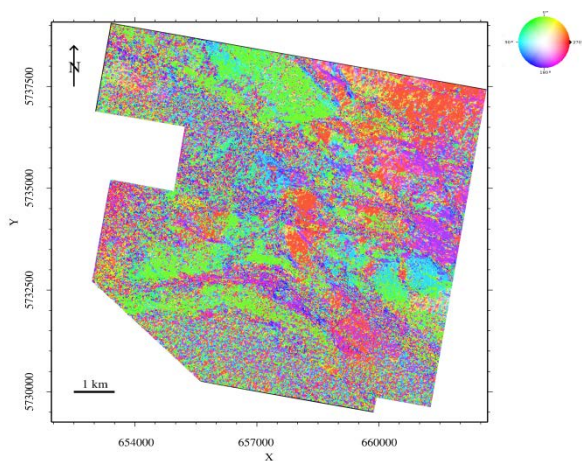
**Abbildung A50:** IHS mit Krümmung, Dip und Azimut Top Eumeralla (0° gegen N)



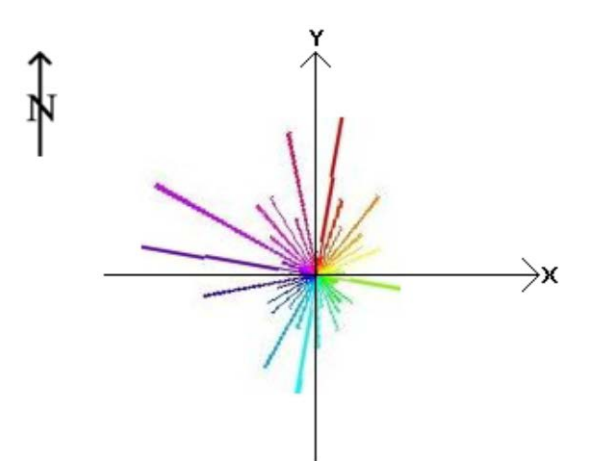
**Abbildung A51:** IHS mit Krümmung, Dip und Azimut Top Eumeralla (90° gegen N)



**Abbildung A52:** IHS mit Krümmung, Dip & Azimut Top Eumeralla (180° gegen N)



**Abbildung A53:** IHS mit Krümmung, Dip & Azimut Top Eumeralla (270° gegen N)



**Abbildung A54:** Rosendiagramm Top Waarre



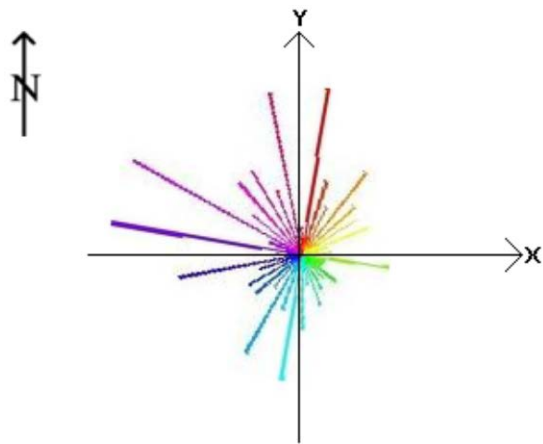


Abbildung A55: Rosendiagramm Top Eumeralla

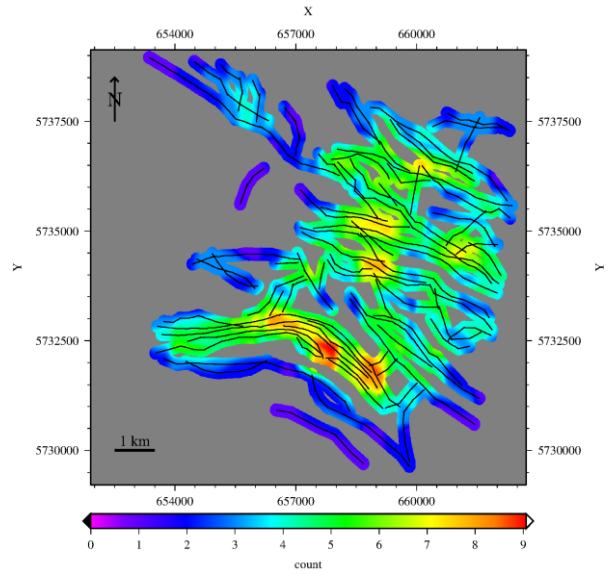


Abbildung A56: Störungsattribut Anzahl Top Waarre

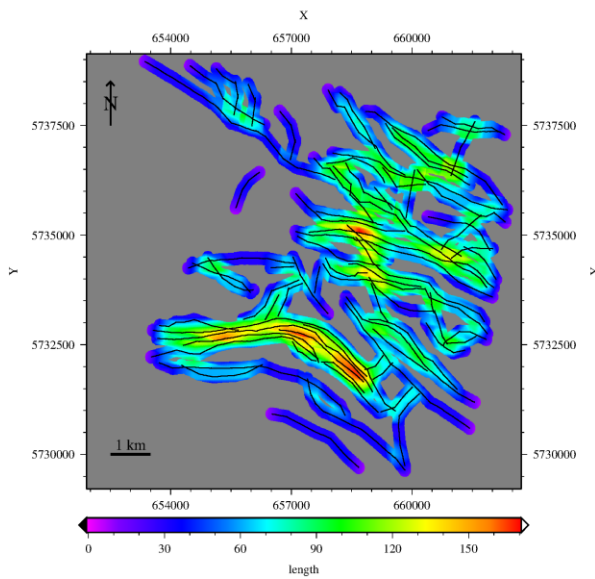


Abbildung A57: Störungsattribut Länge Top Waarre

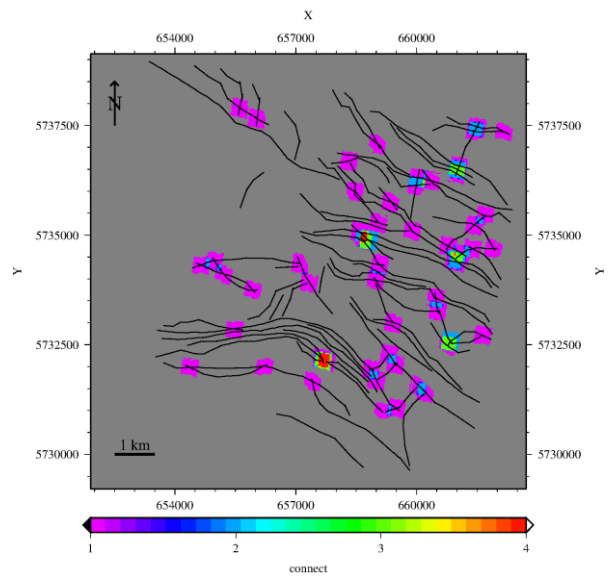
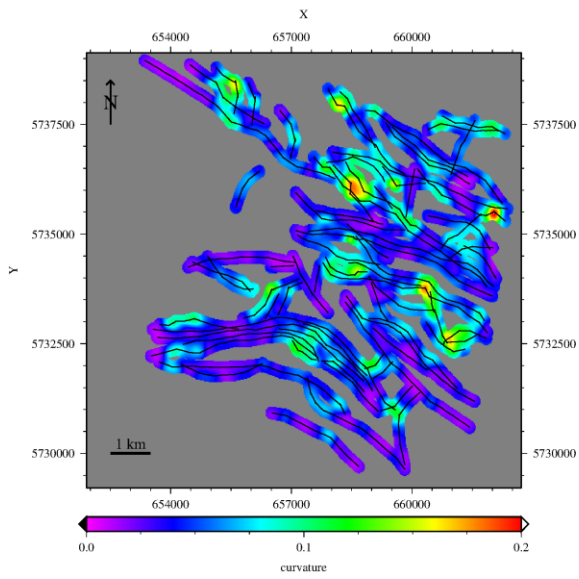
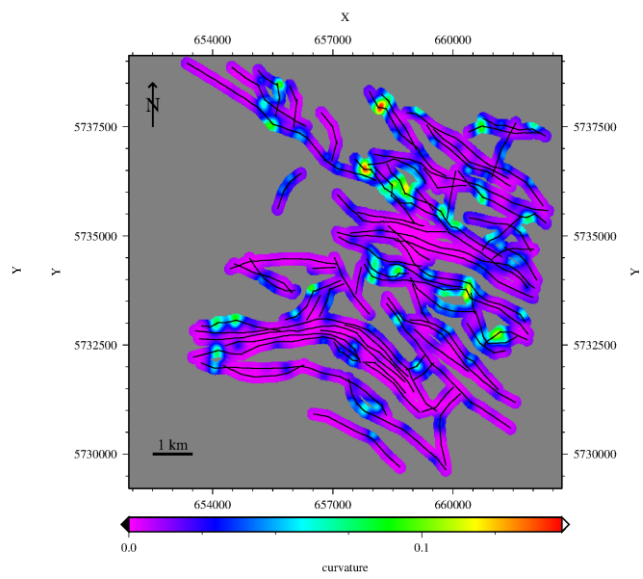


Abbildung A58: Störungsattribut Verbundenheit Top Waarre

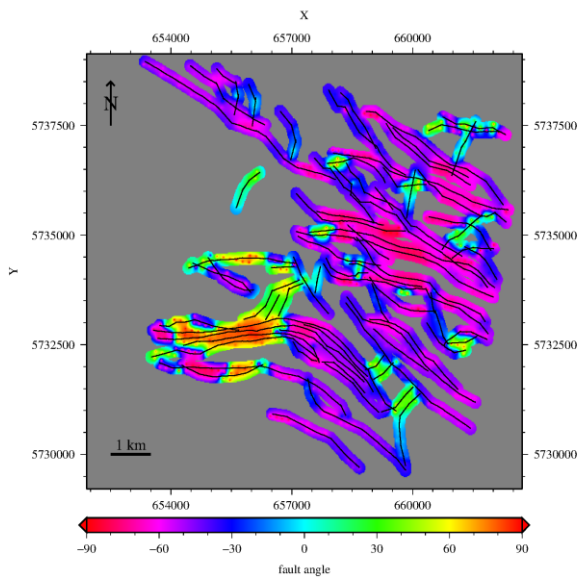




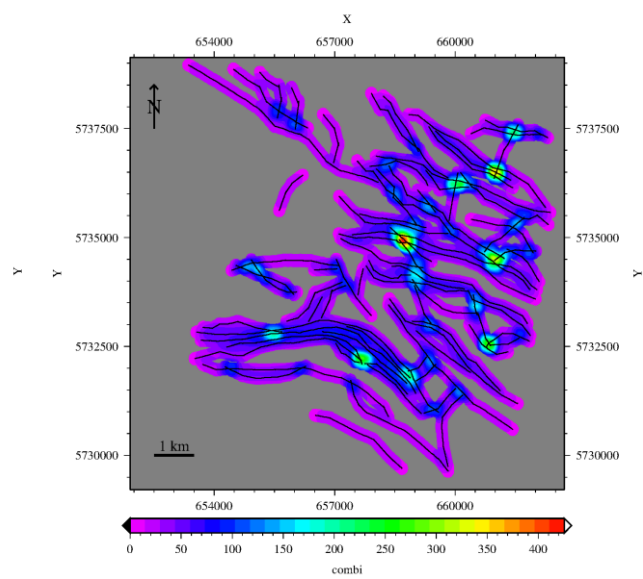
**Abbildung A59:** Maximale Störungskrümmung Top Waarre



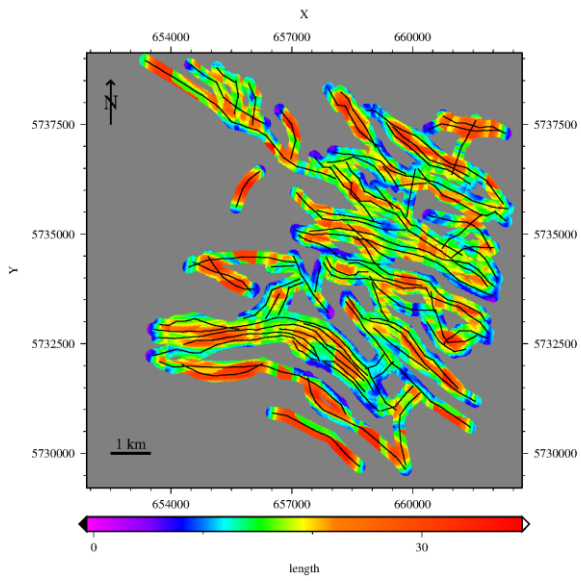
**Abbildung A60:** Minimale Störungskrümmung Top Waarre



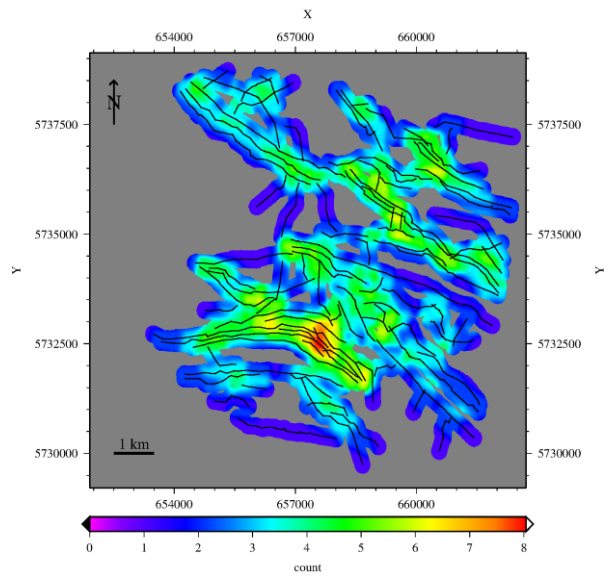
**Abbildung A61:** Normaler Störungswinkel Top Waarre



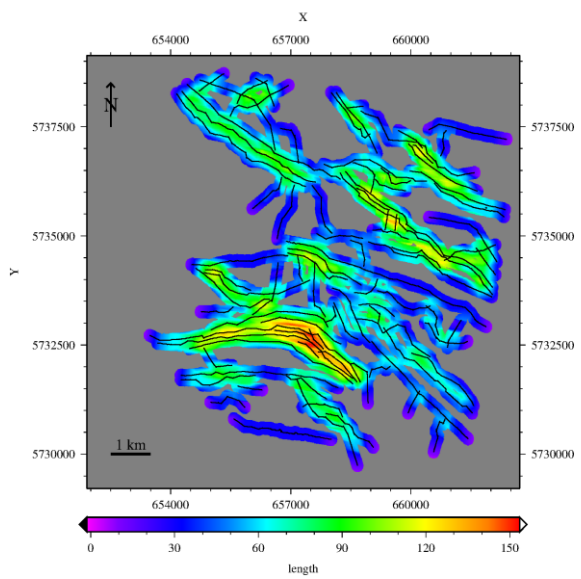
**Abbildung A62:** Störungsattribut Kombination Top Waarre



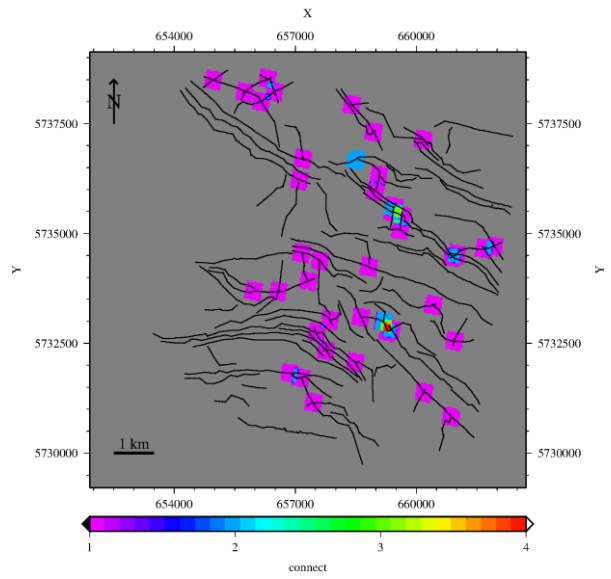
**Abbildung A63:** Multiattribut von Länge & Anzahl Top Waarre



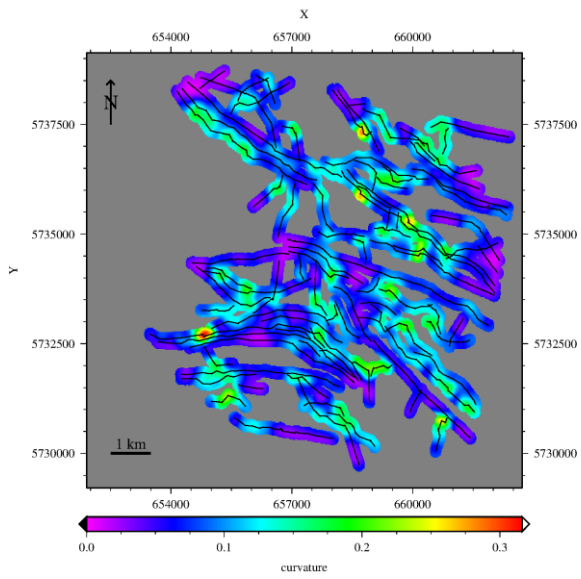
**Abbildung A64:** Störungsattribut Anzahl Top Eumeralla



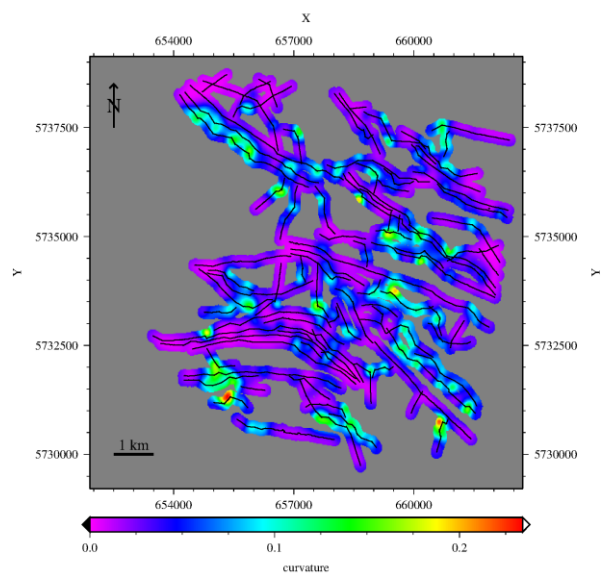
**Abbildung A65:** Störungsattribut Länge Top Eumeralla



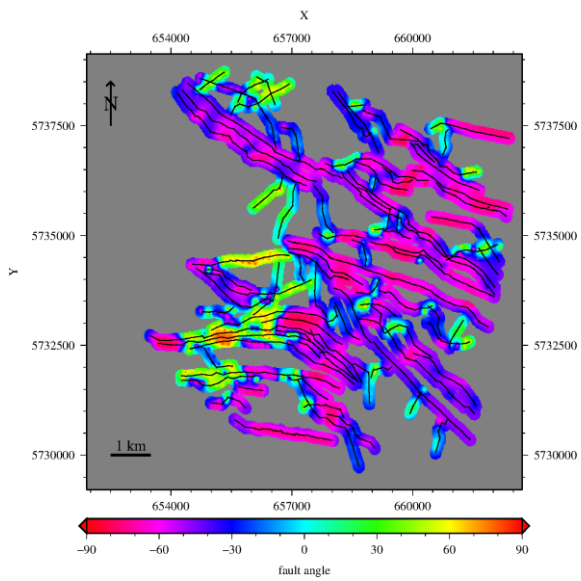
**Abbildung A66:** Störungsattribut Verbundenheit Top Eumeralla



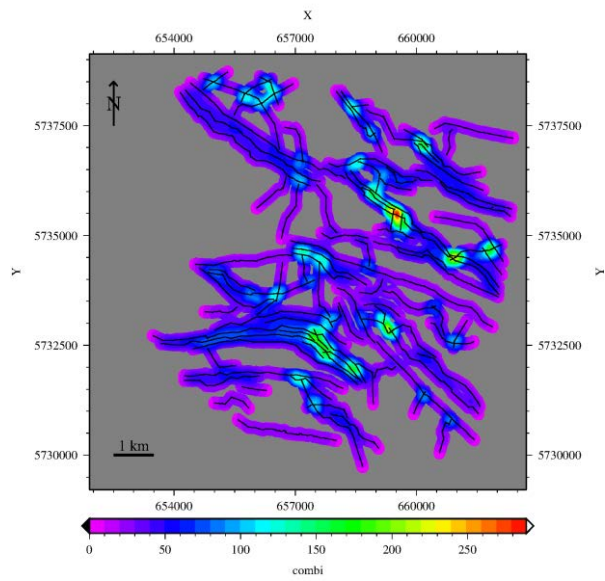
**Abbildung A67:** Maximale Störungskrümmung  
Top Eumeralla



**Abbildung A58:** Minimale Störungskrümmung  
Top Eumeralla



**Abbildung A69:** Normaler Störungswinkel  
Top Eumeralla



**Abbildung A70:** Störungsattribut Kombination  
Top Eumeralla

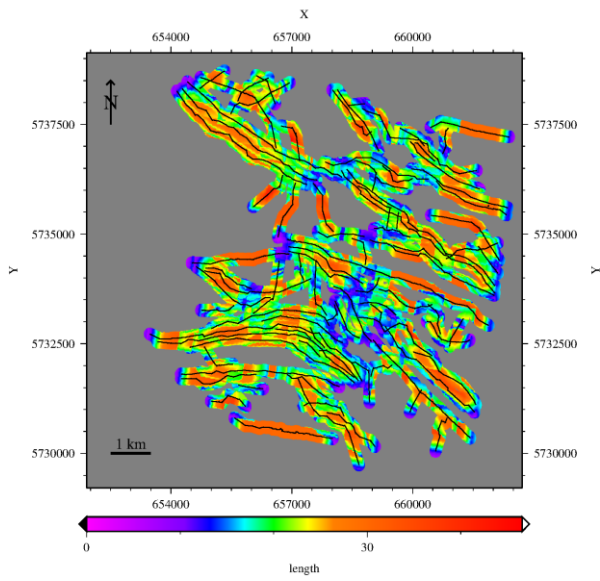


Abbildung A71: Multiattribut von Länge & Anzahl Top Eumeralla

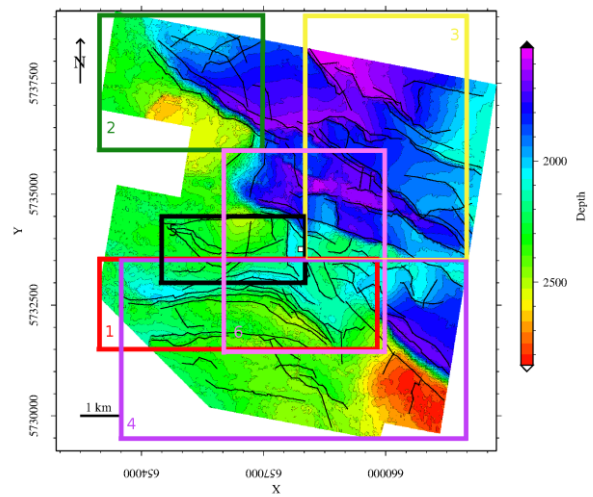


Abbildung A72: Gruppenunterteilung zur Berechnung der Fraktalen Dimension für Top Eumeralla

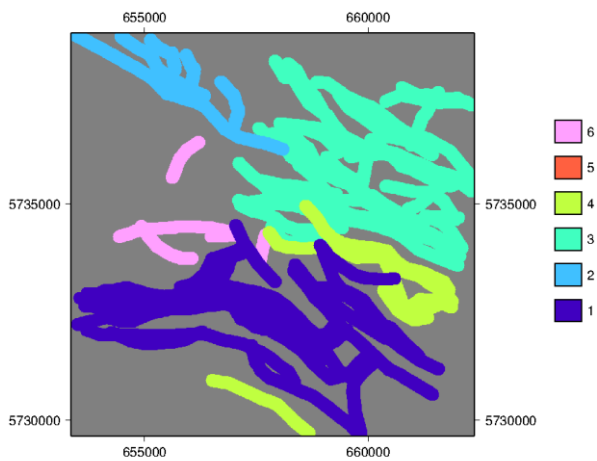


Abbildung A73: Sortierung der Gruppen Top Waarre

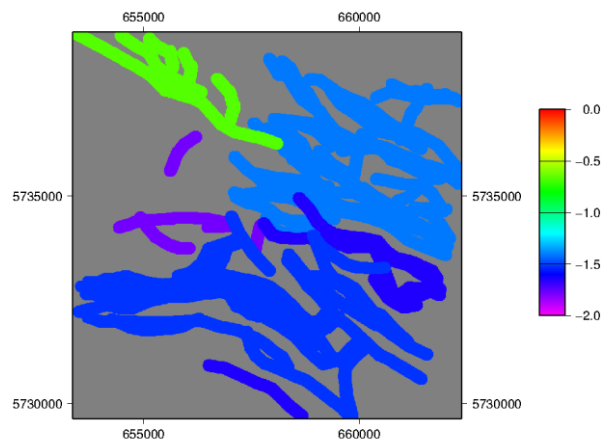
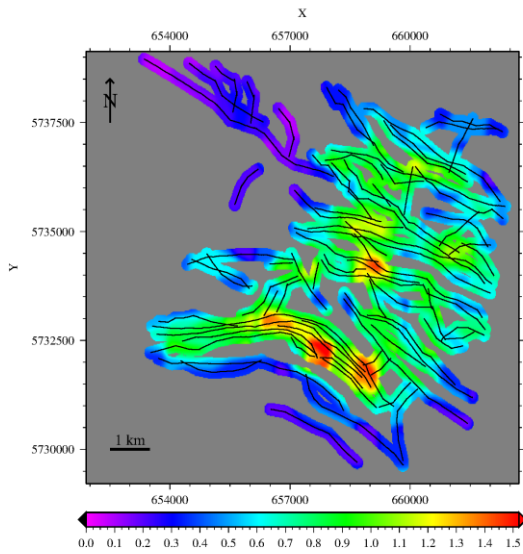
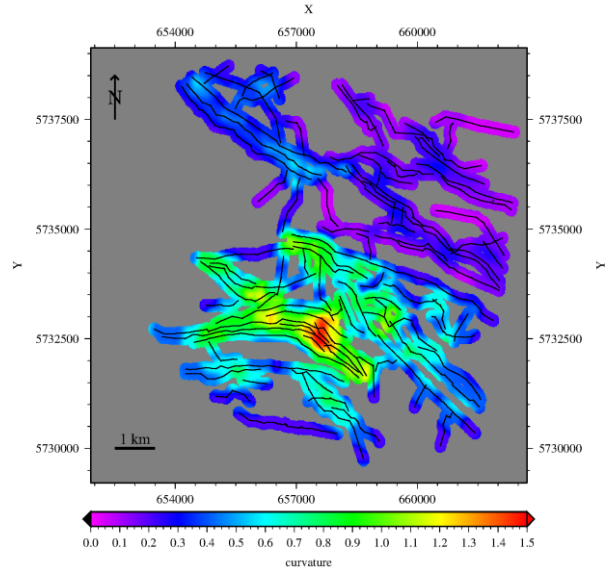


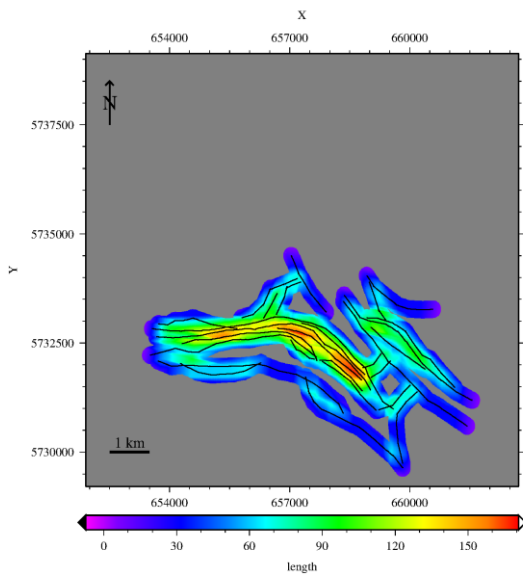
Abbildung A74: Fraktale Dimension jeder Gruppe Top Waarre



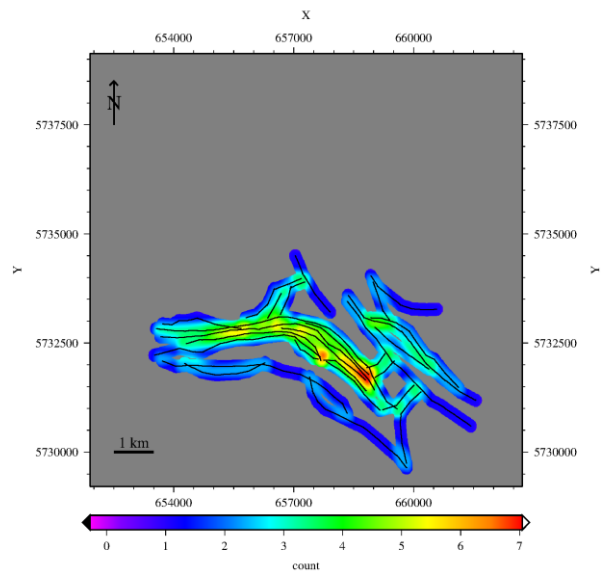
**Abbildung A75:** Multiattribut von Anzahl multipliziert mit der Fraktalen Dimension Top Waarre



**Abbildung A76:** Multiattribut von Anzahl multipliziert mit der Fraktalen Dimension Top Eumeralla

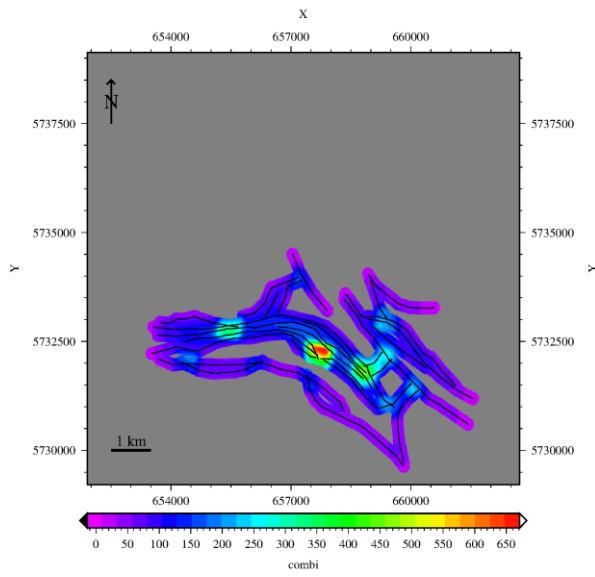


**Abbildung A77:** Störungsattribut Länge der Gruppe 1 Top Waarre

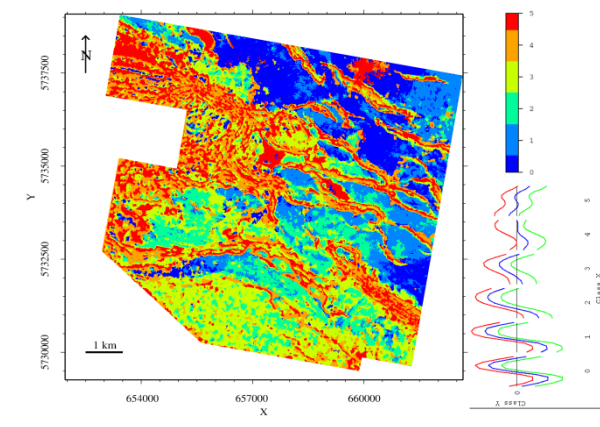


**Abbildung A78:** Störungsattribut Anzahl der Gruppe 1 Top Waarre

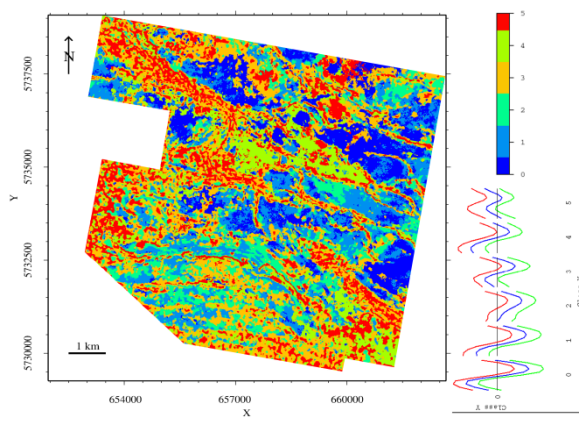




**Abbildung A79:** Störungsattribut Kombination der Gruppe 1 Top Waarre



**Abbildung A80:** Neuronale Netze Analyse Top Waarre



**Abbildung A81:** Neuronale Netze Analyse Top Eumeralla