

Deckblatt



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	Blatt: 1
9A	64213000				HF	PH	0002	00	Stand: 14.07.2025

Titel der Unterlage:

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussberichte

Ersteller/Unterschrift:

Prüfer/Unterschrift:

Stempelfeld:

UVST:	bergrechtlich verantwortliche Person: 23. Okt. 2025	atomrechtlich verantwortliche Person: 23. Okt. 2025	Bereichsleitung: 23. Okt. 2025	Freigabe zur Anwendung: 23. Okt. 2025
Datum und Unterschrift				

Diese Unterlage unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts sowie der Pflicht zur vertraulichen Behandlung auch bei Beförderung und Vernichtung und darf vom Empfänger nur auftragsbezogen genutzt, vervielfältigt und Dritten zugänglich gemacht werden. Eine andere Verwendung und Weitergabe bedarf der ausdrücklichen Zustimmung der BGE.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 2a
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	64213000				HF	PH	0002	00	Stand: 14.07.2025

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussberichte

* Kategorie R = redaktionelle Korrektur
Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung
Kategorie S = substantielle Änderung
Mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 3

Inhaltsverzeichnis

Blatt

1	Glossar & Abkürzungsverzeichnis	9
2	Einleitung	11
3	Zielstellung	12
4	Projektskizze	13
4.1	Institutionen	15
4.2	Personal	15
5	Theorie	16
5.1	Elastische Wellenfeldinversion (FWI)	16
5.1.1	Weiterentwicklung des Verfahrens	17
5.1.2	Implementierung der anisotropen Wellengleichungen in 3D	29
5.1.3	Code-Entwicklungen	29
5.2	Pre-Stack-Tiefenmigration	30
5.2.1	Synthetische Tests der Migrationssoftware	31
5.2.2	Synthetische Tests der Laufzeitberechnung	35
5.2.3	Implementierung der Dämpfung in das Migrationsintegral	39
5.2.4	Implementation und synthetische Verifizierung	42
5.2.5	Common-Offset-Gather-Migration	45
6	Geschwindigkeitsmodellierungen	47
6.1	Ersteinsatzlaufzeittomographie (FATT)	47
6.1.1	3D-Seismik	47
6.1.2	Unter-Tage-Stationen	54
6.2	Reflexionstomographie	55
6.3	Wellenfeldinversion (FWI)	68
6.3.1	Vorstudien	69
6.3.1.1	Seismische Modellierung	69
6.3.1.2	2D-akustische Wellenfeldinversion mit synthetischen Daten	71
6.3.2	Tests mit 3D-Felddaten	73
6.3.2.1	Auswahl des Untersuchungsgebiets	73
6.3.2.2	Datenvorbereitung	74
6.3.2.3	Startmodelle	75
6.3.2.4	FWI-Tests am Asse 3D-Datensatz	78
6.3.2.5	Anisotropie	84
7	Imaging	87
7.1	Geometrie und Migrationsgeschwindigkeitsmodelle	87
7.1.1	Pre-Stack-Tiefenmigration der 3D-Seismik	89
7.1.2	Unter-Tage-Stationen	107
8	Interpretation und Zusammenfassung	109
9	Konferenzbeiträge	111
10	Abschlussarbeiten & Referenzen	113
11	Literaturverzeichnis	114

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 4

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Modellparameter der verschiedenen geologischen Formationen.	22
Tabelle 2:	Modellparameter der 2D-FD-Simulation zur Validierung der Kirchhoff-Migration für das 1-Reflektor-Modell (isotroper Fall). F. = Formation.	32
Tabelle 3:	Modellparameter der 3D-FD-Simulation zur Validierung der Kirchhoff-Migration für 1-Reflektor-Modell (anisotroper Fall). F. = Formation.	33
Tabelle 4:	Parameter des homogenes konstanten isotropen Geschwindigkeitsmodell zum Test des WFC-Verfahrens.	36
Tabelle 5:	Parameter der (visko-)elastischen FD-Simulation.	43
Tabelle 6:	Parameter der Pre-Stack-Tiefenmigration in Reveal.	61
Tabelle 7:	Parameter der Reflexionstomographie in Reveal.	62
Tabelle 8:	Tabelle der Zeitfensterung und Frequenzauswahl des FWI-Tests.	80
Tabelle 9:	Verfügbare Migrationsgeschwindigkeitsmodelle.	88
Tabelle 10:	Übersicht der Migrationsergebnisse für XL 1641.	90
Tabelle 11:	Übersicht der Migrationsergebnisse für XL 1540 - 1739.	98

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zeitplan	14
Abbildung 2:	Flussdiagramm der Full-Waveform-Inversion.	16
Abbildung 3:	Akquisitionsanordnung der 3D-Seismik Asse und die ausgewählte 2D-Linie XL 1641.	21
Abbildung 4:	Korrektur der Quell- und Empfängerhöhe.	22
Abbildung 5:	Klaudersignal im vollen Frequenzbereich und nach Bandpassfilterung.	23
Abbildung 6:	2D-Modelle zur Erstellung von Referenzdaten.	23
Abbildung 7:	Verteilung der viskoelastischen anisotropen Wellenfeld- und Materialparameter einer FD-Zelle und die Beschreibung von Topografie im SSG.	24
Abbildung 8:	Q-Faktor für den gewählten Frequenzbereich für verschiedene Anzahlen von Relaxationsmechanismen.	25
Abbildung 9:	Synthetische Wellenfeldmodellierung der vertikalen Teilchengeschwindigkeit für Schusspunkt 214.	27
Abbildung 10:	Vergleich der Felddaten und der synthetischen Daten für Schusspunkt 214.	28
Abbildung 11:	Wellenausbreitung für ein homogenes elastisches Modell sowie für VTI- und TTI-Modelle.	29
Abbildung 12:	Prinzip der FVM [19].	31
Abbildung 13:	Ergebnis der Kirchhoff-Pre-Stack-Tiefenmigration für Seismogrammsektion aus 2D-FD-Simulation für isotropes 1-Reflektor-Modell. Blaue Dreiecke = Empfänger. Roter Stern = Quelle. x_c ref = kritische Entfernung, ab der refraktierte Wellen am Reflektor entstehen. x_c rcv = Entfernung, ab der refraktierte Wellen von Empfängern registriert werden.	32
Abbildung 14:	Ergebnis der Kirchhoff-Pre-Stack-Tiefenmigration für Seismogrammsektion aus 3D-FD-Simulation für anisotropes 1-Reflektor-Modell.	33
Abbildung 15:	Ergebnis der Kirchhoff-Migration für Seismogramm aus 3D-FD-Simulation für anisotropes 1-Reflektor-Modell. Verbesserung des Abbildes durch Verwendung eines konstanten Geschwindigkeitsmodells (2700 m/s).	34

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 5

Abbildung 16:	Darstellung der Fresnel-Volumina für eine isotrope bzw. anisotrope Laufzeitberechnung.	35
Abbildung 17:	Laufzeit-Isochronen berechnet mit FD-Eikonalgleichungslösung (FMM) und Wellenfrontenkonstruktionsverfahren (WFC) für ein anisotropes (VTI) Modell.	36
Abbildung 18:	Isotropes, geglättetes 2D Asse-Geschwindigkeitsmodell und Laufzeit-Isochronen berechnet mit WFC-Software.	37
Abbildung 19:	Vergleich der Laufzeit-Isochronen bei Isotropie und VTI-Anisotropie für das Asse-2D-Modell.	37
Abbildung 20:	Differenz zwischen Laufzeiten für isotropes und anisotropes (VTI) Asse-2D-Modell.	38
Abbildung 21:	Vergleich der Laufzeit-Isochronen bei VTI- und TTI-Anisotropie für das Asse-2D-Modell.	38
Abbildung 22:	Differenz zwischen Laufzeiten für VTI- und TTI-Anisotropie für das Asse-2D-Modell.	39
Abbildung 23:	Vergleich der Dispersionskurve für $f_{dom} = 50 \text{ Hz}$ und $v_{ela} = 2700 \text{ m/s}$.	43
Abbildung 24:	Vergleich der Frequenzabhängigkeit zwischen approximiertem Q und konstantem Q.	44
Abbildung 25:	Seismogramme aus FD-Simulation mit $f_{dom} = 50 \text{ Hz}$.	44
Abbildung 26:	Rekonstruktion der elastisch simulierten FD-Daten durch QPSDM der viskoelastisch simulierten FD-Daten für verschiedene dominante Frequenzen des Quellsignals.	45
Abbildung 27:	Übersicht zur Bestimmung von Ersteinsätzen (links) und Ableitung eines oberflächennahen Geschwindigkeitsmodells (rechts).	48
Abbildung 28:	Überblick zu den verwendeten Anteil an Daten ("Data in %"), Gittergröße ("Grid Size") und Qualität der Anpassung ("RMS Error") für die verschiedenen Tomographiedurchgänge.	49
Abbildung 29:	Vergleich der bestimmten Ersteinsätze von BGR (blau) und TUBAF (rot) mit den synthetisch berechneten Ersteinsätzen für das finale tomographische Modell (türkis).	50
Abbildung 30:	Horizontalschnitte durch das finale tomographische oberflächennahe Geschwindigkeitsmodell für -30 m (a), 100 m (b), 170 m (c) und 270 m (d) unter NN. Modellbereiche ohne Strahldurchgang sind ausgeblendet (grau).	51
Abbildung 31:	Vertikalschnitte durch das finale tomographische oberflächennahe Geschwindigkeitsmodell für unterschiedliche Inline- (e,f) und Crossline- (g,h) Positionen (auch Abbildung 32b). Modellbereiche ohne Strahldurchgang sind ausgeblendet (grau).	52
Abbildung 32:	Vergleich von Geschwindigkeitsprofilen aus Sonic-Log- und Checkshot-Daten sowie extrahiert aus dem tomographischen Modell entlang drei verschiedener Bohrlochpfade (a). Die Positionen der Bohrungen sind in der Karte (b) mit türkisen Punkten markiert.	53
Abbildung 33:	Darstellung von LiDAR-Daten (a) und Vergleich mit tomographischen Geschwindigkeitsmodell (b).	54
Abbildung 34:	Lage der Unter-Tage-Stationen (türkis) und Darstellung des tomographischen Geschwindigkeitsmodells.	55
Abbildung 35:	Extrahiertes 2D-Post-Stack-Tiefenmigrationsprofil (Reveal-Datensatz 5011_QC_PoSMDM_prozessiert_AGC_SL5421RP5421.seis).	56
Abbildung 36:	Reprozessierungsergebnis der 2D-Testlinie.	57

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 6

Abbildung 37:	Refraktionsstatik-Profil, d. h. das Post-Stack-Tiefenmigration-Profil der 2D-Testlinie, das mit der aktuellen Reprozessierung unter Verwendung der Standard-Refraktionsstatikkorrektur erstellt wurde.	58
Abbildung 38:	Tomo-Statik-Profil, d. h. das Post-Stack-Tiefenmigration-Profil der 2D-Testlinie, das mit der aktuellen Reprozessierung unter Verwendung von Tomo-Statik erstellt wurde.	58
Abbildung 39:	Direkter Vergleich zwischen ursprünglichem Profil (oben) und Tomo-Statik-Profil (unten). Einige wesentliche Unterschiede sind mit den gelben Pfeilen markiert hervorgehoben (Erklärungen dazu befinden sich im Text).	59
Abbildung 40:	Ablauf der Reflexionstomographie.	60
Abbildung 41:	Allgemeine Strategie der Reflexionstomographie.	61
Abbildung 42:	Ausgangspunkt der Reflexionstomographie (Version 1)	62
Abbildung 43:	Update des Geschwindigkeitsmodells (Version 1).	63
Abbildung 44:	Vergleich der Ergebnisse der Pre-Stack-Tiefenmigration basierend auf den Startmodellen von Version 1 und 2.	63
Abbildung 45:	Update des Geschwindigkeitsmodells (Version 2).	64
Abbildung 46:	Update der Pre-Stack-Tiefenmigration (Version 2).	65
Abbildung 47:	Vergleich der Pre-Stack-Tiefenmigration von Startmodell mit finalem Ergebnis (Version 2, Teil 1).	65
Abbildung 48:	Vergleich der Pre-Stack-Tiefenmigration von Startmodell mit finalem Ergebnis (Version 2, Teil 2).	66
Abbildung 49:	Vergleich der finalen Pre-Stack-Tiefenmigration aus Reflexionstomographie (Version 2) mit Ergebnis aus Post-Stack-Tiefenmigration.	67
Abbildung 50:	Erstellen des Geschwindigkeitsmodells Version 3.	68
Abbildung 51:	Erstelltes Modell für XL 1545.	70
Abbildung 52:	Wellenausbreitung zu zwei Zeitschritten für einen sogenannten explodierenden Reflektor Test für die Röt-Anhydrit-B Schicht entlang XL 1545.	70
Abbildung 53:	Wahres Modell (links oben) und Startmodell (links unten) für die synthetischen, akustischen 2D-FWI-Auflösungstests. Modellerte Daten ohne und mit Zeitfenster (rechts).	71
Abbildung 54:	Geometrie-Tests (obere Reihe 20 Schüsse, mittlere Reihe 60 Schüsse, letzte Reihe 103 Schüsse) sowie Vergleich der Inversionsergebnisse ohne und mit Zeitfenster (links bzw. rechts) mit akustischer 2D-FWI.	72
Abbildung 55:	Farbkodiert ist der Tiefschnitt bei NN des für die FWI-Tests gewählten Gebietes. Zur Referenz ist das gesamte Messgebiet schwarz umrandet dargestellt.	73
Abbildung 56:	a) Positionen aller Schüsse im Untersuchungsgebiet, b) nach Beschränkung auf ein 100 m x 100 m Grid und c) 18 gleichmäßig verteilte Schüsse.	74
Abbildung 57:	Seismogramm in Schussortierung vor (links) und nach Störsignalunterdrückung (Mitte) sowie deren Differenz (rechts).	75
Abbildung 58:	Schnitt entlang Crossline 1642 durch die zur Verfügung stehenden Startmodelle a) Migrationsmodell von Geofizyka Toruń, b) Tomographiemodell von TUBAF, c) Merge-Modell von TUBAF und d) Merge-Modell von KIT.	76
Abbildung 59:	Modellierte Daten (Wiggle-Darstellung) und Felddaten (Farbdarstellung) für die zur Verfügung stehenden Startmodelle: das Migrationsmodell von Geofizyka Toruń (a), das Tomographiemodell von TUBAF (b), das FVM-Migrationsmodell von TUBAF (c) und das von KIT erzeugte Startmodell (d).	77
Abbildung 60:	Tiefschnitte durch das a) v_P -Startmodell, b) v_P -Geschwindigkeitsmodell nach 5 Iterationen für einen Test mit 18 Schüssen und c) deren Differenz.	78

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 7
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	64213000				HF	PH	0002	00	

Abbildung 61:	Tiefenschnitte durch das a) v_P -Startmodell, b) v_P -Geschwindigkeitsmodell nach 15 Iterationen für einen Test mit zufälliger Schussauswahl und c) deren Differenz.	80
Abbildung 62:	Tiefenschnitte durch das a) v_P -Startmodell, b) v_P -Geschwindigkeitsmodell nach 17 Iterationen und c) deren Differenz.	81
Abbildung 63:	Schnitt (Crossline 1642) durch das a) v_P -Startmodell, b) v_P -Geschwindigkeitsmodell nach 17 Iterationen und c) deren Differenz.	82
Abbildung 64:	Überprüfung der Datenanpassung auf Schusseismogrammen auf dem Startmodell (a und c) und nach Iteration 17 (b und d) für einen Schuss südwestlich des Assehügels (a und b) und einen nordwestlich davon (c und d). Dargestellt sind die modellierten Daten in Wiggle-Darstellung und die Felddaten im rot-weiß-blau-Farbschema.	83
Abbildung 65:	Misfit im Frequenzbereich (rot) und im Zeitbereich (blau) des Inversionstests.	84
Abbildung 66:	Tauchwellenabdeckung der Tomographie (a) und Geschwindigkeitsprofile (b) der Vertikal- (blau) bzw Horizontalkomponente (rot) des TTI-Migrationsmodells von Geofizyka Toruń sowie des Tomographie-Modells der TUBAF (magenta) und des FWI-Modells (grün).	85
Abbildung 67:	Geschwindigkeitsmodell von Geofizyka Toruń (GT) für XL 1641.	88
Abbildung 68:	Geglättetes Geschwindigkeitsmodell kombiniert aus FATT und GT-Modell für XL 1641. Die gestrichelte Linie zeigt den Übergangsbereich zwischen den Modellen an.	88
Abbildung 69:	Ergebnis der FVM für TTI-Modell 1 (XL 1641). Die Eingangsdaten sind 2D-prozessiert.	90
Abbildung 70:	Ergebnis der FVM für TTI-Modell 1 (XL 1641). Die Eingangsdaten sind 3D-prozessiert.	91
Abbildung 71:	Vergleich des Einflusses von Hanning- und Tukey-Taper auf Realteil der Kompensationsfunktion D_a .	92
Abbildung 72:	CRG von Empfänger 8261 (XL 1641). Markiert ist hochfrequentes Rauschen mit später Ankunftszeit.	93
Abbildung 73:	Ergebnis der KPSDM für isotropes Modell 1 von CRG8261 (XL 1641). Blaues Dreieck: Empfänger, Roter Stern: Quellen.	93
Abbildung 74:	Ergebnis der QPSDM für isotropes Modell 1 von CRG8261 (XL 1641). Tukey-Kosinustaper mit $r = 0,01$ und maximaler Frequenz 120 Hz. Blaues Dreieck: Empfänger, Roter Stern: Quellen.	94
Abbildung 75:	Q-Kompensation der XL 1641.	95
Abbildung 76:	Ergebnis der FVM für isotropes Modell 1 und CIG bei $x = 1750$ m (rot gestrichelte Linie) (XL 1641). Blaues Dreieck: Empfänger, Roter Stern: Quellen.	96
Abbildung 77:	Ergebnis der FVM für isotropes Modell 2 und CIG bei $x = 1750$ m (rot gestrichelte Linie) (XL 1641). Blaues Dreieck: Empfänger, Roter Stern: Quellen.	96
Abbildung 78:	Ergebnis der FVM für VTI-Modell 1 und CIG bei $x = 1750$ m (rot gestrichelte Linie) (XL 1641). Blaues Dreieck: Empfänger, Roter Stern: Quellen.	97
Abbildung 79:	Ergebnis der FVM für TTI-Modell 1 und CIG bei $x = 1750$ m (rot gestrichelte Linie) (XL 1641). Blaues Dreieck: Empfänger, Roter Stern: Quellen.	97
Abbildung 80:	Ergebnis der KPSDM für isotropes Modell 1 (XL 1540 - 1739).	99
Abbildung 81:	Ergebnis der KPSDM für Modell 2 (XL 1540 - 1739).	99
Abbildung 82:	Ergebnis der KPSDM für Modell 2 mit CIG-Mute und Postprocessing (XL 1540 - 1739).	100
Abbildung 83:	Ergebnis der FVM für isotropes Geofizyka Toruń-Modell mit CIG-Mute und Postprocessing (XL 1540 - 1739).	100

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 8
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	64213000				HF	PH	0002	00	

Abbildung 84:	Ergebnis der FVM für anisotropes Geofizyka Toruń-Modell (VTI) mit CIG-Mute und Postprocessing (XL 1540 - 1739).	101
Abbildung 85:	Ergebnis der FVM für anisotropes Geofizyka Toruń-Modell (TTI) mit CIG-Mute und Postprocessing (XL 1540 - 1739).	101
Abbildung 86:	Ergebnis der FVM für isotropes Geofizyka Toruń-Modell + FATT mit CIG-Mute und Postprocessing (XL 1540 - 1739).	102
Abbildung 87:	Ergebnis der FVM für FWI (Version 1, Modell 3) mit CIG-Mute und Postprocessing (XL 1540 - 1739).	103
Abbildung 88:	Ergebnis der FVM für FWI (Version 1, Modell 4) mit CIG-Mute und Postprocessing (XL 1540 - 1739).	103
Abbildung 89:	Ergebnis der FVM für FWI (Version 2, Modell 5) mit CIG-Mute und Postprocessing (XL 1540 - 1739).	104
Abbildung 90:	Common Image Gather x = 1250 m	105
Abbildung 91:	Common Image Gather x = 3750 m	106
Abbildung 92:	Common Image Gather x = 6250 m	107
Abbildung 93:	Schnitt durch das 3D-FVM-Volumen (Inline)	108
Abbildung 94:	Schnitt durch das 3D-FVM-Volumen (Crossline)	108

Blattzahl dieser Unterlage: **115**

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 9

1 Glossar & Abkürzungsverzeichnis

KIT	Karlsruher Institut für Technologie
TUBAF	Technische Universität Bergakademie Freiberg
FATT	Ersteinsatzlaufzeittomographie (First-Arrival Traveltime Tomography)
FWI / FWT	Wellenfeldinversion (Full-Waveform-Inversion / Full-Waveform-Tomographie)
FD	Finite Differenzen
SSG	Standard Staggered Grid
MPI	Message Passing Interface
FVM	Fresnel-Volumen-Migration
QFVM	Q-korrigierte Fresnel-Volumen-Migration
KPSDM	Kirchhoff-Pre-Stack-Tiefenmigration (Kirchhoff-Pre-Stack Depth Migration)
QPSDM	Q-korrigierte Kirchhoff-Pre-Stack-Depth-Migration (Q-compensated KPSDM)
CM	Kohärenz-Migration (Coherency Migration)
CbFVM	Kohärenz-basierte Fresnel-Volumen-Migration (Coherency-based Fresnel Volume Migration)
PreSDM	Pre-Stack-Tiefenmigration (Pre-Stack Depth Migration)
FMM	Fast-Marching-Methode
Ray-Tracing	Strahlausbreitung seismischer Wellenpfade zur Analyse von Untergrundstrukturen
WFC	Wellenfrontenkonstruktionsverfahren (Wavefront Construction Method)
AGC	Automatische Verstärkungsregelung (Automatic Gain Control)
NMO	Normal Moveout: Zunahme der Laufzeit einer Reflexion mit dem Quell-Empfänger-Abstand
RMS	Quadratisches Mittel (Root Mean Square)
v_p	P-Wellengeschwindigkeit
v_s	S-Wellengeschwindigkeit
Q_p	Dämpfung (Qualitätsfaktor) der P-Wellen
Q_s	Dämpfung (Qualitätsfaktor) der S-Wellen
ϵ	Thomsen-Parameter zur Beschreibung der Anisotropie
δ	Thomsen-Parameter zur Beschreibung der Anisotropie
θ, θ_T	Winkel zur Beschreibung des Dips (Richtung der Anisotropie; in Profilrichtung)
VTI	Vertikale transversale Isotropie (Vertically Transverse Anisotropy)
TTI	Geneigte transversale Isotropie (Tilted Transverse Anisotropy)
STFI	Quellsignalinversion (Source Time Function Inversion)
CSG	Ensemble von Spuren mit gleicher Quelllokation (Common Source Gather)
CRG	Ensemble von Spuren mit gleicher Empfängerlokation (Common Receiver Gather)
COG	Ensemble von Spuren mit gleichem Quell-Empfänger-Abstand (Common Offset Gather)
CIG	Ensemble von Spuren mit gleichem Abbildungspunkt (Common Image Gather)

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 10

GSLs Modell zur Beschreibung des viskoelastischen Verhaltens
(Generalized Standard Linear Solid)

XL, IL Crossline, Inline
zueinander orthogonale Richtungen des Untergrundgitters seismischer Daten

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 11

2 Einleitung

Mit dem Standortauswahlgesetz von 2017 hat die deutsche Bundesregierung den legalen Rahmen für die Endlagersuche für nuklearen Abfall geschaffen, womit der Problematik der Endlagersuche eine hohe Priorität und große öffentliche Aufmerksamkeit zufallen.

Die Aufgabe, Sicherheit und Isolation des nuklearen Abfalls über die relevanten Zeiträume von hunderten oder gar tausenden von Jahren zu garantieren, ist eine große Herausforderung. Dies zeigt sich an dem zur Einlagerung nuklearen Abfalls genutzten ehemaligen Kali-Bergwerks Asse II, das mit der Eindämmung von Wassereinfluss und drohender Instabilität aktuell großen Herausforderungen gegenübersteht. Eine sichere Verwahrung über die benötigten Zeiträume kann nur gewährleistet werden, wenn die jeweiligen spezifischen Standorteigenschaften wie z. B. Grundwasserströmung, Wasserchemie, geologische Struktur sowie thermische und strukturelle Stabilität bekannt sind, die im Allgemeinen sehr heterogen sind. Für eine derartige Charakterisierung eignen sich besonders nicht-invasive geophysikalische Methoden, von denen die reflexionsseismische Methode in der Regel die höchste Auflösung und die geringsten Mehrdeutigkeiten bei der Abbildung geologischer Strukturen bietet. In der Reflexionsseismik werden Echos von geologischen Diskontinuitäten ("Reflektoren"), die durch Impedanzkontraste an Schichtgrenzen oder Störungszonen im Untergrund entstehen, gesammelt und in detaillierte Bilder der seismischen Reflektivität umgewandelt, die die Lage dieser Grenzflächen anzeigen. Weiterhin können Signalamplituden ausgewertet werden, um weitere Informationen über die physikalischen Gesteinseigenschaften zu erhalten.

Diese Methode, die eine hervorragende Möglichkeit zur Erkundung neuer Endlagerstätten bietet, eignet sich auch gut zur genaueren Bestimmung der Gefahrenlage am Endlager Asse II. Hierfür wurde im Jahr 2020 eine seismische Datenakquisitionskampagne durchgeführt [1] und die Daten bearbeitet und ausgewertet. Neben der konventionellen Bearbeitung, Auswertung und Interpretation der Daten wurde beschlossen, diese auch zur Weiterentwicklung moderner Verfahren der seismischen Datenbearbeitung zu nutzen, die in Zukunft für die Beantwortung diverser geowissenschaftlicher Fragestellungen (z. B. die Bewertung und Analyse des Spannungszustandes und der beobachteten Deformationen, das Auftreten von Seismizität, die Mobilität und den Zutritt von Fluiden, etc.) eine sehr wichtige Rolle spielen.

Hierfür wurde im Jahr 2021 das auf 3 Jahre angelegte Projekt DOSIS (**D**evelopment of an **o**ptimised combined high-resolution **s**eismic **i**maging **s**ystem for the investigation of nuclear waste disposal sites) ins Leben gerufen, das am 1. Dezember 2021 offiziell startete. An dem Projekt sind neben der BGE das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und die Technische Universität Bergakademie Freiberg (TUBAF) als wissenschaftliche Partner beteiligt. Als Auftraggeberin stellt die BGE die Finanzierung des Projekts, die im Wesentlichen Personalkosten von wissenschaftlichen Mitarbeitern sowie Sachmittel zur Erweiterung und Betrieb von Rechenkapazitäten beinhaltet. Das KIT übernimmt als Hauptauftragnehmer die Verantwortung, dass ein konkretes Forschungs- und Entwicklungsergebnis erreicht wird und die Ergebnisse wirtschaftlich oder technisch verwertbar oder frei von Rechten Dritter sind. Die TUBAF übernimmt Teilaufgaben entsprechend der Beschreibung in der Projektskizze. Dieser Einzelvertrag wurde auf Basis *Besondere Nebenbestimmungen für Einzelaufträge* und den *Allgemeinen Bedingungen für Forschungs- und Entwicklungsverträge des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (ABFE-BMU)* geschlossen.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 12

3 Zielstellung

Ziel des vorliegenden Projektes ist die hochauflösende Untergrundabbildung im Bereich des Salzstocks Asse. Es sollen durch moderne und fortschrittliche Verfahren der seismischen Datenbearbeitung (Wellenfeldinversion und fokussierende Pre-Stack-Tiefenmigration) zum einen die Untergrundstrukturen hochauflösend und lagegetreu in Form und Tiefe abgebildet werden, zum anderen sollen durch die Kombination beider Verfahren auch mehrere Parameter des Untergrundes (Wellengeschwindigkeiten von P- und S-Wellen, Dichte, Dämpfung von P- und S-Wellen, seismische Anisotropie) in ihrer räumlichen Verteilung und in ihrem Bezug zu den verschiedenen Bereichen der Salzstruktur bestimmt werden. Durch diese Kombination der Verfahren lassen sich neue und bessere Erkenntnisse und Aussagen über die geologische Struktur, insbesondere über die äußere Form der Salzstruktur und die Flankenbereiche des Salzsattels, aber auch über die vermutlich sehr heterogenen Bereiche im Innern des Salzsattels, treffen. Weiterhin erlaubt die Multiparameterabbildung im Idealfall eine verbesserte Gesteinscharakterisierung bezüglich des Spannungszustandes (Anisotropie) und Indizien für mögliche Fluidwege (Poisson-Verhältnis, Dämpfung).

Um dies zu erreichen, wird die am KIT durchgeführte Wellenfeldinversion in einem Multiparameter-Ansatz so erweitert werden, dass sie neben der P-Wellengeschwindigkeit auch die S-Wellengeschwindigkeit, die Dämpfung von P- und S-Wellen sowie Richtungs- und Polarisationsabhängigkeiten der Wellengeschwindigkeiten (Anisotropie) rekonstruieren kann. Für diese Multiparameter-Wellenfeldinversion in dämpfenden anisotropen Medien sollen geeignete Inversionsstrategien sowie Datenbearbeitungsverfahren entwickelt werden.

Des Weiteren soll im Rahmen des Projektes an der TUBAF die fokussierende Pre-Stack-Tiefenmigration dazu verwendet werden, das aus der Wellenfeldinversion (Projektteil des KIT) resultierende P-Wellengeschwindigkeitsmodell mit den aus konventionellen Verfahren (z.B. Semblance-Analyse, Reflexionstomographie, etc.) abgeleiteten Geschwindigkeitsmodellen hinsichtlich ihrer resultierenden Abbildungsqualität bei Verwendung innerhalb der Pre-Stack-Tiefenmigration miteinander zu vergleichen. Darüber hinaus soll die fokussierende Pre-Stack-Tiefenmigration erweitert werden, um das aus der Wellenfeldinversion abgeleitete S-Wellengeschwindigkeitsmodell und die Dämpfung sowie ggf. die Anisotropie in den Migrationsprozess zu integrieren und entsprechende seismische Abbildungen für die S-Wellenanteile zu generieren bzw. Dämpfungseffekte korrekt zu berücksichtigen.

Die in diesem Projekt erzielten Ergebnisse liefern ein neues, integriertes, hochauflösendes seismisches Verfahren für die strukturelle Abbildung sowie die Bestimmung gesteinsphysikalischer Parameter aus seismischen Daten. Die entwickelte Methode kann zukünftig auch auf andere Endlagerstandorte angewendet werden. Für das Endlager Asse II können die im Projekt erzielten Anwendungsergebnisse zusammen mit weiteren geowissenschaftlichen und geotechnischen Untersuchungen eine entscheidende Voraussetzung zur Erlangung der Genehmigung für die Rückholung des nuklearen Abfalls einschließlich der Planung des Rückholbergwerkes bilden, z. B. durch eine präzisere Lagebestimmung von Grenzflächen und die Charakterisierung von Heterogenitäten.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 13

4 Projektskizze

Für das Projekt wurden ein Arbeitsprogramm und Zeitplan aufgestellt, an dem sich die durchgeführten Arbeiten orientieren:

AP1: Weiterentwicklung der Verfahren

a) Wellenfeldinversion (KIT)

- Ableitung geeigneter Startmodelle der P-Wellengeschwindigkeit mit Hilfe seismischer Tomographie
- Entwicklung eines geeigneten Pre-Prozessings landseismischer Vibroseis-Daten
- Simultane Rekonstruktion der Wellengeschwindigkeit und Dämpfung von P-Wellen
- Erweiterung im Hinblick auf Wellengeschwindigkeit und Dämpfung von S-Wellen
- Analyse der Daten bezüglich seismischer Anisotropie und ggf. Berücksichtigung in der Inversion
- Ggf. Reduktion von Parameter-Crosstalk durch Einbeziehung der Hesse-Matrix
- Reduktion von Rechenzeiten durch Datenselektion (Zeit, Frequenz, Offset)
- Anpassung der Objektfunktion bei der Multiparameterinversion

b) Fokussierende Pre-Stack-Tiefenmigration (TUBAF)

- Verwendung von S-Wellengeschwindigkeitsmodellen (inkl. konvertierter Wellenfeldanteile) zur Strukturabbildung (S-Wellengeschwindigkeitsmodell aus Wellenfeldinversion oder alternativ aus P-Wellengeschwindigkeitsmodell aus Standard-Verfahren (siehe AP2-c: Semblance, Reflexionstomographie, etc.), das unter Annahme eines bestimmten Poisson-Verhältnisses in ein S-Wellengeschwindigkeitsmodell transformiert wird)
- Einbau eines Dämpfungsoperators in das Migrationsintegral im Sinne einer True-Amplitude-Migration
- Berücksichtigung seismischer Anisotropie, falls entsprechende Signaturen in den Messdaten vorhanden sind
- Implementation beider Ansätze in alle Varianten der fokussierenden Pre-Stack-Tiefenmigration: Fresnel-Volumen-Migration (FVM), Kohärenz-Migration (CM), Kohärenz-basierte Fresnel-Volumen-Migration (CbFVM)

AP2: Tests an synthetischen 2D- und 3D-Modellen

- a) Erstellung eines synthetischen, viskoelastischen, anisotropen 2D-Multi-Parameter-Modells in Anlehnung an den Asse 3D-Datensatz (KIT)
- b) Rekonstruktionstests zur Untersuchung der Auflösung der P- und S-Wellengeschwindigkeitsmodelle, Dichte, Dämpfung sowie Anisotropie mit der bei der Feldmessung verwendeten Aufnahmegeometrie (KIT)
- c) Berechnung von P-Wellengeschwindigkeitsmodellen als Vergleichsmodelle durch konventionelle Semblance-Analyse und Reflexionstomographie (TUBAF)
- d) Verwendung aller P-Wellengeschwindigkeitsmodelle (b+c) für die fokussierende Pre-Stack-Tiefenmigration und Vergleich hinsichtlich der Abbildungsqualität (TUBAF)

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 14

- e) Verwendung des S-Wellengeschwindigkeitsmodells sowie der Dämpfung aus der Wellenfeldinversion (siehe b und siehe AP1-b) für die fokussierende Pre-Stack-Tiefenmigration und Berechnung einer migrierten S-Wellen-Tiefensektion sowie eines dämpfungskorrigierten Strukturabbildes (TUBAF)
- f) Vergleich aller Resultate mit dem wahren Modell und Abschätzung der Grenzen und Möglichkeiten der neu entwickelten Verfahren (KIT + TUBAF)

AP3: Tests an Asse 3D-Datensatz

- a) Verwendung des Asse 3D-Datensatzes bzw. eines adäquaten 3D-Teilgebietes aus dem Asse 3D-Datensatz in analoger Weise wie für den synthetischen Datensatz (siehe 2.); zusätzliche vorhandene Informationen, die für die Bestimmung der Parameter relevant sind (z.B. aus AVO, Bohrloch, etc.), werden dabei in jedem Fall berücksichtigt (KIT + TUBAF)
- b) Vergleich der Ergebnisse mit kommerziellen Prozessingergebnissen (CRS, etc.), insbesondere hinsichtlich der Abbildungsqualität und des Mehrwertes an Information durch die hier im Projekt entwickelte Verfahrenskombination (KIT + TUBAF)

AP4: Abschlussarbeiten

- a) Gemeinsame Bewertung der Methodik und Erstellung eines Leitfadens (KIT + TUBAF)
- b) Abschlussbericht (KIT + TUBAF)
- c) Publikation der Projektergebnisse gemeinsam mit BGE (KIT + TUBAF)

	Jahr 1				Jahr 2				Jahr 3			
Quartal	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
AP1: Weiterentwicklung der Verfahren												
AP2: Tests an synthetischem Modell												
AP3: Tests an Asse 3D-Datensatz												
AP4: Abschlussarbeiten												
Zwischenberichte				x			x			x		
Abschlussbericht/Leitfaden												x

Abbildung 1: Zeitplan

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 15

4.1 Institutionen

KIT Karlsruher Institut für Technologie
 Geophysikalisches Institut
 Hertzstraße 16
 76187 Karlsruhe

TUBAF Technische Universität Bergakademie Freiberg
 Institut für Geophysik und Geoinformatik
 Gustav-Zeuner-Straße 12
 09599 Freiberg

4.2 Personal

KIT



TUBAF



Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 16

5 Theorie

5.1 Elastische Wellenfeldinversion (FWI)

Die *Full-Waveform Inversion* (FWI) ist für marine, reflexionsseismische Daten ein inzwischen erprobtes Verfahren. Ihre Anwendung auf reflexionsseismische Landdaten, wie in diesem Projekt im Rahmen der Endlagererkundung, ist jedoch noch in der Entwicklung und wurde so in Deutschland noch nicht durchgeführt [2].

Das Prinzip der FWI basiert auf der computergestützten Simulation seismischer Daten anhand eines vorgegebenen Erdmodells unter Verwendung der im Feld genutzten Messkonfiguration. Die durch Finite-Differenzen-(FD-) Modellierung simulierten Daten werden im Anschluss mit den gemessenen Felddaten verglichen – Abweichungen zwischen den Datensätzen werden dabei auf ein fehlerhaftes Erdmodell zurückgeführt. Anhand der Differenz der Datensätze kann nun durch einen rechenintensiven Algorithmus das Erdmodell verbessert werden. Dieser Prozess der Simulation seismischer Daten, Vergleich mit Felddaten und Aktualisierung des Erdmodells, wird wiederholt, bis die Differenz zwischen simulierten Daten und Felddaten möglichst klein und damit das ermittelte Erdmodell möglichst gut ist. Das Prinzip ist im Flussdiagramm in Abbildung 2 gezeigt. Im Gegensatz zur klassischen Laufzeit-tomographie nutzt FWI dabei nicht nur die Laufzeiten der seismischen Wellen (Phase), sondern auch deren Wellenformen, so dass in einem geeigneten Zeitfenster bis zu einer bestimmten Frequenz eine möglichst gute Übereinstimmung der Daten in Phase und Amplitude erzielt wird. Dieses Verfahren erlaubt es, Erdmodelle verschiedener physikalischer Parameter zu bestimmen, wobei die räumliche Auflösung die der laufzeitbasierten Tomographie-Verfahren deutlich übersteigt. Wichtig hierbei ist, die Simulation seismischer Daten realistisch zu gestalten und wichtige physikalische Phänomene wie Anisotropie oder Dämpfung zu berücksichtigen.

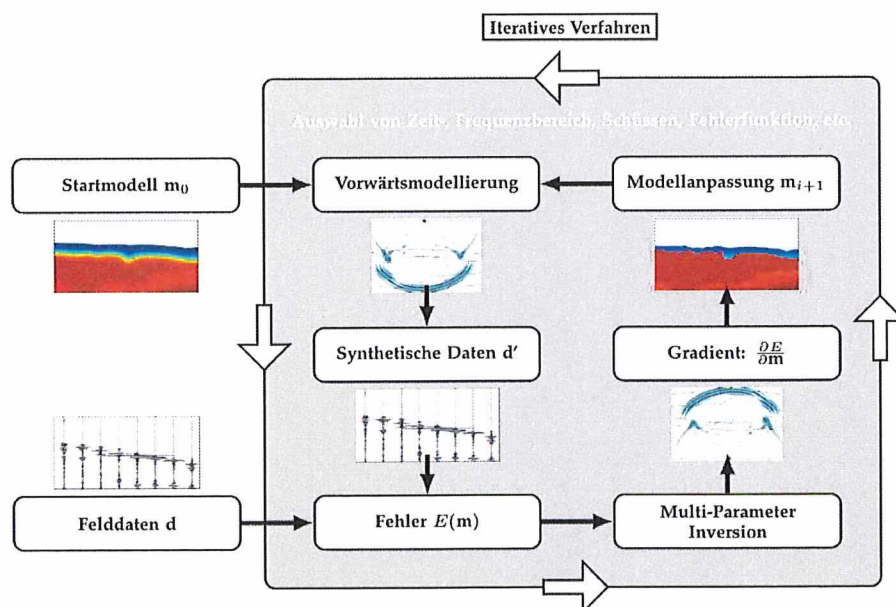


Abbildung 2: Flussdiagramm der Full-Waveform-Inversion. Durch die iterative Durchführung der Schritte wird ein Modell gefunden, das die gemessenen Daten beschreibt. (Quelle: GPI KIT)

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 17

5.1.1 Weiterentwicklung des Verfahrens

Der zu Projektbeginn für die Vorwärtsmodellierung zur Verfügung stehende parallelisierte 2D-Finite-Differenzen-Code SOFI2D [3] war darauf ausgelegt, akustische (P-Wellen), elastische (P- und S-Wellen) und viskoelastische Wellenausbreitung (P-, S-Wellen und Dämpfung) zu modellieren. Untersuchungen zeigten jedoch deutlich, dass im Gebiet der Asse starke Anisotropie vorliegt, die zur Beschreibung der gemessenen Daten von entscheidender Bedeutung ist. Anisotropie beschreibt in der Seismik die Richtungs- oder Winkelabhängigkeit der Geschwindigkeit seismischer Wellen in einem Medium innerhalb der Erde. Da dies mit dem bestehenden Code nicht modelliert werden konnte, musste der Code entsprechend erweitert werden. Hierfür mussten zunächst der theoretische Rahmen und eine geeignete Implementierungsstrategie entwickelt werden.

Bei der Beschreibung von Anisotropie ist die Symmetrie eine wichtige Eigenschaft. Eine der grundlegenden Symmetriesysteme, die hexagonale (oder zylindrische) Symmetrie, ist in der Seismik von besonderem Interesse, da sie relativ einfach ist, sich aber dennoch vielen tatsächlichen Situationen auf der Erde annähern kann, beispielsweise wenn Sedimentschichten übereinander gelagert sind. Die in der Seismik häufigste Beschreibung der Anisotropie ist die der transversalen Isotropie, bei der die Ausbreitungsgeschwindigkeit entlang der Symmetrieachse langsamer ist als senkrecht zur Achse. Die am häufigsten auftretenden Formen sind die der vertikalen transversalen Isotropie (VTI), mit einer vertikalen Symmetrieachse und einer Anzahl von horizontal geschichteten isotropen Ebenen, und die der geneigten transversalen Isotropie (TTI), mit einer rotierten Symmetrieachse und somit Geschwindigkeiten, die sich entsprechend des Azimuts ändern. Auf Grund der starken Faltung der Sedimentgesteine entlang der Salzstruktur der Asse werden die seismischen Daten nur durch die TTI akkurat beschrieben. Eine detaillierte numerische Beschreibung der VTI-viskoelastischen Wellenausbreitung für 2D-Finite-Differenzen-Modellierungen wurde im Zeitbereich entwickelt [4]. Eine ähnliche Beschreibung für die TTI-Wellenausbreitung, allerdings nur im elastischen Fall, liegt ebenfalls vor [5].

Basierend auf diesen Arbeiten wurde eine Formulierung für den TTI-viskoelastischen Fall entwickelt und der bestehende Code mit der Beschreibung der VTI- und TTI-Wellenausbreitung für den elastischen und viskoelastischen Fall erweitert. Hierzu mussten zusätzliche Komponenten des Elastizitätstensors **C**, der die Geschwindigkeit und Polarisation seismischer Wellen für beliebige Ausbreitungsrichtungen eindeutig bestimmt [6], in der mathematischen Formulierung berücksichtigt werden. Auf Grund von Symmetrien besitzt der Elastizitätstensor in 3 Dimensionen 36 unabhängige Elemente, und er kann mithilfe der Voigt-Notation [7] durch zwei Indizes ausgedrückt werden.

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{14} & c_{24} & c_{34} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{15} & c_{25} & c_{35} & c_{45} & c_{55} & c_{56} \\ c_{16} & c_{26} & c_{36} & c_{46} & c_{56} & c_{66} \end{pmatrix}, \quad C_{mn} = C_{nm} \quad (1)$$

Da zunächst nur von 2 Dimensionen und P-SV-Wellen, die in der xz-Ebene polarisiert sind, ausgegangen wurde (x zeigt entlang des 2D-Profiles und z in die Tiefe), wird die Elastizitätsmatrix zu einer 3x3-Matrix.

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{13} & c_{15} \\ c_{13} & c_{33} & c_{35} \\ c_{15} & c_{35} & c_{55} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 18

Im Falle isotroper Medien, bei denen das elastische Verhalten richtungsunabhängig ist, sind nur vier elastische Konstanten unabhängig und die Komponenten lassen sich mit Hilfe der Lamé-Parameter λ und μ schreiben.

$$\mathbf{C}^{iso} = \begin{pmatrix} \pi & \lambda & 0 \\ \lambda & \pi & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{pmatrix}, \quad \text{mit } \pi = \lambda + 2\mu. \quad (3)$$

In 2D-VTI-Medien sind dieselben Matrixelemente belegt, allerdings müssen sie anders beschrieben werden. Für den Fall schwacher Anisotropie (weniger als 20 %) wurden die dimensionslosen Thomsen-Anisotropieparameter ϵ und δ eingeführt [8], mit denen die Elemente der Elastizitätsmatrix, die nicht null sind, bei Ausrichtung entlang der Symmetrieachse wie folgt ausgedrückt werden können.

$$\begin{pmatrix} c_{11} \\ c_{33} \\ c_{13} \\ c_{55} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho v_{P,ver}^2 (1 + 2\epsilon) \\ \rho v_{P,ver}^2 \\ \rho \left(\sqrt{(v_{P,ver}^2 - v_{SV,ver}^2)} [v_{P,ver}^2 (1 + 2\delta) - v_{SV,ver}^2] - v_{SV,ver}^2 \right) \\ \rho v_{SV}^2 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Für den Fall eines TTI-Mediums kann die Elastizitätsmatrix aus $\mathbf{C}^{VTI}$ in der vertikalen Ebene durch eine Koordinatenrotation um die vertikale Achse (Bond-Transformation) bestimmt werden [9, 10]

$$\tilde{\mathbf{C}}^{TTI} = D(\theta_T) \mathbf{C}^{VTI} D^T(\theta_T), \quad (5)$$

mit

$$D(\theta_T) = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta_T & \sin^2 \theta_T & 2 \sin \theta_T \cos \theta_T \\ \sin^2 \theta_T & \cos^2 \theta_T & -2 \sin \theta_T \cos \theta_T \\ -\sin \theta_T \cos \theta_T & \sin \theta_T \cos \theta_T & -\sin^2 \theta_T \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Der Winkel bezeichnet den Neigungswinkel der Symmetrieachse von der Vertikalen entgegen des Uhrzeigersinns. Im 3D-Fall erfolgt eine weitere Rotation der Achse außerhalb der vertikalen Ebene. Diese wird durch einen weiteren Neigungswinkel beschrieben, der bei der 3D-Modellierung und 3D-FWI zu berücksichtigen ist. Wir betrachten im Folgenden den 2D-Fall. Hier sind im 2D-TTI-Fall alle Elemente der Elastizitätsmatrix von null verschieden und es ergibt sich

$$\tilde{\mathbf{C}}^{TTI} = \begin{pmatrix} \tilde{c}_{11} & \tilde{c}_{13} & \tilde{c}_{15} \\ \tilde{c}_{13} & \tilde{c}_{33} & \tilde{c}_{35} \\ \tilde{c}_{15} & \tilde{c}_{35} & \tilde{c}_{55} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 19

mit

$$\begin{pmatrix} \tilde{c}_{11} \\ \tilde{c}_{33} \\ \tilde{c}_{13} \\ \tilde{c}_{55} \\ \tilde{c}_{15} \\ \tilde{c}_{35} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} \cos^4 \theta_T + c_{33} \sin^4 \theta_T + 2(c_{13} + 4c_{55}) \sin^2 \theta_T \cos^2 \theta_T \\ c_{11} \sin^4 \theta_T + c_{33} \cos^4 \theta_T + 2(c_{13} + 4c_{55}) \sin^2 \theta_T \cos^2 \theta_T \\ (c_{11} + c_{33} - 4c_{55}) \sin^2 \theta_T \cos^2 \theta_T + c_{13} (\sin^4 \theta_T + \cos^4 \theta_T) \\ (c_{11} + c_{33} - 2c_{13}) \sin^2 \theta_T \cos^2 \theta_T + c_{55} (\cos^2 \theta_T - \sin^2 \theta_T)^2 \\ (c_{13} - c_{11} + 2c_{55}) \cos^3 \theta_T \sin \theta_T - (c_{13} - c_{33} + 2c_{55}) \cos \theta_T \sin^3 \theta_T \\ (c_{13} - c_{11} + 2c_{55}) \sin^3 \theta_T \cos \theta_T - (c_{13} - c_{33} + 2c_{55}) \sin \theta_T \cos^3 \theta_T \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Zur Beschreibung der frequenzabhängigen Dämpfung im *Generalized Standard Linear Solid* (GSLS) wurde die τ -Methode eingeführt [11], was zu folgender Beschreibung des Qualitätsfaktors in anisotropen Medien führt:

$$Q_{ij}^{-1}(\omega, \tau^{ol}, \tau_{ij}) = \frac{\sum_{l=1}^L \tau_{ij} \frac{\omega \tau^{ol}}{1 + (\omega \tau^{ol})^2}}{1 + \sum_{l=1}^L \tau_{ij} \frac{(\omega \tau^{ol})^2}{1 + (\omega \tau^{ol})^2}}, \quad (9)$$

wobei die Relaxationszeit des l -ten Relaxationsmechanismus und der Parameter τ_{ij} die Stärke der Dämpfung beschreibt und wie folgt definiert ist:

$$\tau_{ij} = \frac{\tau_{ij}^{el}}{\tau^{ol}} - 1 \quad (10)$$

Hier ist τ_{ij}^{el} die Retardationszeit. Um eine über den modellierten Frequenzbereich konstante Dämpfung zu erzielen, muss die Anzahl L an Relaxationsmechanismen und deren Relaxationszeiten τ^{ol} entsprechend gewählt werden.

Wir verwenden für die Modellierung eine Formulierung der Wellengleichungen im Zeitbereich. Diese wurde so gewählt, dass die Erweiterung auf Anisotropie konsistent mit unserer bisher verwendeten Implementierung für isotrope Medien ist. Die von uns gewählte Formulierung berücksichtigt bereits die Anisotropie seismischer Dämpfung und ist daher physikalisch vollständig. Wir geben im Folgenden nur die jeweilige Spannungs-Dehnungs-Beziehung wieder, da nur in dieser Beziehung die Anisotropie auftritt (die Bewegungsgleichung bleibt unverändert).

- VTI-Medium

$$\dot{\sigma}_{xx} = c_{11}^U \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{13}^U \frac{\partial v_z}{\partial z} + \sum_{l=1}^L r_{xx}^l, \quad (11a)$$

$$\dot{\sigma}_{zz} = c_{13}^U \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{33}^U \frac{\partial v_z}{\partial z} + \sum_{l=1}^L r_{zz}^l, \quad (11b)$$

$$\dot{\sigma}_{xz} = c_{55}^U \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \sum_{l=1}^L r_{xz}^l, \quad (11c)$$

$$r_{xx}^l = -\frac{1}{\tau^{ol}} \left(c_{11}^R \tau_{11} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{13}^R \tau_{13} \frac{\partial v_z}{\partial z} + r_{xx}^l \right), \quad (11d)$$

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 20

$$\dot{r}_{zz}^l = -\frac{1}{\tau_{\sigma l}} \left(c_{13}^R \tau_{13} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{33}^R \tau_{33} \frac{\partial v_z}{\partial z} + r_{zz}^l \right), \quad (11e)$$

$$\dot{r}_{xz}^l = -\frac{1}{\tau_{\sigma l}} \left[c_{55}^R \tau_{55} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + r_{xz}^l \right]. \quad (11f)$$

- TTI-Medium

$$\dot{\sigma}_{xx} = \tilde{c}_{11}^U \frac{\partial v_x}{\partial x} + \tilde{c}_{13}^U \frac{\partial v_z}{\partial z} + \tilde{c}_{15} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \sum_{l=1}^L r_{xx}^l, \quad (12a)$$

$$\dot{\sigma}_{zz} = \tilde{c}_{13}^U \frac{\partial v_x}{\partial x} + \tilde{c}_{33}^U \frac{\partial v_z}{\partial z} + \tilde{c}_{35} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \sum_{l=1}^L r_{zz}^l, \quad (12b)$$

$$\dot{\sigma}_{xz} = \tilde{c}_{15}^U \frac{\partial v_x}{\partial x} + \tilde{c}_{35}^U \frac{\partial v_z}{\partial z} + \tilde{c}_{55} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \sum_{l=1}^L r_{xz}^l, \quad (12c)$$

$$-\tau_{\sigma l} \dot{r}_{xx}^l = \tilde{c}_{11}^R \tau_{11} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \tilde{c}_{13}^R \tau_{13} \frac{\partial v_z}{\partial z} + \tilde{c}_{15}^R \tau_{13} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + r_{xx}^l, \quad (12d)$$

$$-\tau_{\sigma l} \dot{r}_{zz}^l = \tilde{c}_{33}^R \tau_{33} \frac{\partial v_z}{\partial z} + \tilde{c}_{13}^R \tau_{13} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \tilde{c}_{35}^R \tau_{35} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + r_{zz}^l, \quad (12e)$$

$$-\tau_{\sigma l} \dot{r}_{xz}^l = \tilde{c}_{55}^R \tau_{55} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + \tilde{c}_{15}^R \tau_{15} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \tilde{c}_{35}^R \tau_{35} \frac{\partial v_z}{\partial z} + r_{xz}^l, \quad (12f)$$

wobei σ_{ij} die Spannungstensorelemente und v_i die Partikelgeschwindigkeiten sind. Die Dämpfung wird hier über die Erinnerungsvariable (*Memory Variable*) r_{ij}^l beschrieben. Zeitliche Ableitung werden durch einen Punkt, räumliche über $\frac{\partial}{\partial x}$, $\frac{\partial}{\partial y}$ bzw. $\frac{\partial}{\partial z}$ angezeigt. Dabei ist anzumerken, dass wir die ursprüngliche Formulierung [4] aus Gründen der Konsistenz mit unseren bisher verwendeten Algorithmen für isotrope viskoelastische Medien geringfügig modifiziert haben.

Extraktion einer 2D-Linie

Zunächst wurde für die Erstellung der synthetischen Daten und die Analyse der Anisotropie das Problem auf 2D reduziert, um Rechenzeit zu sparen und effektiver Tests durchführen zu können. Bei der Auswahl einer geeigneten 2D-Linie wurde darauf geachtet, dass die Linie die Salzstruktur möglichst senkrecht schneidet, um der 2D-Annahme möglichst gut zu genügen, und dass sie in der Nähe zusätzlicher Informationen (Bohrungen) und des neu zu bohrenden Schachts liegt. Die Wahl fiel auf *Crossline* 1641 aus der Akquisitionsanordnung, die SSW-NNO streichend und mit unmittelbarer Nähe zum geplanten Bohrplatz des Schachts 5 und zur Bohrung R8, für die Bohrlochmessungen sowie VSP-Daten vorliegen, alle Anforderungen erfüllt. Diese *Crossline* liegt entlang der Schusslinie 5421, so dass alle Schüsse dieser Linie und zusätzlich alle Empfänger auf dieser Linie (Empfängerpunkt 5421) extrahiert wurden. Somit ergab sich eine Gesamtzahl von 66960 Spuren mit 744 Schüssen und 101 Empfängern. Die Linie ist in Abbildung 3 gezeigt. Da die ausgewählten Schüsse und Empfänger im Feld nicht exakt auf der Ideallinie ausgelegt werden konnten, wurden sie anschließend von dem ursprünglichen 3D-Koordinatensystem in die für die FD-Modellierung nötige 2D-Geometrie konvertiert. Dafür wurden die Schüsse auf die 2D-Linie projiziert und die Empfänger *Offset*-konsistent auf die 2D-Linie eingedreht. Zuletzt wurde die Höhe (z-Koordinate) an die neuen Quell- und Empfängerpositionen angepasst (Abbildung 4).

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 21

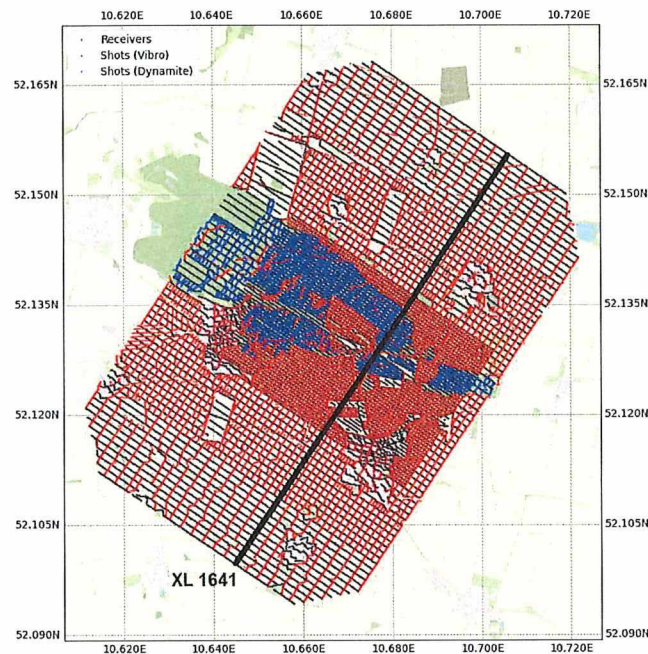


Abbildung 3: Akquisitionsanordnung der 3D-Seismik Asse und die ausgewählte 2D-Linie XL 1641. Empfängerpositionen sind schwarz markiert, Vibratorpunkte rot und Dynamitschüsse blau.

Quellsignal

Um die Wellenausbreitung möglichst realistisch zu modellieren, wurde das Quellsignal aus den im Feld verwendeten *Sweep*-Parametern errechnet. Hierfür wurde aus den *Sweep*-Parametern das im Feld verwendete Signal rekonstruiert und anschließend autokorreliert. Das somit erhaltene nullphasige Klaudersignal wurde dann mit dem gelieferten Filter gefaltet, so dass ein minimalphasiges Quellsignal erhalten wurde, das mit den Wellenzügen der Felddaten nach Korrelation mit dem *Sweep* übereinstimmt. Das Signal hat einen Frequenzbereich von 5-120 Hz. Eine Untersuchung des Frequenzbereichs der Daten ergab jedoch, dass im Frequenzbereich oberhalb von etwa 100 Hz nur noch vergleichsweise wenig Energie zum Signal beiträgt, da dort die Energie um mehr als 25 dB/Oktave reduziert ist.

Da die FWI besonders die niedrigen Frequenzen benötigt, um ein Geschwindigkeitsmodell mit ausreichend hoher Auflösung zu generieren, werden in diesem Fall Daten bis maximal 20 Hz invertiert. Die FVM benutzt allerdings den gesamten Frequenzbereich für die Abbildung der Reflektoren, weshalb die Referenzdaten über den gesamten Frequenzbereich von 5-100 Hz modelliert werden. Um diesen unterschiedlichen Anwendungen gerecht zu werden, wurde das gewonnene Quellsignal mit verschiedenen Bandpassfiltern bearbeitet. Das ungefilterte Signal, sowie Quellsignale in den Frequenzbereichen, die für die Modellierung der Referenzdaten und die FWI benutzt werden, sind in Abbildung 5 dargestellt.

Erstellung der 2D-Modelle

Zunächst wurden synthetische Modelle mit der Software Reveal erstellt, mit deren Hilfe der Einfluss insbesondere der Anisotropie abgeschätzt werden konnte. Die Modelle basieren auf Horizonten und analytischen Gesteinsparametern und Beziehungen, die von der BGE zur Verfügung gestellt wurden.

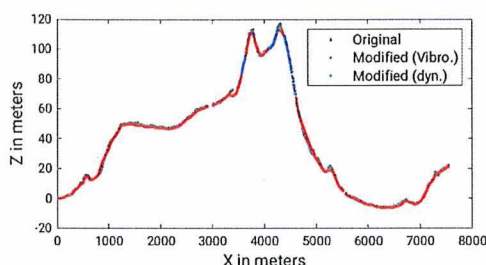
Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



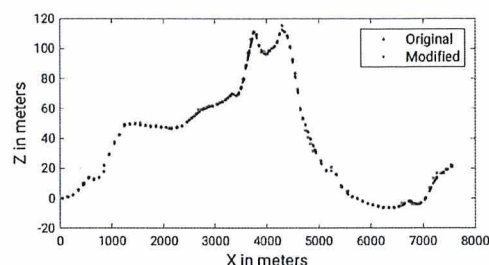
BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

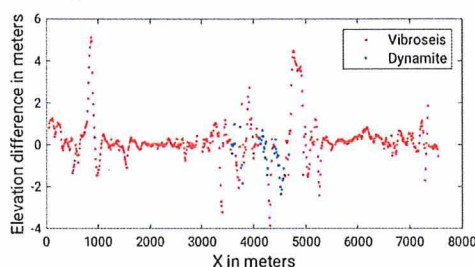
Blatt: 22



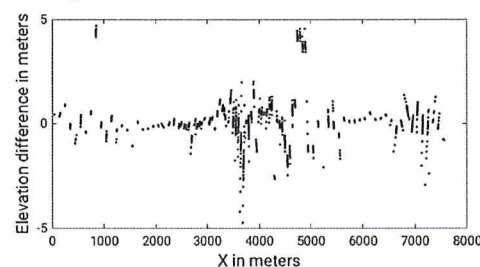
(a) Original and modified source elevations.



(b) Original and modified receiver elevations.



(c) Source elevation difference.



(d) Receiver elevation difference.

Abbildung 4: Korrektur der Quell- und Empfängerhöhe. Gezeigt sind die originale und die korrigierte Höhe nach der 2D-Projektion der Quell- (a) und Empfängerpositionen (b). (c) und (d) zeigen die Höhendifferenzen, die durch die 2D-Korrektur jeweils für die Quellen und Empfänger verursacht wurde.

Sie beschreiben die Verteilung der Wellengeschwindigkeit von P- und S-Wellen v_p und v_s , der Dichte ρ , der Dämpfung der P- und S-Wellen Q_p und Q_s und der Anisotropieparameter δ und ϵ (Thomsen-Parameter) sowie des Dips entlang des Profils. In 3D kommt noch ein weiterer Dip in die orthogonale Richtung hinzu. Die Parameter der Modelle sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Modellparameter der verschiedenen geologischen Formationen.

Formation	$V_{P_{min}}$ (m/s)	$V_{P_{max}}$ (m/s)	$V_{S_{min}}$ (m/s)	$V_{S_{max}}$ (m/s)	ρ_{min} (kg/m ³)	ρ_{max} (kg/m ³)	ϵ	δ	Q_P, Q_S
Kreide	2300	2300	1330	1330	2380	2380	0.15	0.10	140
Jura	2400	2400	1385	1385	2400	2400	0.15	0.10	140
Keuper	1900	5200	1095	2000	2260	2910	0.15	0.10	120
Muschelkalk	2600	4500	1500	2600	2450	2810	0.15	0.10	100
Buntsandstein	2500	5200	1445	3000	2430	2910	0.12	0.08	80
Zechstein	4550	4550	2625	2625	2100	2100	0.00	0.00	200
Rotliegend	4600	4600	2655	2655	2820	2820	0.15	0.10	80

Die Modelle haben scharfe Kontraste an den Grenzflächen, um deutliche Reflexionen in den modellierten Daten für die spätere Verwendung in der Migration zu generieren. Deren Wiederherstellung kann dann als Qualitätsmerkmal für die Migration und die per FWI generierten Geschwindigkeitsmodelle herangezogen werden (Rekonstruktionstests). Die Schichten Keuper, Muschelkalk und Buntsandstein weisen für Geschwindigkeiten und Dichte einen Gradienten auf. Einzig das Modell für den Dip ist glatt und wurde aus den Steigungen der Horizonte errechnet. Hierfür wurden zunächst die Steigungen an den jeweiligen Horizonten bestimmt und zwischen den Horizonten interpoliert. Anschließend wurden

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 23

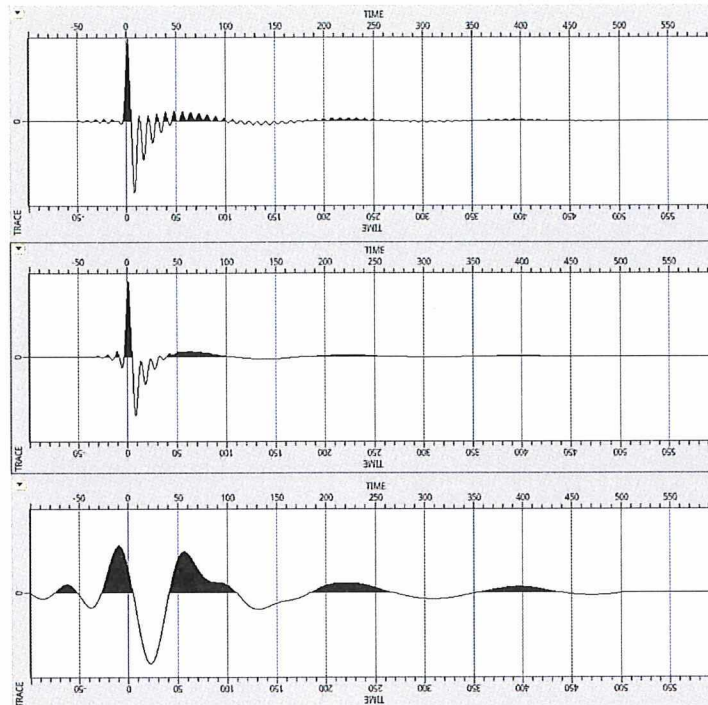


Abbildung 5: Minimalphasiges Klaudersignal im vollen Frequenzbereich (oben), nach Bandpassfilterung 2 Hz/20 dB/Okt. - 100 Hz/96 dB/Okt. (mitte) und nach Bandpassfilterung 2 Hz/20 dB/Okt. - 20 Hz/72 dB/Okt. (unten).

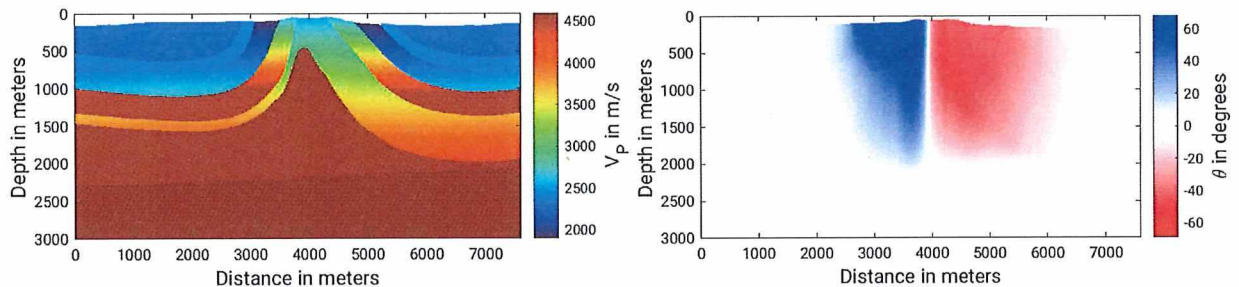


Abbildung 6: 2D- v_P — (links) und Dip-Modell (rechts) zur Erstellung der Referenzdaten.

diese Dips noch mit einer den Horizonten folgenden Glättungsfunktion geglättet. Das Ergebnis sowie das Modell für die P-Wellengeschwindigkeit sind in Abbildung 6 gezeigt.

In SOFI2D wird für die Diskretisierung, die für die numerische Lösung der viskoelastischen Wellengleichungen erforderlich ist, das *Standard Staggered Grid* (SSG) verwendet [12, 13], was Vorteile bei der Effizienz der Berechnungen und dem Speicherbedarf bietet. Beim SSG wird die vertikale Komponente der Partikelgeschwindigkeit an halben Gitterpunkten berechnet. Modellparameter an diesen halben Gitterpunkten werden durch Mittelung aus den umgebenden ganzen Gitterpunkten bestimmt, an denen die Modellparameter definiert sind. Da alle Quellen und Empfänger bei der Modellierung als vertikale Punktquellen und -empfänger genähert werden, können diese nicht an ihrer originalen Position an der Oberfläche definiert werden, sondern müssen auf den jeweils nächsten (halben) Gitterpunkt im Modell geschoben werden (Abbildung 7).

Eine Schwierigkeit, die sich bei der FD-Modellierung ergibt, ist die Beschreibung von nicht-horizontalen oder -vertikalen Grenzflächen. Sie müssen in FD über Stufen angenähert werden, da die Wellenfeld-

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 24

berechnungen auf einem rechtwinkligen Gitter durchgeführt werden. Dies betrifft bei den Modellen sowohl die Grenzflächen der einzelnen geologischen Einheiten als auch die Topografie. In diesem Fall gilt, je feiner das Gitter, desto besser ist die Anpassung an die glatte Grenzfläche. Ein weiteres Problem, das durch die stufenförmige Annäherung von Grenzflächen entsteht, tritt auf, wenn das Modell zu grob ist, was zu vielen Kanten im Modell führen kann. Diese diskreten Diskontinuitäten erzeugen kreisförmige Wellenfronten, wodurch sie als Quellen für unphysikalische Wellen und Rauschen wirken. Beide Probleme sind als der sogenannte *Stair Case* Effekt bekannt [14]. Aufgrund der vergleichsweise geringen Kontraste zwischen den geologischen Einheiten im Modell ist das Problem an diesen Stellen zu vernachlässigen. Bei der Topografie der Erdoberfläche, mit dem starken Parameterkontrast zwischen Gestein und Luft, ist dies allerdings nicht der Fall. Da ein sehr kleines Gitter die Rechenzeit stark erhöht, muss diesem Phänomen in einigen Fällen mit anderen Hilfsmitteln begegnet werden.

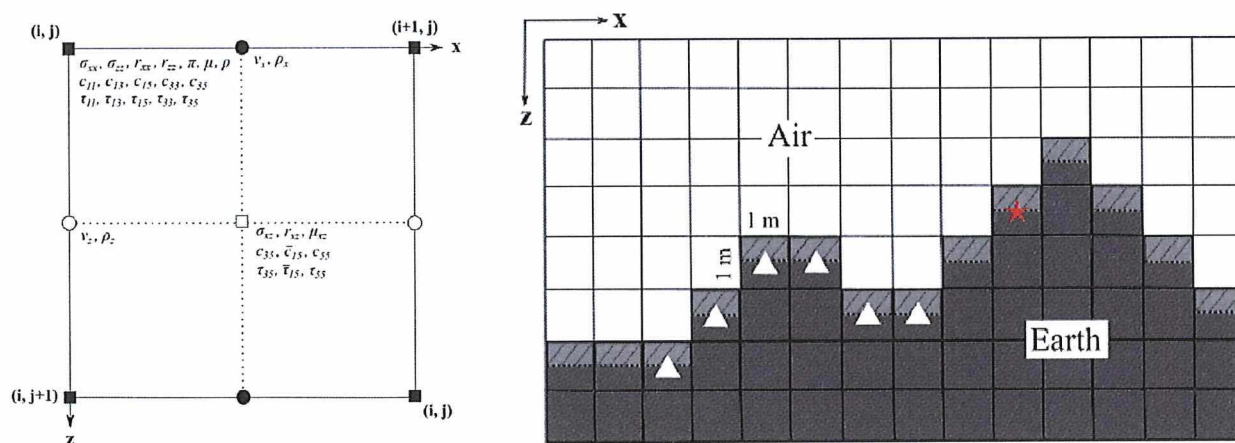


Abbildung 7: Verteilung der viskoelastischen anisotropen Wellenfeld und Materialparameter einer FD-Zelle im SSG (links) und die Beschreibung von Topografie im SSG (rechts) mit Quell- (roter Stern) und Empfängerpositionierung (weißes Dreieck).

Relaxationsmechanismen

Die Dämpfung seismischer Wellen basierend auf anelastischen Prozessen und innerer Reibung wird mathematisch mit Hilfe des Qualitätsfaktors Q beschrieben. Q verhält sich antiproportional zur Stärke der Dämpfung. Werte für die Dämpfung der P-Wellen (Q_p) zur Erstellung des Dämpfungsmodells für die viskoelastische Modellierung wurden von der BGE zur Verfügung gestellt. Aufgrund mangelnder Informationen wurde die Dämpfung der S-Wellen (Q_s) mit Q_p gleichgesetzt. Dies ist bei vielen Gesteinen eine realistische Annahme. Wie in Tabelle 1 zu sehen ist, variiert Q zwischen 80 und 200. Zur Modellierung der Dämpfung in der am GPI entwickelten Modellierungs- und Inversionssoftware (SOFI / IFOS) wird das rheologische Modell des GRLS verwendet [15, 16]. Es besteht aus einer Anzahl L an Maxwell-Körpern die miteinander und einer weiteren Feder parallelgeschaltet sind. Der Frequenzbereich, in dem ein konstantes Q simuliert werden kann, hängt von der Anzahl an Relaxationsmechanismen L und den jeweiligen Frequenzen ω (Inverse der Relaxationszeit) der gewählten Relaxationsmechanismen ab. Um diese zu bestimmen, wurde am GPI ein Programm entwickelt, das für eine vorgegebene Anzahl von Relaxationsmechanismen L die Relaxationsfrequenzen ω_i bestimmt, die in einem vorgegebenen Frequenzbereich eine möglichst gute Anpassung für alle im Modell beobachteten Q -Werte liefert. Auf diese Weise kann die Dämpfung dann weiterhin durch einen Materialparameter (τ) für jedes Gestein beschrieben werden.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 25

Für die Vorwärtsmodellierung der FWI zeigt sich, dass ein Relaxationsmechanismus ($L = 1$) ausreichend ist, da mit einem eingeschränkten Frequenzbereich von 5 Hz bis 20 Hz gearbeitet wird.

Für die Modellierung der Referenzdaten zeigen die Ergebnisse der Tests jedoch, dass $L = 5$ Relaxationsmechanismen nötig sind, um ein konstantes Q in dem vorgesehenen Frequenzbereich von 5-100 Hz zu modellieren. Die Frequenzen der einzelnen Relaxationsmechanismen sind 2,38 Hz, 6,73 Hz, 28,52 Hz, 116,90 Hz und 323,33 Hz. Abbildung 8 zeigt die Q -Werte in dem relevanten Frequenzbereich bei Anwendung von drei, vier und fünf Relaxationsmechanismen.

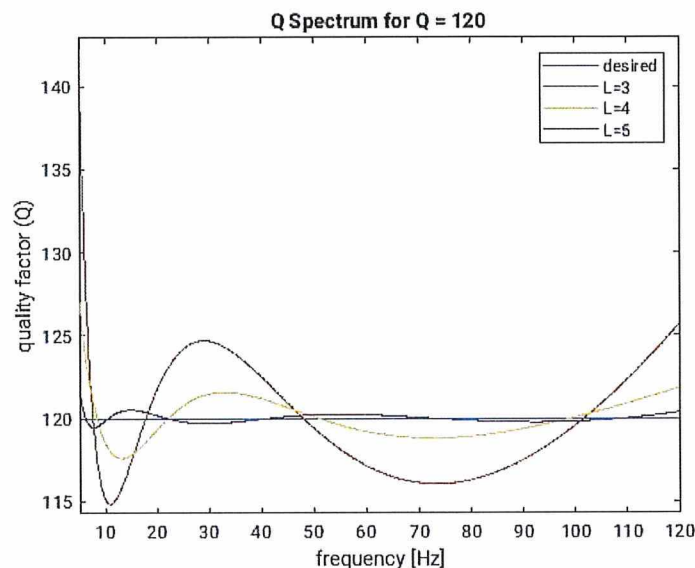


Abbildung 8: Q-Faktor für den gewählten Frequenzbereich für drei (rot), vier (gelb) und fünf Relaxationsmechanismen (lila). Das ideale Ergebnis eines konstanten Q von 120 ist in blau aufgetragen.

Parametertests für die synthetische 2D-Modellierung

Um sicherzustellen, dass eine FD-Modellierung stabil ist und keine zu große Dispersion auftritt, müssen die Parameter der Modellierung wie Zellengröße Δh , Zeitschritte Δt und die Ordnungen der FD-Modellierung bestimmt und getestet werden. Aus dem Dispersionskriterium

$$\Delta h \leq \frac{\lambda_{\min}}{n} \quad \text{mit } \lambda_{\min} = \frac{v_{s,\min}}{f_{\max}} \quad (13)$$

kann die maximale Zellgröße abgeschätzt werden. Hierbei sind $v_{s,\min}$ die geringste Geschwindigkeit im Modell, $f_{\max}$ die maximale zu modellierende Frequenz und n die Anzahl an benötigten Gitterpunkten pro Wellenlänge, die sich aus der FD-Ordnung ergibt. Hierfür ergibt sich bei einer minimalen S-Wellengeschwindigkeit von $v_{s,\min} = 1097$ m/s und 4. FD-Ordnung ($n = 8$) eine maximale Zellengröße von $\Delta h = 6,2$ m für die FWI-Modellierung bis maximal $f_{\max} = 22$ Hz. Basierend auf diesem Wert wurden verschiedene Gittergrößen getestet. Obwohl keine Unterschiede in den Wellenformen der Erstankommenden zu beobachten waren, wurde anschließend eine Gittergröße von 1 m x 1 m bei einer FD-Ordnung von 4 verwendet. Dies führte zwar zu signifikant längeren Rechenzeiten für jeden Schuss, wurde allerdings in Kauf genommen, da hierbei numerische Artefakte an der Oberfläche, der sogenannte

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 26
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	64213000				HF	PH	0002	00	

Staircase Effect, reduziert werden konnten, was sich besonders bei den Oberflächenwellen zeigte. Außerdem musste im Rahmen dieser Studie nur eine geringe Anzahl an Schüssen modelliert werden, so dass der Rechenaufwand insgesamt begrenzt war. Allerdings war auch klar, dass für die Berechnung der Referenzdaten sowie die FWI eine andere Lösung gefunden werden muss. Eine Möglichkeit ist die Einführung einer sehr dünnen (nur wenige Zellen) stark dämpfenden oberflächennahen Schicht.

Nach der Bestimmung der Gittergröße ergibt sich das zu wählende Zeitintervall über

$$\Delta t \leq \frac{\Delta h}{\beta \sqrt{2} v_{\max}} \quad (14)$$

wobei sich β aus der Summe der Gewichtungskoeffizienten des FD-Taylor-Operators ergibt [17]. Mit der zuvor festgelegten Gittergröße und einer maximalen Geschwindigkeit von $v_{\max} = 5290$ m/s gilt $\Delta t \leq 0,13$ ms. Die Modellierung wurde mit $\Delta t = 0,1$ ms gerechnet.

Dieselben Abschätzungen wurden für die Berechnung der Referenzdaten durchgeführt. Hier ergab sich bei einer FD-Ordnung von 6 ($n = 6$) und auf Grund der größeren zu modellierenden Frequenzen (bis 100 Hz) ein niedrigerer Wert von $\Delta h = 1,24$ m. Da dies allerdings ein empfohlener Wert und kein hartes Limit ist, wurden verschiedene Gittergrößen getestet, die teilweise auch über diesem Wert liegen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wellenformen der direkten und reflektierten P- und S-Wellen erst bei Gittergrößen über 2 m sichtbare Unterschiede zeigen. Um die Artefakte der Oberflächenwellen (*Staircase Effect*) zu minimieren, wurde die Dämpfung jeweils der ersten Zelle unter der Oberfläche auf $Q_p = Q_s = 1,0$ gesetzt, also mit sehr starker Dämpfung versehen. Dies verhindert die Überlagerung der Reflexionen mit diesen Oberflächenartefakten und ermöglicht es, mit einem größeren Modell und somit deutlich geringeren Rechenzeiten auszukommen. Auch wurden Tests mit einem "gefluteten" Modell durchgeführt, bei dem die Luftschicht mit Geschwindigkeiten und Dichte, wie sie im oberflächennahen Modellbereich auftreten, ersetzt wurde. Dies sorgt für eine komplette Unterdrückung von Oberflächeneffekten. Die Referenzdaten beider Tests wurden mit einem Zeitintervall von 0,2 ms modelliert (Stabilitätskriterium: $\Delta t \leq 0,216$ ms) und der TUBAF zur Verfügung gestellt.

Ergebnisse AP1a: Analyse der Daten bezüglich seismischer Anisotropie und ggf. Berücksichtigung in der Inversion

Mit Hilfe des erweiterten anisotropen viskoelastischen FD-Modellierungscodes (SOFI2D) wurde zunächst untersucht, inwieweit Anisotropie und Dämpfung für die Beschreibung der erstankommenden Wellen im gemessenen Wellenfeld nötig sind. Hierfür wurde die vertikale Komponente der Partikelgeschwindigkeit für die verschiedenen modellierten Wellenfelder mit den im Feld gemessenen Daten verglichen, wobei zunächst nur die Ankunftszeit, nicht wie bei der FWI üblich das gesamte Wellenfeld, betrachtet wurde. Da dies Vorarbeiten zur FWI sind, wurden die Tests im Frequenzbereich der FWI durchgeführt und auch die Felddaten auf den Bereich 2 Hz bis 20 Hz gefiltert.

Zunächst wurde die Ausbreitung der Wellenfelder analysiert, in denen sich der Einfluss der Anisotropie am besten beurteilen lässt. Abbildung 9 zeigt das simulierte Wellenfeld von Schusspunkt 214 sowohl im isotropen als auch im VTI-Fall (das TTI-Modellierungsergebnis wird hier nicht dargestellt, da es visuell nur geringfügige Wellenfeldänderungen im Vergleich zum VTI-Modellierungsergebnis gibt). Da das Untergrundmodell heterogen ist und die Strukturen steil einfallen, wobei sich Wellen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in alle Richtungen ausbreiten, haben die Wellenfronten sehr komplexe Formen. Im VTI-Fall bewegen sich die Wellenfronten in horizontaler Richtung schneller, ein Phänomen, das an der

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

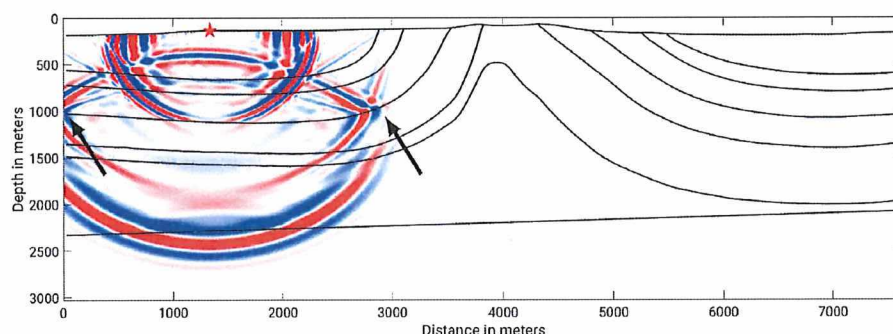
Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 27

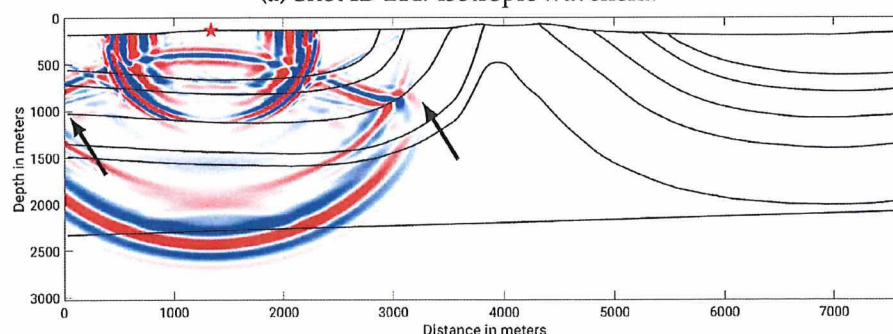
Keuper-Muschelkalk-Grenzfläche gut beobachtet werden kann (schwarze Pfeile in Abbildung 9), wo aufgrund des hohen Geschwindigkeitskontrasts eine signifikante Amplitudenänderung auftritt.

Aus der Analyse weiterer Schusspunktmodellierungen konnte außerdem erkannt werden, dass für Schusspunkte, die direkt oberhalb der Salzstruktur liegen, nur sehr wenig Energie in den Salzkörper und tiefe Schichten eindringt. Dies liegt daran, dass die seismischen Wellen die Reflektoren der Salzflanken unter sehr steilen Winkeln treffen, was teilweise zu Totalreflexion führt. Für Schüsse mit größerem Abstand zur Salzstruktur, wie z.B. der gezeigte Schuss 214, ist dies nicht der Fall und auch der tiefere Modellbereich wird gut durchleuchtet.

Abbildung 10 zeigt den Vergleich der Felddaten mit den isotropen und anisotropen synthetischen Schussdiagrammen ebenfalls für den Schusspunkt 214. Auch hier können die aufgrund starker lateraler und vertikaler Änderungen der geologischen Struktur sehr komplexen Ereignisse in den synthetischen Wellen beobachtet werden. Im isotropen Fall gibt es eine gute Übereinstimmung zwischen den Erstankunftswellenformen für geringe Tiefen und kleine Offsets. Eine bessere Übereinstimmung tritt mit VTI-modellierten Daten insbesondere bei mittleren Offsets um den energiefokussierenden Effekt herum auf. Sowohl bei mittleren als auch bei größeren Offsets zeigen die TTI-Modellierungsergebnisse die beste Anpassung. Die schlechtere Anpassung der Daten bei kleinen Offsets unter Verwendung von Anisotropie bedarf noch eingehender Untersuchungen. Hier scheint die Anisotropie oberflächennah zu groß zu sein, was z. B. durch einen Gradienten für die Anisotropie in den ersten hundert Metern behoben werden könnte.



(a) Shot ID 214: isotropic wavefield.



(b) Shot ID 214: VTI wavefield.

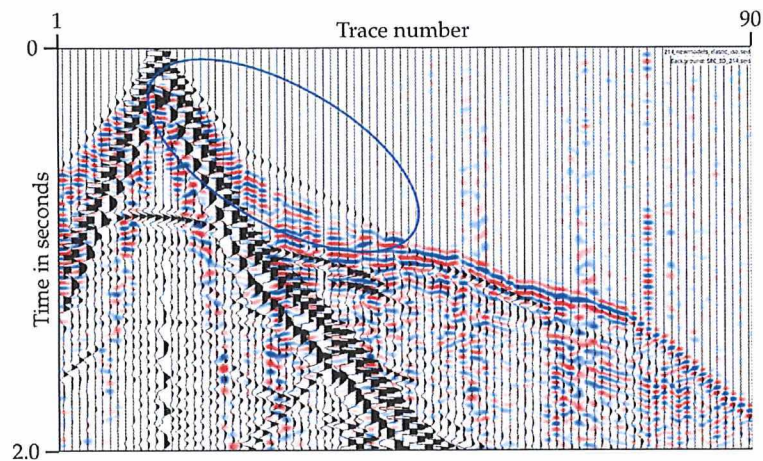
Abbildung 9: Synthetische Wellenfeldmodellierung der vertikalen Teilchengeschwindigkeit für Schusspunkt 214 zum Zeitpunkt 0,8 s nach Auslösen des Schusses. Die geologischen Horizonte sind in schwarz aufgetragen. Markante Unterschiede zwischen dem isotropen und VTI-anisotropen Wellenfeld sind mit Pfeilen markiert.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht

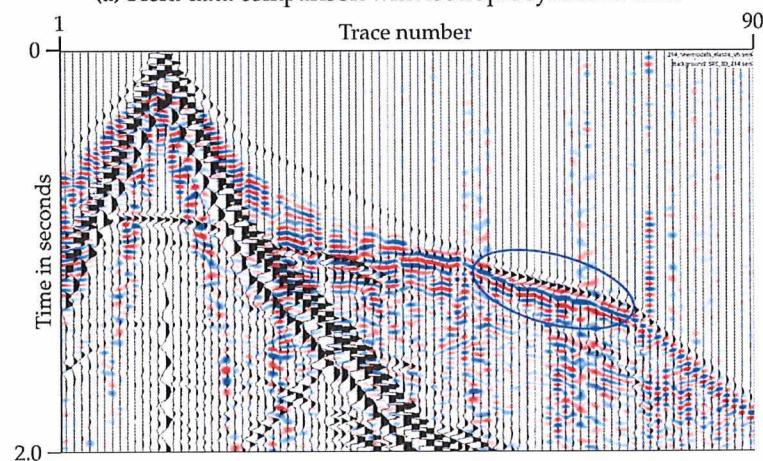


BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

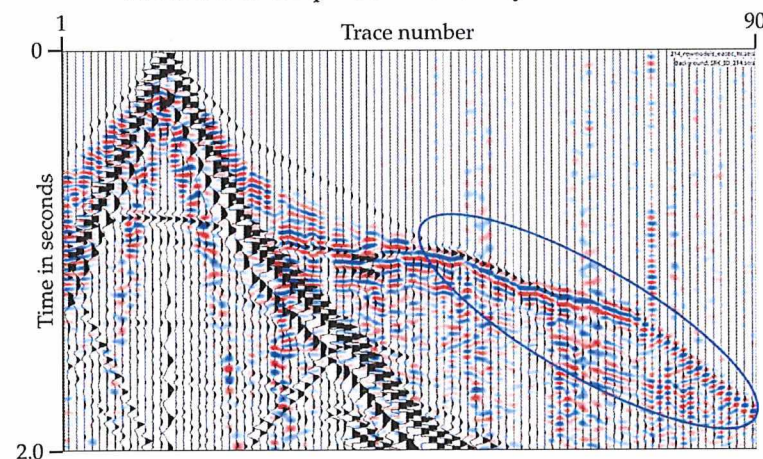
Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 28
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	64213000				HF	PH	0002	00	



(a) Field data comparison with isotropic synthetic data.



(b) Field data comparison with VTI synthetic data.



(c) Field data comparison with TTI synthetic data.

Abbildung 10: Vergleich der Felddaten (im Hintergrund in rot-blau-Skala) und der synthetischen Daten (im Vordergrund in schwarz). Beide Datensätze sind spurweise normalisiert. Die erste Spur entspricht einem Offset von -1370 m und die letzte einem Offset von 5230 m. Blaue Kreise markieren Bereiche mit guter Übereinstimmung.

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 29

5.1.2 Implementierung der anisotropen Wellengleichungen in 3D

Um die 3D-Wellenausbreitung in anisotropen Medien mit komplexen Strukturen untersuchen zu können, wurde im Rahmen einer Masterarbeit ein neuer Algorithmus in den bereits bestehenden Code IFOS3D implementiert. Die Implementierung erfolgte mit der FD-Methode auf dem sogenannten *Standard Staggered Grid*. Für die Modellierung von Anisotropie ist eine Wellenfeldinterpolation erforderlich. Es wurden zwei Interpolationsoptionen implementiert und verglichen. Neben der verbreiteten Interpolation auf Basis von Sinc-Funktionen wurde die FD-konsistente Interpolation, die in diesem Zusammenhang noch nicht verwendet wurde, implementiert. Die Stabilität des Algorithmus wurde untersucht und verschiedene Modellierungskonfigurationen verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Algorithmus funktioniert. Die FD-konsistente Interpolation scheint stabiler zu sein als die Sinc-Funktionsinterpolation und erfordert dazu eine niedrigere räumliche FD-Ordnung. Bei gleicher Ordnung ergeben sich Laufzeiten, die im TTI-Fall um ca. Faktor 7 größer sind als im isotropen und im VTI-Fall.

Abbildung 11 zeigt Wellenfelder in einer Ebene (*Crossline*) der dreidimensionalen räumlichen Wellenausbreitung für ein elastisches und zwei anisotrope Medien. Es wurde ein homogenes Modell mit den Dimensionen 600 m x 600 m x 600 m und 1 m Gitterpunkt Abstand verwendet. Die elastischen Parameter wurden mit $v_P = 5000$ m/s, $v_S = 3000$ m/s und $\rho = 2000$ kg/m³ gewählt. Für das VTI-Modell wurden $\epsilon = 0,26$, $\gamma = 0,07$ und $\delta = -0,05$ verwendet, für das TTI-Modell zusätzlich $\theta = 30^\circ$ und $\phi = 20^\circ$. Die Simulation erfolgte mit einem Ricker-Signal mit einer Zentralfrequenz von $f_C = 100$ Hz, einer Quelle im Zentrum des Modells und Empfängern ringsum.

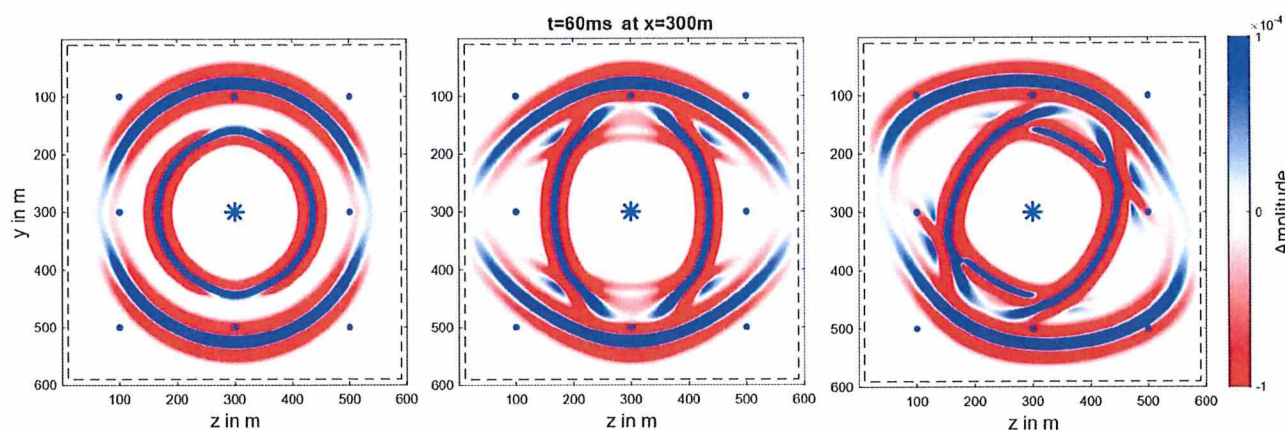


Abbildung 11: Wellenausbreitung für ein homogenes elastisches Modell sowie für VTI- und TTI-Modelle. Der blaue Stern zeigt die Position der Quelle, die blauen Punkte die Positionen von Empfängern.

5.1.3 Code-Entwicklungen

Zur Umsetzung der 3D-FWI mit Felddaten wurden mehrere Ergänzungen in die Software IFOS3D [18] implementiert. Unter anderem wurde eine Option zur Nutzung der akustischen Wellengleichung ergänzt und damit einhergehend die Verwendung von Druckempfängern in der Inversion. Dies ermöglicht eine deutliche Reduzierung der Rechenzeit im Vergleich zur elastischen Modellierung.

Des weiteren wurde eine automatische Schuss-Parallelisierung implementiert. Wenn genügend MPI-Prozesse vorhanden sind, können mehrere Schüsse parallel modelliert werden. Wenn beispielsweise

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 30
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	64213000				HF	PH	0002	00	

192 Kerne verfügbar sind und die Gebietszerlegung des Modells $4 \times 6 \times 4 = 96$ Prozesse ergibt, werden automatisch 2 Schüsse parallel gerechnet.

Um Rechenzeit zu sparen, aber dennoch die große Anzahl verfügbarer Daten nutzen zu können, wurde eine Option zur zufälligen Schussauswahl hinzugefügt. Damit kann pro Iteration nur ein kleiner Teil der Schüsse verwendet werden, durch die zufällige Wahl dieser kann aber im Verlauf des Inversionsprozesses trotzdem eine dichte Überdeckung des Messgebietes und ein gleichmäßiger Beitrag aller Daten zum Modell-Update erreicht werden. Auf Grund der unterschiedlichen Empfängerzahlen pro Schuss in den Felddaten wurde auch eine Option, dies zu handhaben, zur Software hinzugefügt.

Eine weitere Ergänzung ist die Möglichkeit der Gradientenglättung. Üblicherweise können so kleinere Artefakte reduziert werden, die sich aus der Akquisitionsgeometrie ergeben. Die Gradienten sind am stärksten nahe der Quellen und Empfänger und sind daher meist als Abdruck im Gesamtgradienten sichtbar. Durch die Glättung kann dieser Effekt reduziert werden.

Die Quellsignalinversion (*Source Time Function Inversion* – STFI) wurde implementiert, um die unabhängige Inversion des Quellsignals und einen Vergleich mit dem aus der Prozessierung abgeleiteten Wavelet zu ermöglichen. Durch die Einspeisung des Quellsignals in den FD-Algorithmus findet eine Ableitung der Signatur statt. Um dem entgegenzuwirken, wurde die Option der Signalintegration eingefügt. Damit sind die modellierten Daten mit den Felddaten bei Verwendung des passenden Wavelets besser vergleichbar. Die Integration wird aus Stabilitätsgründen im Zeitbereich durchgeführt. Außerdem wurde die Quellsignalinterpolation im Code ermöglicht, um das für die Modellierung nötige Abtastintervall zu erhalten. Auch ein möglicherweise nötiges Auffüllen der Daten wurde ergänzt. Es sind im Code verschiedene Interpolationsmethoden verfügbar, standardmäßig wird die Sinc-Methode verwendet. Gleichmaßen wurde die Seismogramm-Interpolation ermöglicht. Wenn die beobachteten Daten nicht das gleiche Abtastintervall besitzen wie die modellierten, erfolgt die Interpolation der Daten, bevor die Residuen berechnet werden.

Zur Auswahl eines Zeitfensters und *Offset*-Bereiches der Daten für die Inversion wurde eine entsprechende Option im Code ergänzt. Auf jede Spur wird ein Zeitfenster angewendet, das durch eine Start- und Endzeit definiert ist. Es wird eine Datei pro Schuss vorgegeben und über zusätzliche Dateien können unterschiedliche Fenster in jedem Inversionsschritt verwendet werden. Die Zeitfensterung erfolgt über einen exponentiellen oder einen Sinus-Taper.

Um die Amplitudenabnahme mit der Entfernung zur Quelle auszugleichen und damit einen ausgewogenen Beitrag aller Daten zu gewährleisten, wurde eine Option zur Datennormierung implementiert.

5.2 Pre-Stack-Tiefenmigration

Die fokussierende Pre-Stack-Tiefenmigration hat ihre erwiesenen Vorteile bei geringüberdeckten Daten im Kristallin, ihre Anwendung und Überlegenheit auf hochüberdeckte 3D-Daten im sedimentären Umfeld ist jedoch noch zu beweisen. Bei der Standard Kirchhoff-Pre-Stack-Tiefenmigration (KPSDM) wird das Wellenfeld entlang der gesamten Zweiweglaufzeit-Isochrone abgebildet, d.h. auch in solche Bereiche des Untergrundes, aus denen das Wellenfeld gar nicht zurück an die Erdoberfläche reflektiert wurde. Dies führt zu verstärktem Migrationsrauschen und unter Umständen zu einer schlechten Abbildung von steil stehenden Strukturen. Bei der Fresnel-Volumen-Migration [19] wird das Wellenfeld entlang der Zweiweglaufzeit-Isochrone nur an die Stellen abgebildet, die am eigentlichen Reflexionspunkt liegen, d.h. es erfolgt eine fokussierende Abbildung in die relevanten Bereiche des Untergrundes (12). Dazu wird die Auftauchrichtung des Wellenfeldes am Empfänger berechnet und mit dessen Hilfe eine Beschränkung auf das Fresnel-Volumen im Bereich der Zweiweglaufzeit-Isochrone durchgeführt.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 31

Durch dieses Vorgehen wird das Migrationsrauschen deutlich verringert, und es können steil stehende Strukturen (z.B. Salzstockflanken) ohne a-priori Information über die Neigung der Strukturelemente sehr gut abgebildet werden. Die Fresnel-Volumen-Migration wurde in den vergangenen Jahren in zwei Richtungen weiterentwickelt:

a) Kohärenz-Migration [20, 21]: Bei dieser Art der fokussierenden Pre-Stack-Tiefenmigration ist kein explizites Ray-Tracing nötig und die Beschränkung auf die Isochrone erfolgt durch rein kinematische Betrachtung der „Ähnlichkeit“ benachbarter Seismogramme bzw. der Kohärenz des reflektierten Wellenfeldes.

b) Die Fresnel-Volumen-Migration und die Kohärenz-Migration wurden kombiniert zur „Kohärenz-basierten Fresnel-Volumen-Migration“ [20]. Dabei werden die vorteilhaften Eigenschaften beider Verfahren hinsichtlich Rechenzeit/Effizienz und Robustheit kombiniert und die Fokussierungseigenschaften noch einmal signifikant erhöht. Alle diese fokussierenden Pre-Stack-Tiefenmigrationsverfahren werden im Projekt wie oben beschrieben weiterentwickelt und am Asse 3D-Datensatz getestet.

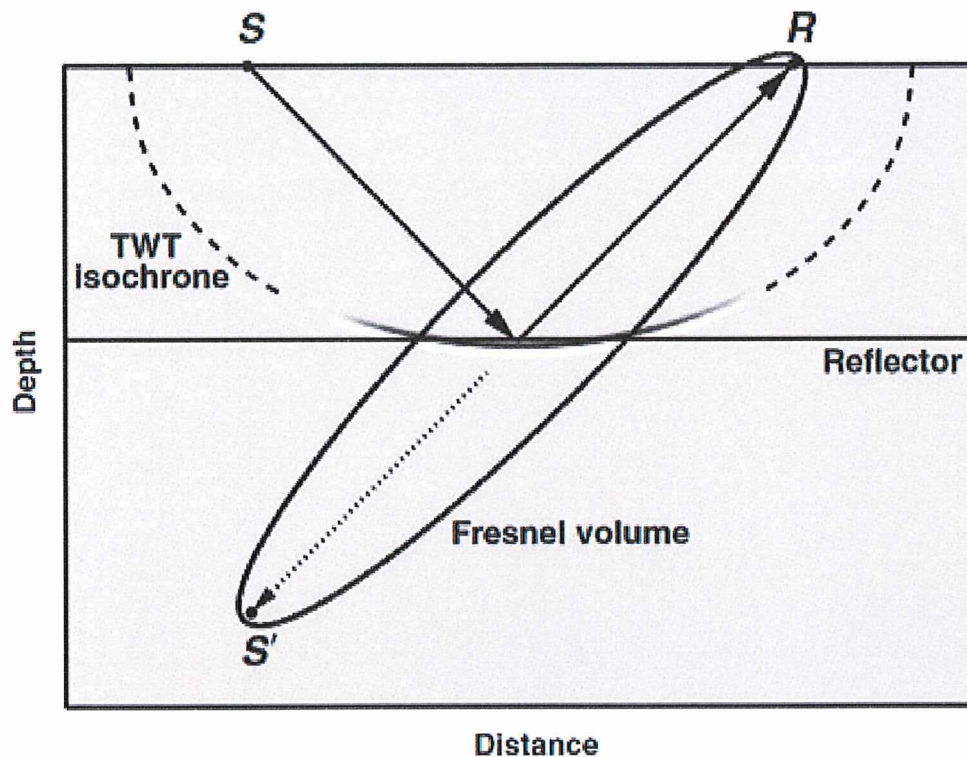


Abbildung 12: Prinzip der FVM [19].

5.2.1 Synthetische Tests der Migrationssoftware

Zunächst erfolgte eine ausführliche Einarbeitung in die hauseigene Software für die FD-Simulation und die Migration. Der Fokus lag dabei auf dem Aufbau der Quellcodes sowie der Nutzung der Programme. Die FD-Simulationssoftware wurde zur Berechnung von synthetischen Seismogrammsektionen für einfache Modelle genutzt, an denen die implementierten Varianten der Pre-Stack-Tiefenmigration (Kirchhoff-Migration, Fresnel-Volumen-Migration) validiert werden konnten. Dazu wurde ein 1-Reflektor-Modell gewählt, in dem beide Schichten (oberhalb und unterhalb des einzelnen Reflektors) jeweils homogene Parameter aufweisen. Ziel war die korrekte Abbildung der Tiefe des Reflektors. Die aus der

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 32

FD-Simulation erhaltenen Seismogramme wurden vor der Verwendung in der Migration vorbereitet (pre-prozessiert), unter anderem durch Entfernen aller nicht-reflektiven Anteile im Wellenfeld. Dafür wurde neben dem 1-Reflektor-Modell ein homogenes Modell mit den Parametern der oberen Schicht simuliert, sodass im ersten Schritt durch Subtraktion der Seismogrammsektionen des homogenen Modells vom 1-Reflektor-Modell die direkten Einsätze entfernt werden konnten. Anschließend wurden multiple und refraktierte Welleneinsätze in der Seismogrammsektion durch einfaches Muting entfernt. Zum Abschluss wurden die Daten um einen konstanten Zeitbetrag verschoben, da das für die Simulation verwendete Quellsignal nicht bei $t = 0$ s beginnt. Für das 1-Reflektor-Modell wurden zunächst eine Seismogrammsektion unter Annahme von isotroper Wellenausbreitung mit der 2D-Variante der FD-Simulationssoftware und den folgenden Parametern berechnet (Tabelle 2).

Tabelle 2: Modellparameter der 2D-FD-Simulation zur Validierung der Kirchhoff-Migration für das 1-Reflektor-Modell (isotroper Fall). F. = Formation.

Parameter	Wert
Anzahl Gitterpunkte (x, z)	7500, 2000
Reflektortiefe [m]	1000
P-Wellengeschwindigkeit [m/s] (F.1 / F.2)	2700 / 4300
Dichte [g/cm ³] (F.1 / F.2)	2.2 / 2.6
ϵ (Thomsen-Parameter) (F.1 / F.2)	0.0 / 0.0
δ (Thomsen-Parameter) (F.1 / F.2)	0.0 / 0.0

Für die anschließende Kirchhoff-Pre-Stack-Tiefenmigration wurde eine konstante Geschwindigkeit gewählt, die der oberen Schicht des Modells entspricht, da der reflektierte Strahl auf dem Weg von der Quelle über den Reflektor zum Empfänger lediglich diesen Bereich durchläuft. Die Laufzeiten für die Migration wurden mit einem FD-Eikonalgleichungslöser für isotrope Medien berechnet [22]. Das Ergebnis der Kirchhoff-Pre-Stack-Tiefenmigration zeigt eine korrekte Abbildung des Reflektors in 1 km Tiefe (Abbildung 13).

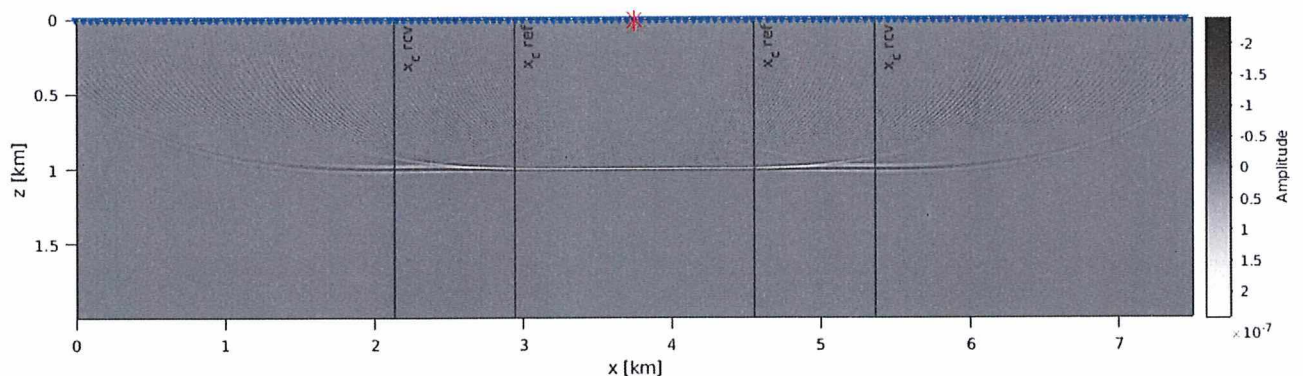


Abbildung 13: Ergebnis der Kirchhoff-Pre-Stack-Tiefenmigration für Seismogrammsektion aus 2D-FD-Simulation für isotropes 1-Reflektor-Modell. Blaue Dreiecke = Empfänger. Roter Stern = Quelle. x_c ref = kritische Entfernung, ab der refraktierte Wellen am Reflektor entstehen. x_c rcv = Entfernung, ab der refraktierte Wellen von Empfängern registriert werden.

Im zweiten Fall wurde ein anisotropes Modell untersucht. Dazu wurde die 3D-Variante der FD-Simulationssoftware verwendet und das obige 2D-Modell in einer 3D-Variante, wobei die identischen

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 33

Parameter des 2D-Falls (Tabelle 3) verwendet und zusätzlich eine Ausdehnung in y-Richtung (senkrecht zur x-z-Ebene) von einem Gitterpunkt gewählt wurden. Da bei der Betrachtung eines Schnittes aus dem 3D-Volumen in der x-z-Ebene das gleiche Ergebnis wie im 2D-Fall vorliegt, wurde mit dem anisotropen Modell und den folgenden Parametern fortgefahren (Tabelle 3). Die Thomsen-Parameter sind über das gesamte Modell konstant und entsprechen zum Zeitpunkt der Erstellung realistischen, repräsentativen Abschätzungen für den Untergrund im Bereich der Asse 3D-Seismik-Messung.

Tabelle 3: Modellparameter der 3D-FD-Simulation zur Validierung der Kirchhoff-Migration für 1-Reflektor-Modell (anisotroper Fall). F. = Formation.

Parameter	Wert
Anzahl Gitterpunkte (x, y, z)	7500, 1, 2000
Reflektortiefe [m]	1000
P-Wellengeschwindigkeit [m/s] (F.1 / F.2)	2700 / 4300
Dichte [g/cm3] (F.1 / F.2)	2.2 / 2.6
ϵ (Thomsen-Parameter) (F.1 / F.2)	0.03 / 0.03
δ (Thomsen-Parameter) (F.1 / F.2)	0.045 / 0.045

Für den anisotropen Fall wurden die Laufzeiten für die Migration mit einem auf der Fast-Marching-Methode basierenden Lösung der anisotropen Eikonalgleichung berechnet [23]. Dabei wurden die gleichen Thomsen-Parameter sowie P-Wellengeschwindigkeiten wie im Ausgangsmodell der FD-Simulation verwendet. Im Ergebnis ist der Reflektor im Bereich unterhalb der Quellposition deutlich und in der richtigen Tiefe abgebildet (Abbildung 14). In den Randbereichen sind jedoch Artefakte sowie niederfrequente Anteile bedingt durch refraktierte Welleneinsätze zu erkennen.

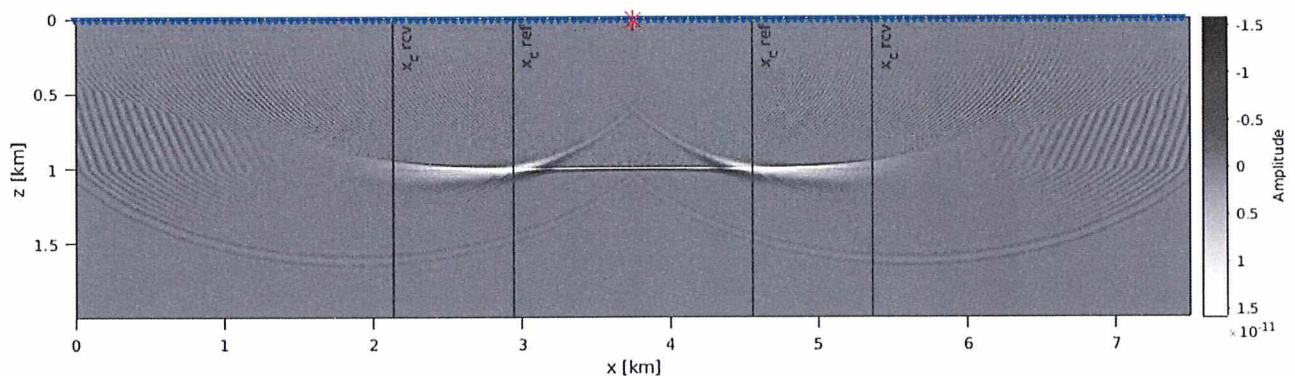


Abbildung 14: Ergebnis der Kirchhoff-Pre-Stack-Tiefenmigration für Seismogrammsektion aus 3D-FD-Simulation für anisotropes 1-Reflektor-Modell.

Zur Untersuchung dieser störenden Effekte wurden verschiedene Tests durchgeführt, um das Abbild des Reflektors zu verbessern. Im ersten Ansatz wurde die Migration nur mit Empfängern durchgeführt, die einen unterkritischen Quell-Empfänger-Abstand aufweisen. Dadurch wurde der Großteil der niederfrequenten Anteile entfernt, jedoch wird der abgebildete Bereich entlang des Reflektors beschränkt. Im zweiten Ansatz wurde genutzt, dass bei homogenen Geschwindigkeitsmodellen keine Refraktionen auftreten. Die Migration wurde daher mit Laufzeiten aus einem homogenen Geschwindigkeitsmodell mit der Geschwindigkeit der oberen Schicht durchgeführt. Dadurch verschwinden die refraktierten

**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Blatt: 34

Im nächsten Schritt wurden die Änderungen der Fresnel-Volumen-Migrationssoftware zur anisotropen Laufzeitberechnung und der Einbeziehung der Dämpfung implementiert. Das Konzept der Fresnel-Volumen-Migration (FVM) beinhaltet das Ray-Tracing eines Strahls vom Empfängerpunkt mit einem aus der Auftauchrichtung am Empfängerpunkt abgeschätzten Strahlrichtung sowie die Berechnung des Fresnel-Volumens um diesen Strahl, welches zur Gewichtung des Wellenfeldbeitrags am jeweiligen Imagepunkt genutzt wird. Die Strahlausbreitung erfolgt in der aktuellen isotropen Version der FVM entsprechend ebenfalls in isotroper Form. Um beurteilen zu können, ob diese Strahlausbreitung innerhalb der FVM-Software auch auf den anisotropen Fall angepasst werden muss, wurde eine Abschätzung für die Abweichung der Fresnel-Volumen im isotropen und anisotropen Fall durchgeführt. Dafür wurden die Laufzeiten in einem Modell mit homogener P-Wellengeschwindigkeit (2700 m/s) und homogenen Thomsen-Parametern ($\epsilon = 0,15$, $\delta = 0,1$) berechnet. Das Fresnel-Volumen wird um den Strahl berechnet, welcher in diesem Fall den Empfänger mit den Spiegelpunkt der Quelle im Untergrund verbindet. Daher wurden für den jeweils isotropen und anisotropen Fall zwei Laufzeitberechnungen mit dem oben beschriebenen anisotropen FD-Eikonalgleichungslöser vorgenommen, zum einen für den Empfängerpunkt und zum anderen für den gespiegelten Quellpunkt. Zur Berechnung der Zwei-Wege-Laufzeit werden diese beiden Laufzeitfelder für den isotropen und anisotropen Fall addiert. Das Fresnel-Volumen (erster Ordnung) wird nun definiert durch die Isolinie des Minimums der Zwei-Wege-Laufzeit addiert mit einem frequenzabhängigen Wert. Im Vergleich zeigt sich, dass die beiden Fresnel-Volumina sich in der Größe kaum unterscheiden (Abbildung 16), d.h. auch der zur Wichtung verwendete Fresnel-Radius sich im isotropen Fall nicht signifikant vom hier verwendeten anisotropen Fall unterscheidet. Daraus folgt, dass für anisotrope Medien keine die Rechenzeit deutlich erhöhende Anpassung einer anisotropen Berechnung der Fresnel-Volumina notwendig ist.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 35

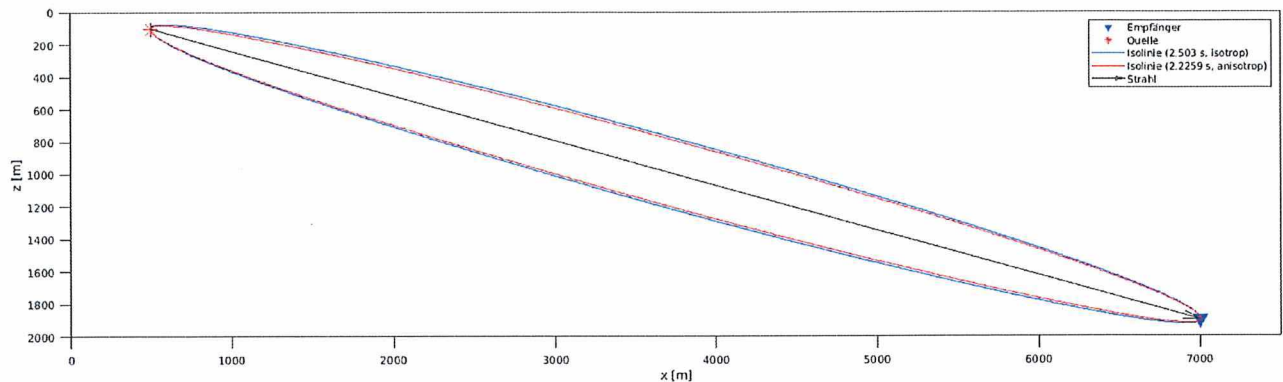


Abbildung 16: Darstellung der Fresnel-Volumina für eine isotrope bzw. anisotrope Laufzeitberechnung.

5.2.2 Synthetische Tests der Laufzeitberechnung

Zur Berücksichtigung der Dämpfung in der Migrationssoftware wurde zunächst ein Konzept für den Einbau eines Operators in das Migrationsintegral erstellt. Dieses beruht auf Ansätzen ähnlicher Arbeiten [24, 25]. Der Grundgedanke ist es, die Dämpfung durch einen zusätzlichen Gewichtungsfaktor im Kirchhoff-Integral zu berücksichtigen (Abschnitt 5.2.3).

Entscheidend für diesen Ansatz ist die Berechnung der sogenannten Kompensationslaufzeit T^* , von der der Gewichtungsfaktor für die Dämpfung maßgeblich abhängt (Gleichung 24). Die Kompensationslaufzeit entspricht dabei einer Integration entlang des Strahlweges, also im numerischen Sinne einer Summation von Laufzeiten entlang von Strahlsegmenten. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Algorithmen zur Berechnung der Kompensationslaufzeit wurde eine Abwägung zwischen einem FD-Eikonalgleichungslöser basierend auf der Fast-Marching-Methode, einem strahlseismischen Ansatz basierend auf einem Wellenfrontenkonstruktionsverfahren (WFC) und der direkten Berechnung in der Migration vorgenommen. Aus diesen Möglichkeiten wurde das WFC-Verfahren als das am besten geeignete gewählt. Es bietet die Möglichkeit, mit dem gleichen Programm sowohl die anisotropen Laufzeiten als auch die geometrische Amplitudenabnahme der seismischen Welle sowie die Kompensationslaufzeiten für die Migration zu berechnen. Aus diesem Grund erfolgte zunächst eine Einarbeitung in die WFC-Software. Anschließend wurde die Berechnung der Kompensationslaufzeit implementiert sowie die Möglichkeit zum Einladen des dafür benötigten Feldes des Qualitätsfaktors (Q) geschaffen. Die so erweiterte Software wurde dabei konsistent zu den schon bestehenden Funktionen für die Berechnung von isotropen/anisotropen Laufzeittabellen und des Einladens eines Geschwindigkeitsfeldes konzipiert.

Im nächsten Schritt wurden synthetische Tests mit der erweiterten WFC-Software durchgeführt. Zunächst wurden die Laufzeiten für ein konstantes Geschwindigkeitsmodell berechnet (Tabelle 4) und mit den Ergebnissen des FD-Eikonalgleichungslösers verglichen. Für den homogenen, isotropen Fall stimmen die Laufzeiten der beiden Methoden sehr gut überein.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 36

Tabelle 4: Parameter des homogenes konstanten isotropen Geschwindigkeitsmodell zum Test des WFC-Verfahrens.

Parameter	Wert
Input: Anzahl Gitterpunkte (nx, ny, nz)	760, 21, 301
Input: Gitterpunktabstand (dx, dy, dz)	10, 100, 10
Output: Anzahl Gitterpunkte (nx, ny, nz)	760, 3, 301
Output: Gitterpunktabstand (dx, dy, dz)	10, 100, 10
Quellposition (x, z) [m]	3800, 0
P-Wellengeschwindigkeit [m/s]	4000
P-Wellendämpfung	1
ϵ (Thomsen-Parameter)	0.0
δ (Thomsen-Parameter)	0.0

Im zweiten Schritt wurde ein anisotropes (VTI) Modell untersucht ($\epsilon = 0,15$, $\delta = 0,1$), die restlichen Parameter blieben unverändert. Das Ergebnis ist in Abbildung 17 dargestellt. Die berechneten Laufzeiten der beiden Verfahren stimmen dabei nicht in allen Ausbreitungsrichtungen exakt miteinander überein, was an der bei der FD-Eikonalgleichungslösung verwendeten Approximation liegt. Die mit der WFC-Software berechneten Laufzeiten wurden mit einer analytischen Lösung verifiziert und im Folgenden für die Migration der anisotropen Modelle verwendet.

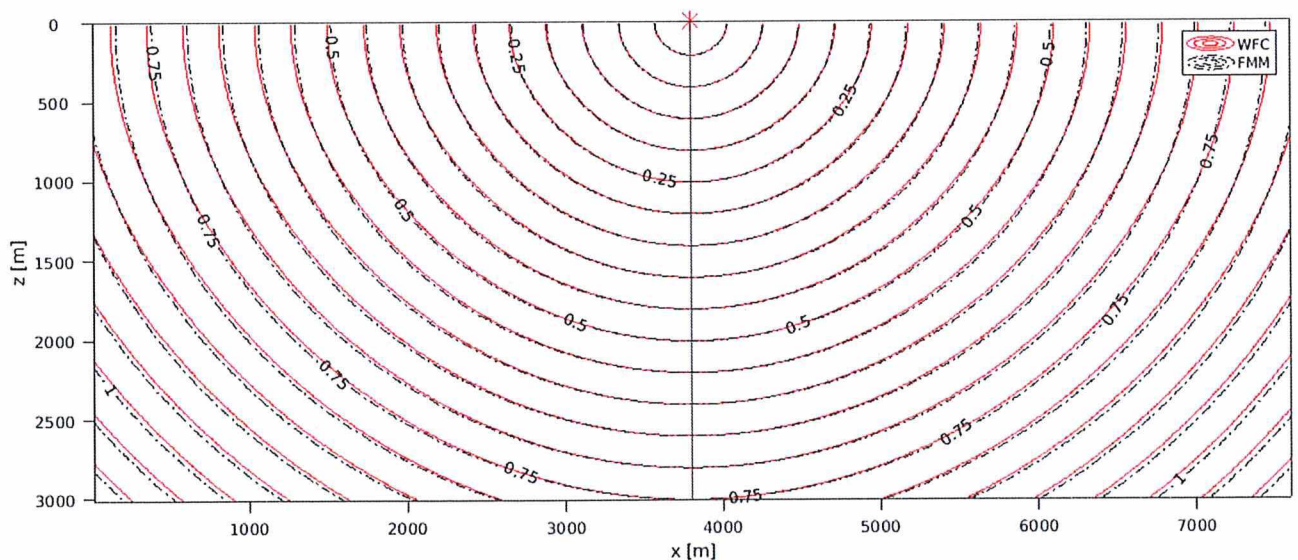


Abbildung 17: Laufzeit-Isochronen berechnet mit FD-Eikonalgleichungslösung (FMM) und Wellenfrontenkonstruktionsverfahren (WFC) für ein anisotropes (VTI) Modell.

Im nächsten Schritt wurde das vom KIT erstellte isotrope Asse-2D-Modell verwendet. Dazu wurde der Gitterpunktabstand in x- und z-Richtung von 1 m auf 10 m erhöht, um den Rechenzeit- und Speicherbedarf zu verringern. Das Geschwindigkeitsfeld wurde durch die Anwendung eines gleitenden Mittelwertes geglättet, um die Entstehung von refraktierten Wellen in Bereichen hoher Geschwindigkeitssprünge zu verringern. Das resultierende geglättete Geschwindigkeitsmodell sowie das Ergebnis der Laufzeitberechnung sind in Abbildung 18 dargestellt.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 37

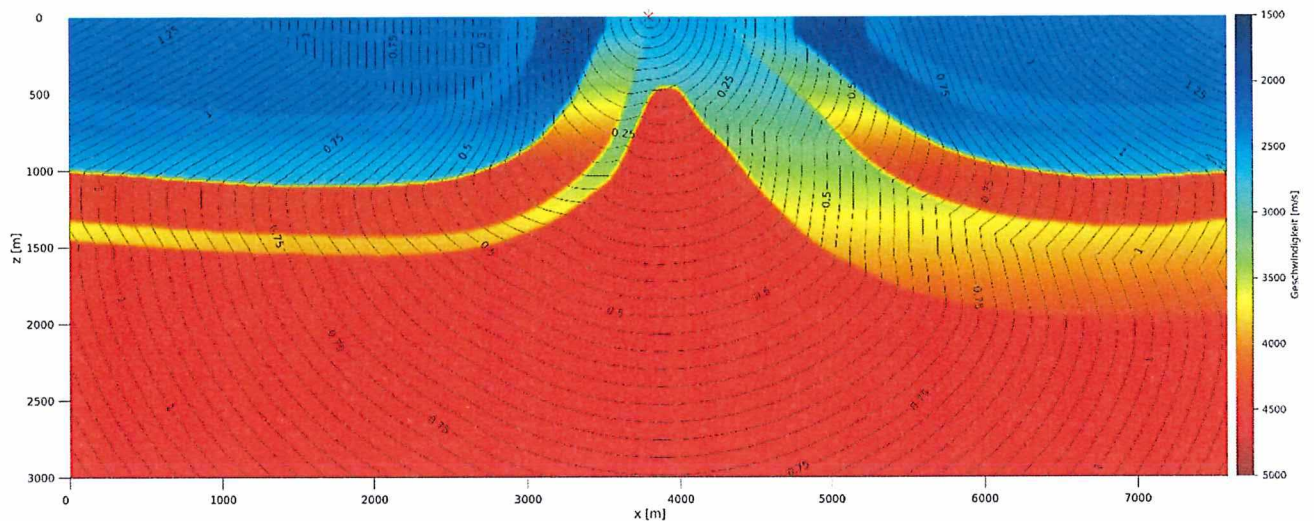


Abbildung 18: Isotropes, geglättetes 2D Asse-Geschwindigkeitsmodell und Laufzeit-Isochronen berechnet mit WFC-Software.

Im Untersuchungsgebiet ist aufgrund der vorliegenden geologischen Situation davon auszugehen, dass die Geschwindigkeiten zum Teil starke Anisotropie aufweisen. Für das Asse-2D-Modell liegen Informationen über die VTI-Thomsen-Parameter (ϵ , δ) vor. Abbildung 19 zeigt einen Vergleich der isotropen und anisotropen (VTI) Laufzeiten für diese beiden Modelle. Aufgrund der Charakteristik der VTI-Anisotropie sind die Laufzeiten in vertikale Richtung unterhalb der Quellposition identisch.

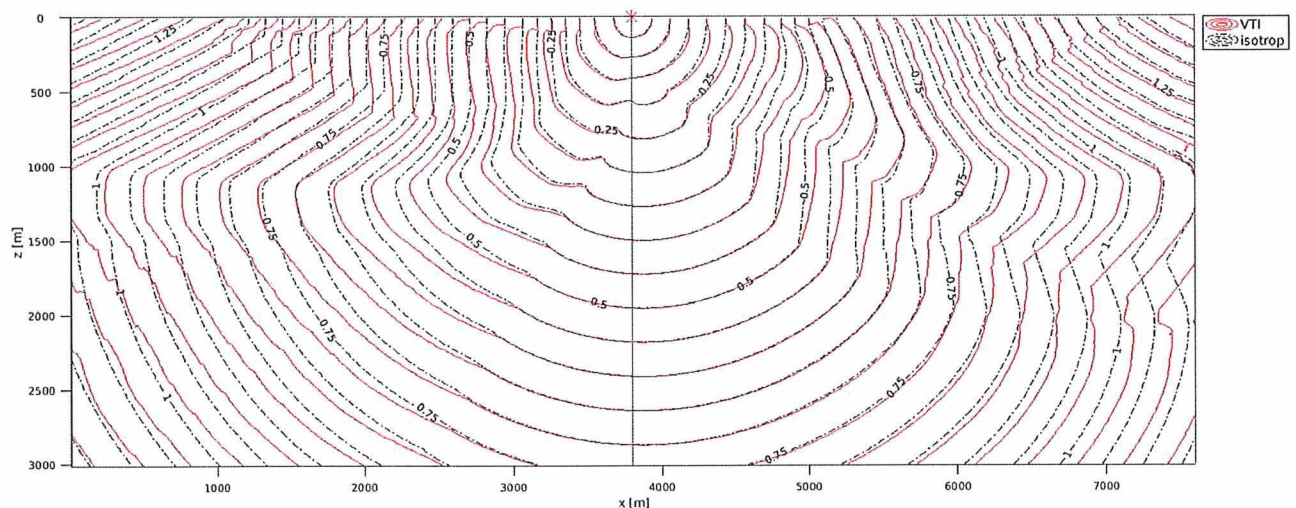


Abbildung 19: Vergleich der Laufzeit-Isochronen bei Isotropie und VTI-Anisotropie für das Asse-2D-Modell.

Abbildung 20 zeigt die Differenz der beiden Laufzeitfelder. Die Unterschiede zwischen den Laufzeiten nehmen generell von vertikaler zu horizontaler Ausbreitungsrichtung zu und betragen in manchen Bereichen bis zu 120 ms. Damit würde die Abbildungsqualität der Migration bei Vernachlässigung der Anisotropie stark negativ beeinflusst werden. Die Laufzeitberechnungen für das Asse-2D-Modell unterstreichen, dass für die Migration der realen Daten die Anisotropie auf jeden Fall berücksichtigt werden sollte.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 38

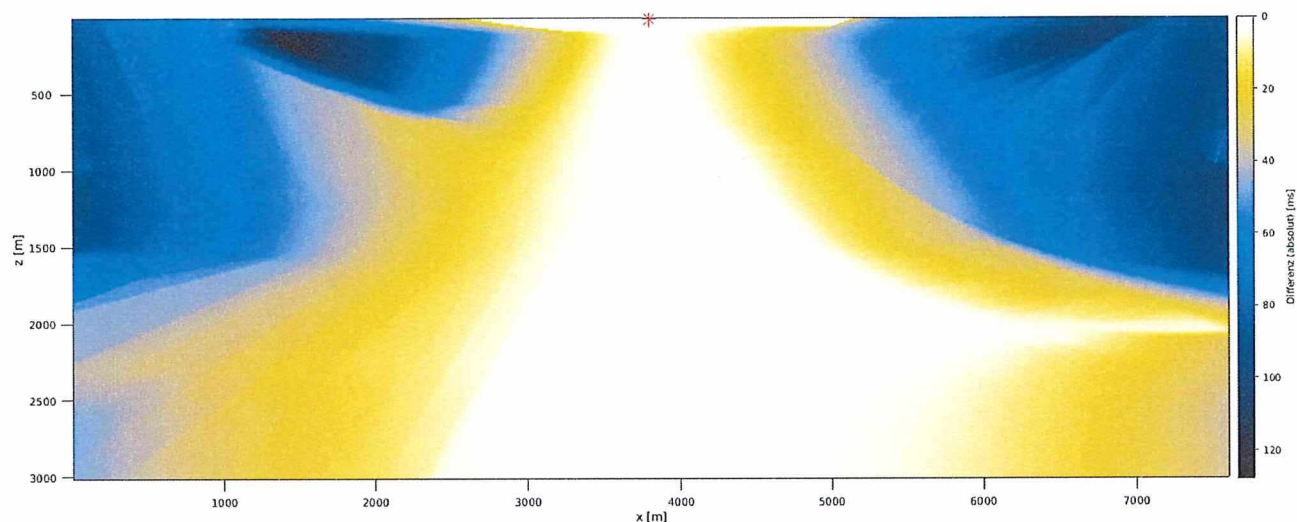
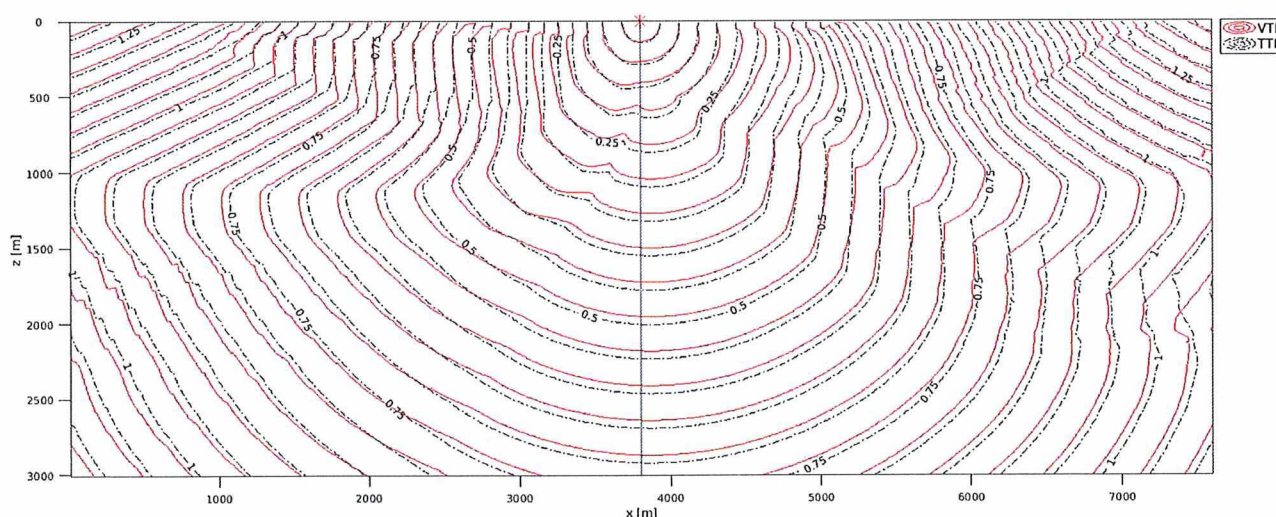


Abbildung 20: Differenz zwischen Laufzeiten für isotropes und anisotropes (VTI) Asse-2D-Modell.

Aufgrund der bisherigen Ergebnisse der seismischen Abbildung im Untersuchungsgebiet ist davon auszugehen, dass die Annahme einer horizontalen Schichtung vor allem in unmittelbarer Nähe des Salzsattels verletzt ist. Daher bezieht die nächste Erweiterung der WFC-Migrationssoftware die Neigung und Inklinatation von Schichten ein, was eine Beschreibung des Untergrundes als 3D TTI-Medium erlaubt. Das Parametermodell für die Neigung liegt für das Asse-2D-Modell vor und wurde zunächst in Winkel und anschließend in Komponenten des Symmetrieachsenvektors umgerechnet, um sie als Eingabe für die WFC-Software verwenden zu können. Abbildung 21 zeigt den Vergleich der Laufzeiten für den VTI- bzw. TTI-Fall. Da im untersuchten Asse-2D-Modell Neigungen von bis zu 60° entlang der Salzflanken angenommen werden, zeigen die Laufzeiten vor allem in diesen Bereichen deutliche Unterschiede.



Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 39

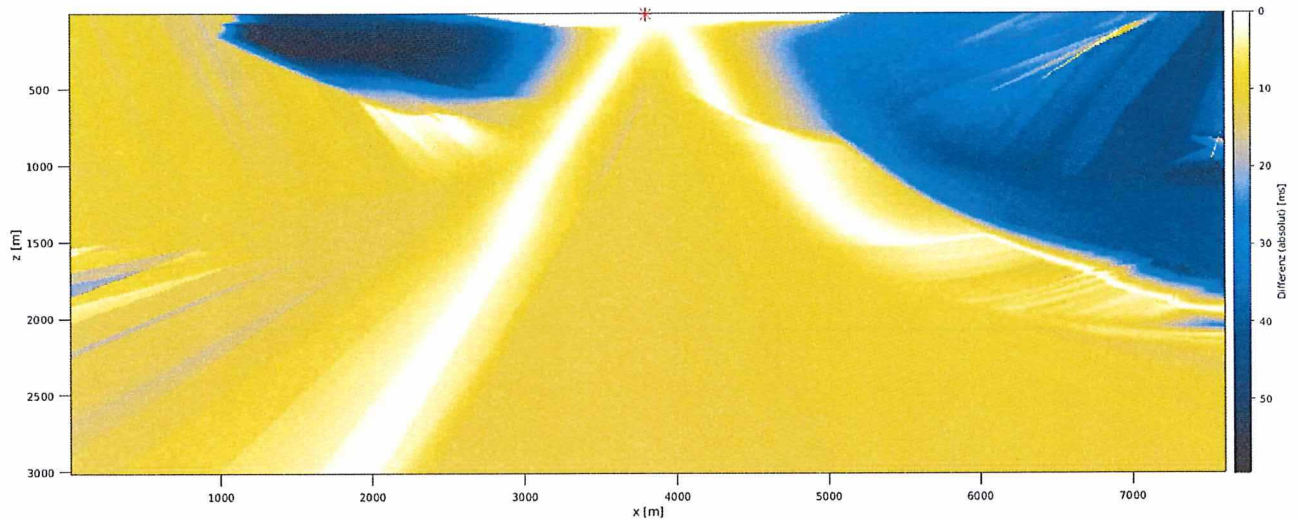


Abbildung 22: Differenz zwischen Laufzeiten für VTI- und TTI-Anisotropie für das Asse-2D-Modell.

Die synthetischen Berechnungen mit dem 2D-Asse-Modell deuten darauf hin, dass für eine optimale Abbildung der komplexen Strukturen im Bereich der Asse eine Beschreibung als TTI-Medium zu empfehlen ist. Die Laufzeitberechnungen mit der WFC-Software haben gezeigt, dass die Berücksichtigung von Anisotropie zu erheblichen Laufzeitunterschieden führt, die sich auf die Abbildungsqualität der Migration auswirken könnten, wenn sie nicht entsprechend korrekt berücksichtigt würden.

5.2.3 Implementierung der Dämpfung in das Migrationsintegral

Die Weiterentwicklung der fokussierenden Pre-Stack-Tiefenmigration wurde am Beispiel der Fresnel-Volumen-Migration (FVM) durchgeführt und konzentrierte sich auf die Berücksichtigung der Dämpfung mit Hilfe eines zusätzlichen Gewichtungsfaktors im Migrationsintegral. In rein elastischen Medien nimmt die seismische Amplitude entlang des Laufwegs nur auf Grund der geometrischen Verteilung ab. In anelastischen Medien tritt zusätzlich intrinsische Dämpfung auf, die zu einer generellen Amplitudenabnahme bei gleichzeitiger Änderung der Wellenform des Wavelets führen [25]. Die Dämpfung wird durch den dimensionslosen Materialparameter Q beschrieben. Dieser stellt ein Maß für die Anelastizität eines Mediums dar. Wird ein Volumen eines Materials periodisch mit einer Frequenz ω unter Spannung gesetzt, so wird Q definiert als [26]:

$$\frac{1}{Q(\omega)} = \frac{-\Delta E}{2\pi E} \quad (15)$$

E ist die maximale Dehnungsenergie, die im betrachteten Volumen gespeichert ist, und $-\Delta E$ bezeichnet die Energie, die pro Zyklus auf Grund der Dämpfung verloren geht. Betrachtet man eine ebene Welle mit einem Impuls der Form $\delta(t - x/c)$, die sich mit der Phasengeschwindigkeit c in positiver x -Richtung ausbreitet, lassen sich Rückschlüsse über das Wellenverhalten in einem Medium ziehen. In einem elastischen, homogenen Medium breiten sich alle Frequenzanteile des Wavelets mit der gleichen Geschwindigkeit c aus, so dass die Welle ihre Wellenform beibehält. In dämpfenden Medien, unter der Annahme eines konstanten Q über den betrachteten Frequenzbereich, erfährt jede Frequenz des Impulses eine Dämpfung um den Faktor $\exp[-\alpha(\omega)x]$. Die Dämpfungsrate ist definiert als $\alpha = \frac{\omega}{2cQ}$:

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 40
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	64213000				HF	PH	0002	00	

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - x/c) \exp[i\omega t] dt = \exp[-\alpha(\omega x)] \exp[i\omega x/c] \quad (16)$$

Damit führt eine Wellenausbreitung in dämpfenden Medien zu Dispersion, d.h. einer frequenzabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeit. Durch einen Ebene-Wellen-Ansatz wird diese Dispersion quantifiziert:

$$\frac{c(\omega_1)}{c(\omega_2)} = 1 + \frac{1}{\pi Q} \log \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right) \quad (17)$$

Die Beschreibung des Verhältnisses der Phasengeschwindigkeit c für zwei Frequenzen ω_1 und ω_2 stellt eine gute Näherung für Dämpfungsgesetze dar, bei denen Q über den betrachteten seismischen Frequenzbereich konstant ist. Die logarithmische Dispersion wird durch Laboruntersuchungen an Gesteinen bestätigt [27].

Durch die Anwendung des Korrespondenzprinzips kann die Wellenausbreitung durch ein viskoelastisches Medium als Wellenausbreitung durch ein elastisches Medium mit komplexer Geschwindigkeit betrachtet werden [28]. Der Ausbreitungsfaktor im elastischen Fall lautet [26]:

$$\exp[i(kx - \omega t)] = \exp[i\omega(x/c - t)] \quad (18)$$

Dieser wird in einem anelastischen Medium ersetzt durch:

$$\exp[i(Kx - \omega t)] = \exp \left[\frac{-\omega x}{2c(\omega)Q(\omega)} \right] \exp \left[i\omega \left(\frac{x}{c(\omega)} - t \right) \right] \quad (19)$$

$$c_e \rightarrow c(\omega) \left(1 - \frac{i}{2Q(\omega)} \right) \quad (20)$$

In der elastischen Lösung ist die Phasengeschwindigkeit frequenzunabhängig. Sie kann als analytische Lösung von c_e aufgefasst werden, so dass gilt $c = c_e$. Die anelastische Lösung ergibt sich durch analytische Fortsetzung und durch das Ersetzen von c_e (Gleichung 20). Unter der Annahme eines effektiv konstanten Q kann das logarithmische Dispersionsgesetz (Gleichung 17) verwendet werden, um die Frequenzabhängigkeit von c zu bestimmen. Zur Betrachtung der Dispersion wird eine Referenzfrequenz ω_0 herangezogen. Bei der Wahl einer Frequenz von 1 Hz ergibt sich $\omega_0 = 2\pi$, und die elastische Wellengeschwindigkeit c_e wird ersetzt durch die komplexe Geschwindigkeit:

$$c_e \rightarrow c(\omega_0) \left[1 + \frac{1}{\pi Q} \log \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) - \frac{i}{2Q} \right] \quad (21)$$

Das Ergebnis ist gültig in erster Ordnung von Q , womit die Voraussetzung $\frac{1}{Q} \ll 1$ berücksichtigt wird. Die Geschwindigkeit $c(\omega_0)$ gibt die Phasengeschwindigkeit bei der Referenzfrequenz ω_0 an.

Durch den Wechsel der Fourier-Konvention und dem damit verbundenen Vorzeichenwechsel ergibt sich der Ausgangspunkt für die Herleitung eines Ansatzes für die Q -korrigierte Pre-Stack-Tiefenmigration (QPSDM) [29], welche in [24] und [25] Anwendung findet:

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 41

$$\mathbf{x} = (x, y, z)$$

$$c(\mathbf{x}) = c_0(\mathbf{x}) \left[1 + \frac{1}{\pi Q(\mathbf{x})} \log \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) + \frac{i}{2Q(\mathbf{x})} \right] \quad (22)$$

Der erste Term beschreibt die kinematische Information über das Wellenfeld und kann durch konventionelle Laufzeitmethoden in einem akustischen Medium bestimmt werden. Der zweite Term enthält einen dispersiven Term, welcher die Kausalität der Lösungen der Wellengleichung gewährleistet. Dieser Term kompensiert die Phasenverzerrung auf Grund von Dispersion. Der Imaginärteil der Geschwindigkeit kompensiert den Amplitudenverlust, der durch exponentielle Dämpfung entlang des Strahlweges verursacht wird [24]. Es lässt sich zeigen, dass bei der Annahme von $\frac{1}{Q} \ll 1$ die Strahlwege unverändert bleiben [29]. Damit beeinflusst die Dämpfung die Wellenform ausschließlich über die frequenzabhängige Laufzeit:

$$T_c(\mathbf{x}) = T(\mathbf{x}) - \frac{1}{\pi} T^*(\mathbf{x}) \log \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) - \frac{i}{2} T^*(\mathbf{x}) \quad (23)$$

Dabei steht $T(\mathbf{x})$ für die Laufzeit in einem akustischen Medium, und die Kompensationslaufzeit $T^*(\mathbf{x})$ ergibt sich aus der Integration entlang des Strahlweges, der die Quellposition $\mathbf{x}_s$ mit der Position $\mathbf{x}$ entlang des Strahls verbindet (Gleichung 24). Die Abhängigkeit von Laufzeit, Amplitude und Wellenform von der Quellposition ist implizit berücksichtigt. Für ein frequenzunabhängiges Q ist der Absorptionskoeffizient α linear proportional zur Frequenz ω . Daher führt eine Zunahme der Frequenz zu einer stärkeren Dämpfung.

$$T^*(\mathbf{x}) = \int_{ray} \frac{1}{Qc_0} ds = \int_{ray} \frac{2\alpha}{\omega} \quad (24)$$

Die Kirchhoff-Pre-Stack-Tiefenmigration (KPSDM) wird durch ein Kirchhoff-Integral beschrieben (Gleichung 25), welches eine Lösung der Wellengleichung darstellt [30]. Dabei entsteht der Wert der Migrationsfunktion an einem Punkt $\mathbf{x}$ im Untergrund durch gewichtete Integration entlang der zum Punkt $\mathbf{x}$ gehörigen Diffraktionsfläche über das zeitlich differenzierte und gewichtete Wellenfeld:

$$V(\mathbf{x}) = -\frac{1}{2\pi} \iint_A f(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s) w(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s) \dot{u}(\mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s) d\mathbf{x}_r d\mathbf{x}_s \quad (25)$$

Durch Nutzung des Korrespondenzprinzips wird das Kirchhoff-Integral übertragen auf eine Hochfrequenzapproximation des Wellenfeldes, das durch ein viskoakustisches Medium läuft (Gleichung 26) [29].

$$V(\mathbf{x}) = \frac{1}{8\pi^3} \iint_A f(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s) w(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s) \left(\int D_a(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s, \omega) \exp(i\omega T) u(\mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s, \omega) i\omega d\omega \right) d\mathbf{x}_r d\mathbf{x}_s \quad (26)$$

Der Migrationsoperator in einem dissipativen Medium weist im Vergleich zum konventionellen Fall ein weiteres Gewicht auf, die sogenannte Anti-Dissipation-Funktion D_a (Gleichung 27) [25]. Diese zusätzliche Funktion hängt ab von der Kompensationslaufzeit T^* , welche wiederum abhängig ist von der Geschwindigkeit, dem Qualitätsfaktor und dem Strahlweg. Dadurch ist sie selbst bei einem konstanten Q -Feld räumlich und zeitlich variabel. Durch Nutzung des Geschwindigkeits- und Qualitätsfaktorfeldes

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 42

werden mit der strahlbasierten WFC-Methode Laufzeittabellen für jeweils T und T^* sowie für alle Schuss- und Empfängerpunkte berechnet.

$$D_a(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s, \omega) = \exp \left[i\omega \left(-\frac{1}{\pi} T^* \log \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) - \frac{i}{2} T^* \right) \right] \quad (27)$$

Die Formel für die QPSDM ist im Frequenzbereich definiert (Gleichung 26). Bei einer direkten Implementierung führt dies zu einem zusätzlichen Rechenaufwand im Vergleich zur konventionellen KPSDM. Der Aufwand erhöht sich um einen Faktor, der der Anzahl der Abtastfrequenzen entspricht [31]. Deswegen wird das Konvolutionstheorem genutzt. Dieses besagt, dass Multiplikation im Frequenzbereich identisch ist mit der Faltung im Zeitbereich. Damit lässt sich schließlich das Migrationsintegral für den Zeitbereich final definieren als (Gleichung 28).

$$V(\mathbf{x}) = \frac{1}{8\pi^3} f(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s) w(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s) D_a(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s, T) * \dot{u}(\mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s) d\mathbf{x}_r d\mathbf{x}_s \quad (28)$$

5.2.4 Implementation und synthetische Verifizierung

In der Implementation wird ausgehend von den zuvor berechneten Laufzeittabellen ein gleichverteilter Bereich von T^* -Werten festgelegt. Dieser wird durch das Minimum und Maximum aller Laufzeiten im Modell begrenzt. Das ermöglicht das Erstellen einer Look-Up-Table für die Anti-Dämpfungsfunktionen $D_a(T^*, \omega)$ in Abhängigkeit von der Frequenz und der Kompensationslaufzeit. Nach anschließender inverser Fouriertransformation liegen die Anti-Dämpfungsfunktionen im Zeitbereich vor ($D_a(T^*, T)$). Im Migrationsalgorithmus werden diese mit der jeweils aktuell betrachteten seismischen Spur gefaltet. Liegt der Wert von T^* am aktuellen Bildpunkt $\mathbf{x}$ zwischen den tabellierten Werten, wird der Samplewert bestimmt aus der Zwei-Wege-Laufzeit und der Interpolation der aus den beiden benachbarten Kompensationslaufzeiten (T_i^*, T_{i+1}^*) berechneten seismischen Spuren (Gleichung 29) [31].

$$a = \frac{T^* - T_i^*}{T_{i+1}^* - T_i^*} \quad (29)$$

$$u(\mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s, T^*) = a \cdot u(\mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s, T_{i+1}) + (1 - a) \cdot u(\mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s, T_i)$$

Der beschriebene Ansatz für die Herleitung der Q-Kompensation (Abschnitt 5.2.3) wurde in das existierende Migrationsprogramm implementiert. Zur Verifizierung wurden synthetische Daten mit einer viskoelastischen FD-Simulationssoftware erzeugt [32], in der das Dämpfungsverhalten des Mediums durch das GSLS-Modell beschrieben wird [33]. Das GSLS-Modell erklärt die experimentellen Beobachtungen der viskoelastischen Wellenausbreitung. Der Vergleich der Dispersionskurve der analytischen Lösung mit den Werten für das GSLS-Modell zeigt eine hohe Übereinstimmung für die in der FD-Simulation gewählten Parameter (Tabelle 5).

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 43

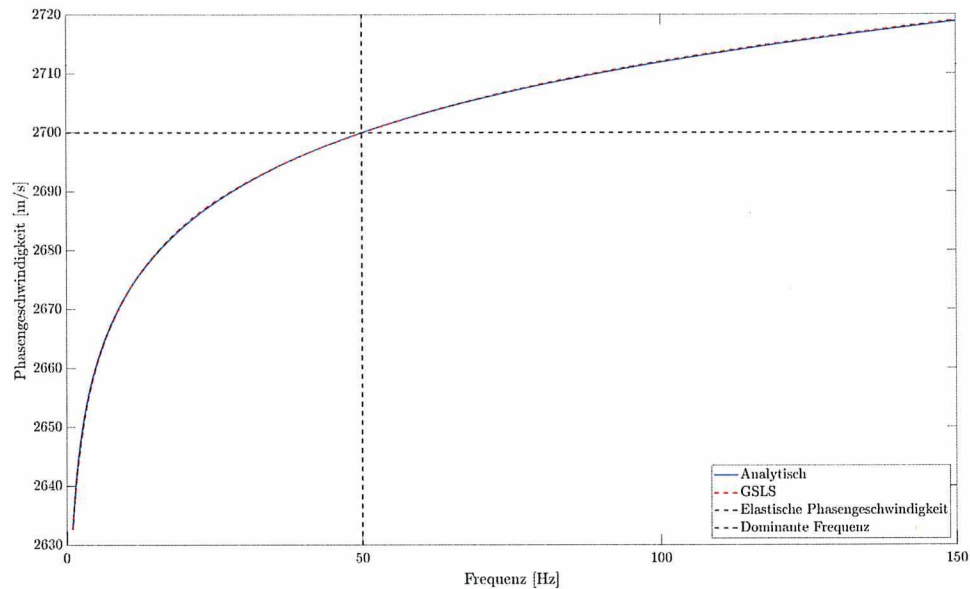


Abbildung 23: Vergleich der Dispersionskurve für $f_{dom} = 50 \text{ Hz}$ und $v_{el} = 2700 \text{ m/s}$.

Der Ansatz für die QPSDM beruht unter anderem auf der Annahme eines frequenzunabhängigen Q . Dafür müssen in Abhängigkeit des gewählten Frequenzbereichs eine geeignete Anzahl L und entsprechende Werte von Relaxationsfrequenzen τ_{ol} , sowie die Hilfsvariable τ bestimmt werden. Die dominante Frequenz des Quellsignals (f_{dom}) wird variiert zwischen 25, 50, 75 und 100 Hz. Deshalb wird für die Bestimmung der Parameter der Frequenzbereich von 1 bis 150 Hz gewählt. Die für die Approximation bestimmten Werte τ und τ_{ol} (Tabelle 5) liefern eine hohe Übereinstimmung mit dem angestrebten Wert von $Q = 50$ über alle gewählten Frequenzen (Abbildung 24).

Tabelle 5: Parameter der (visko-)elastischen FD-Simulation.

Parameter	Wert
Anzahl der Quellen	1
Quellposition [m]	$x = 1000$
Anzahl der Empfänger	39
Empfängerabstand [m]	50
Diskretisierung [m]	1×1
Anzahl der Gitterpunkte	2000×1000
Reflektortiefe [m]	$z = 1000$
Dominante Quellsignalfrequenz [Hz]	25/50/75/100
Q	50
τ [Hz]	0.0186
τ_{ol} [Hz]	-0.36, 1.75, 3.38, 14.54, 56.67, 222.38, 540.44
v_1, v_2 [m/s]	2700, 2700
ρ_1, ρ_2 [kg/m ³]	2200, 2600

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 44

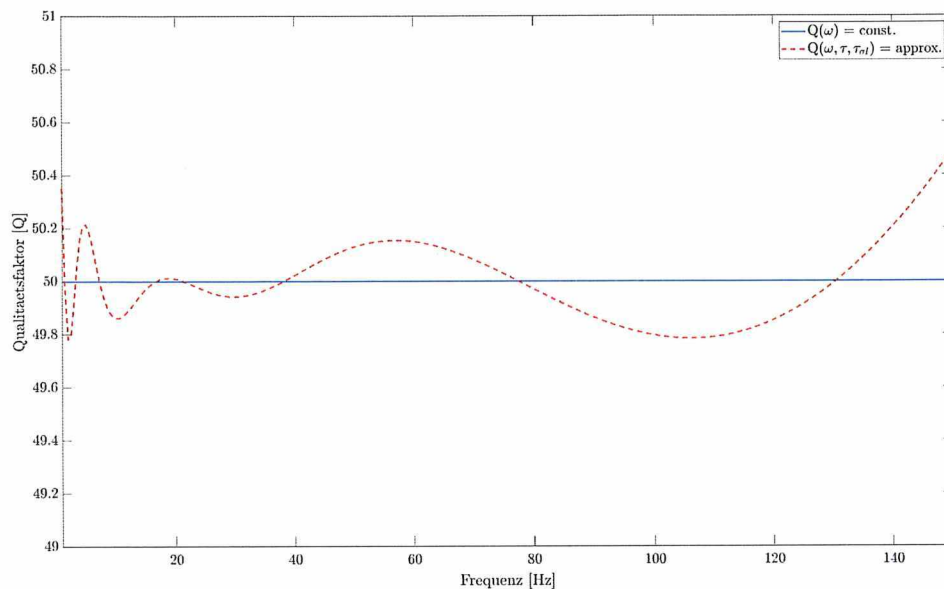
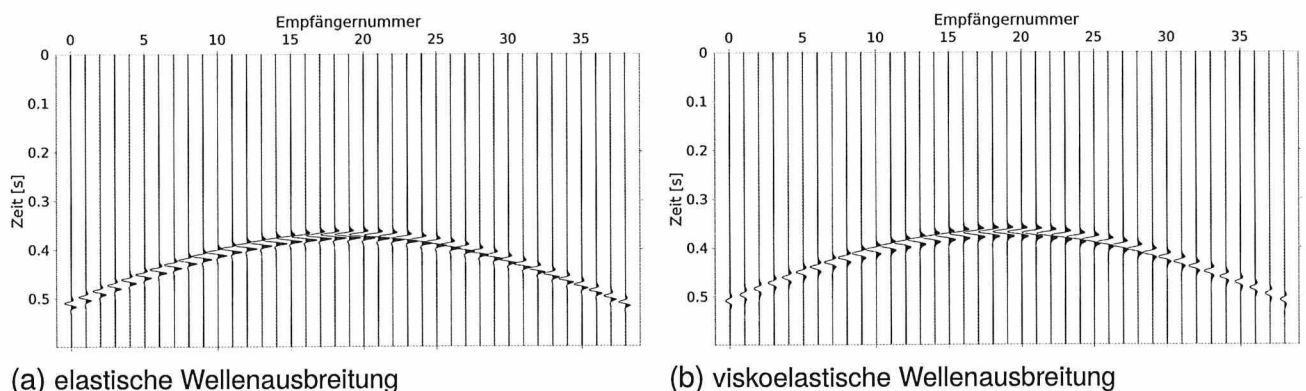


Abbildung 24: Vergleich der Frequenzabhängigkeit zwischen approximiertem Q und konstantem Q.

Der Ansatz für die Anwendung der QPSDM auf synthetische Daten basiert auf dem Vergleich zwischen elastisch und viskoelastisch propagierten Wellenfeldern. Dafür werden zwei Seismogramme für das im vorhergehenden Kapitel beschriebene 1-Reflektormodell erzeugt (Abbildung 25). Das Ziel besteht darin, mit Hilfe der aus der FD-Simulation bekannten Parameter die elastischen Daten durch Q-Kompensation der viskoelastischen Daten zu rekonstruieren. Zur Vereinfachung wird dabei nur die Reflexion des Wellenfeldes an der Schichtgrenze untersucht. Dafür werden jeweils für den (visko-)elastischen Fall zwei Seismogramme bestimmt, eines mit und eines ohne Reflektor. Durch Subtraktion der entsprechenden Seismogramme voneinander bleibt nur die reflektive Energie erhalten. Die scheinbar größere Amplitude der viskoelastischen Daten ist lediglich skalierungsbedingt (Abbildung 25b). Der Einsatz verbreitert sich im Vergleich zur elastischen Simulation und ist aufgrund der stärkeren Dämpfung hoher Frequenzen tieffrequenter.



(a) elastische Wellenausbreitung

(b) viskoelastische Wellenausbreitung

Abbildung 25: Seismogramme aus FD-Simulation mit $f_{dom} = 50$ Hz.

Im zweiten Schritt wird das WFC-Verfahren genutzt, um Laufzeiten T und Kompensationslaufzeiten T^* für alle Schuss- und Empfängerpositionen zu berechnen. Der Impedanzkontrast am Reflektor wird durch einen Dichteunterschied zwischen den beiden Schichten erzeugt. Durch die konstante Geschwindigkeit im ganzen Modell erhält man Laufzeittabellen mit graduell ansteigenden Werten.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 45

Die elastischen Daten wurden zunächst mit der klassischen Kirchhoff-Prestack-Tiefen-Migration (KPSDM) bearbeitet. Die viskoelastischen Daten wurden sowohl mit der KPSDM als auch der QPSDM bearbeitet, um den Effekt der Q-Kompensation besser darstellen zu können. Der Vergleich der Ergebnisse erfolgt daher zwischen diesen drei Migrationsverfahren. Für eine detaillierte Analyse wird das resultierende migrierte Seismogramm an der Stelle der Quellposition ($x = 1000\text{ m}$) betrachtet. Die erfolgreiche Implementierung der QPSDM konnte für alle Quellsignalfrequenzen nachgewiesen werden (Abbildung 26). In allen Fällen liegt eine hohe Übereinstimmung zwischen den elastischen Daten und den Q-korrigierten viskoelastischen Daten vor. Für höhere Frequenzen wären neue Werte für τ und τ_{01} erforderlich, um ein konstantes Q im betrachteten Frequenzbereich sicherzustellen. Die korrekte Wahl des Bereiches lässt sich über das Frequenzspektrum des Quellsignals abschätzen, welches über dessen dominante Frequenz definiert ist ($3 \cdot f_{dom}$).

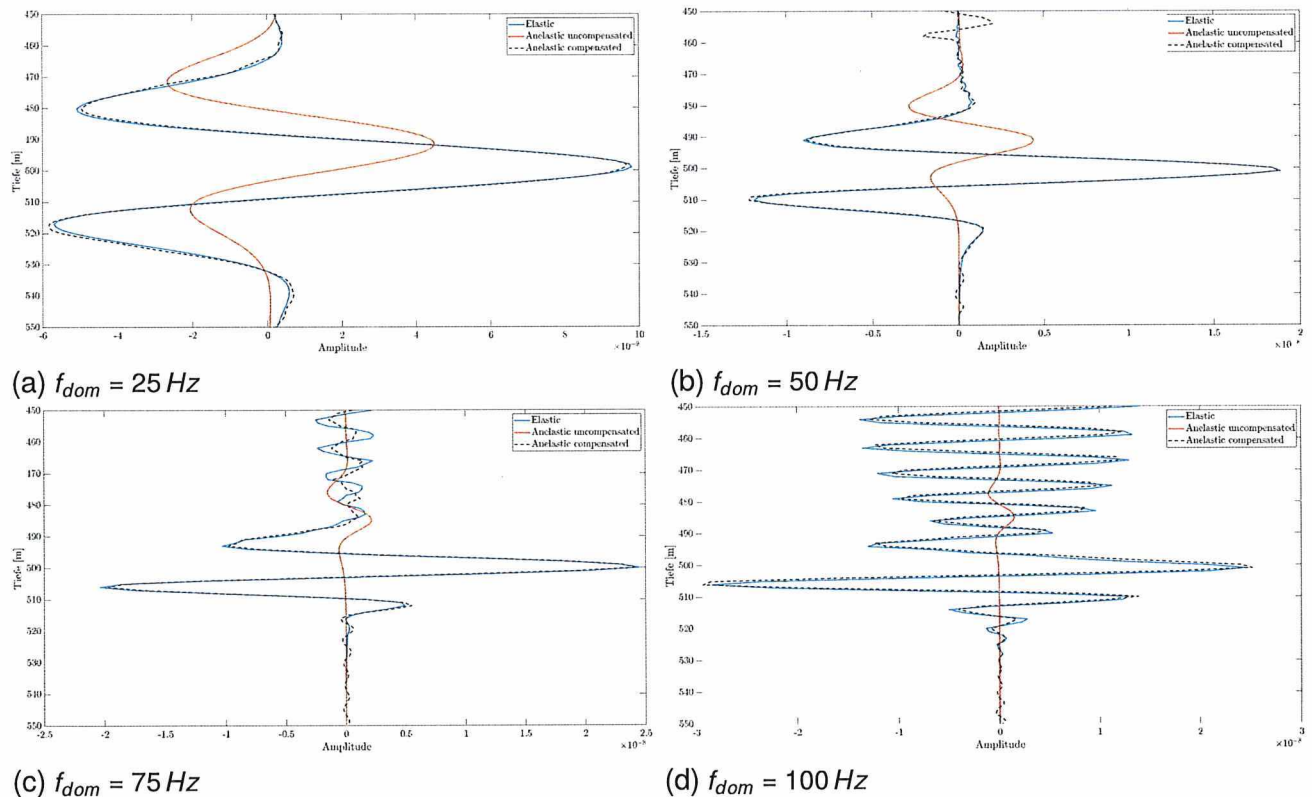


Abbildung 26: Rekonstruktion der elastisch simulierten FD-Daten durch QPSDM der viskoelastisch simulierten FD-Daten für verschiedene dominante Frequenzen des Quellsignals.

5.2.5 Common-Offset-Gather-Migration

Eine zusätzliche Implementation innerhalb der Migrationssoftware war die Common-Offset-Gather (COG) Migration. Für diesen Ansatz wurden die Daten in Teildatensätze mit Quell- und Empfängerabstand (Offset) in einem bestimmten Offset-Bereich ("Offset Bin") umsortiert und diese anschließend migriert. Alle Spuren, deren Offset in den Bereich eines Offset Bins fällt, werden diesem zugeordnet. Die Anzahl der Offset Bins wird durch den maximalen Offset im Datensatz und durch die Offset-Bin-Größe bestimmt. Ein wesentlicher Vorteil der COG-Migration besteht darin, dass die migrierten COG-Daten in Common-Image-Gather (CIG) umsortiert werden können. Im 3D-Fall wird für jede Oberflächenposition (i_x, i_y) ein CIG erstellt, das die Dimensionen *Anzahl Offsets* $\times$ *Tiefen-Samples* (n_z) besitzt. Das CIG

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 46

beschreibt in lateraler Richtung den Beitrag aller Offsets zu dem jeweiligen Wert des Bildpunktes. Idealerweise sollten Reflektoren innerhalb der CIG bei Verwendung des korrekten Geschwindigkeitsmodells horizontal verlaufen. „Falsche“ Modelle führen zu gekrümmten Reflektoren, wodurch in der anschließenden Stapelung die Amplituden teilweise ausgelöscht würden. Zudem können aus der Analyse der CIG Rückschlüsse über das Auftreten von Anisotropie-Effekten gezogen werden. Das Betrachten von CIG erleichtert damit die Beurteilung des für die Migration verwendeten Geschwindigkeitsmodells. Die Bewertung ist zwar nicht einfach direkt quantifizierbar, ermöglicht aber eine visuelle Einschätzung der Qualität des verwendeten Geschwindigkeitsmodells. In den CIG sind reflektierte Wellen von gebrochenen und geführten Wellen getrennt, was die Entfernung nicht-reflektiver Energie durch Muting in den CIG erleichtert. Nach der Bearbeitung der CIG erfolgt deren Stapelung, wodurch ein Migrationsvolumen analog zur konventionellen CSG-Migration entsteht. Allerdings führt die Umsortierung in COG und die Verwendung innerhalb der Migrationssoftware zu einem erhöhten Ressourcenbedarf, da mehr sequentielle Lesevorgänge der benötigten Laufzeittabellen erforderlich sind.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 47

6 Geschwindigkeitsmodellierungen

6.1 Ersteinsatzlaufzeittomographie (FATT)

Zur Charakterisierung der Geschwindigkeitsverteilung der oberflächennahen geologischen Strukturen soll ein hochaufgelöstes P-Wellen-Geschwindigkeitsmodell unter Verwendung einer Ersteinsatzlaufzeittomographie für die vollständige 3D-Seismik abgeleitet werden. Das resultierende 3D-Geschwindigkeitsmodell dient im Anschluss als Startmodell für die Wellenforminversion sowie als Grundlage für die Erstellung eines Migrationsgeschwindigkeitsmodells im Rahmen der fokussierenden Pre-Stack-Tiefenmigration.

Die Arbeiten umfassen folgende wesentliche Schritte (Abschnitt 6.1.1):

- Qualitätskontrolle der von der BGE zur Verfügung gestellten gepickten Ersteinsätze
- Erstellung eines 3-Schicht-Startmodells
- Durchführung mehrerer Tomographieläufe und iterative Verbesserung der Anpassung der gepickten Ersteinsätze an die synthetisch berechneten Ersteinsätze
- Extraktion der 3D-Geschwindigkeitsverteilung und Darstellung von Schnitten durch das 3D-Modell
- Interpretation des resultierenden Geschwindigkeitsmodells basierend auf bekannten strukturellen Modellen
- Vergleich der Topografie und der oberflächennahen Geschwindigkeitsheterogenitäten im Modell mit Hilfe von LiDAR-Daten

Die Bestimmung von Ersteinsätzen und die Durchführung der Ersteinsatzlaufzeittomographie wurde unter Verwendung der Software Geotomo durchgeführt. Das finale oberflächennahe Geschwindigkeitsmodell wurde weiterhin verwendet, um die Ersteinsätze seismischer Daten von Unter-Tage-Stationen zu verifizieren (Abschnitt 6.1.2).

6.1.1 3D-Seismik

Als Eingangsdatensatz dienten die gepickten Ersteinsätze der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), die bereits eine erste Laufzeittomographie für mehrere Teildatensätze der Asse 3D-Seismik durchgeführt hatte. Die Herausforderung bestand darin, die gesamte Messauslage, d.h. alle Schüsse und Empfänger, in der Inversion zu berücksichtigen.

Die Zuordnung der Ersteinsätze erfolgte über die interne Schusspunkt- und Empfängerpunkt-Nummer. Die gepickten Ersteinsätze zeigten bei einer visuellen Durchsicht zum Teil eine sehr starke Abweichung von den tatsächlichen Ersteinsätzen. Eine Bereinigung der offensichtlich nicht korrekt gepickten Ersteinsätze innerhalb des Offset-Laufzeit-Diagramms lieferte eine starke Reduktion der Anzahl der Ersteinsätze. Im Weiteren erfolgten verschiedene Tomographiedurchläufe, welche trotz Variation der Inversionsparameter und Startmodelle kein zufriedenstellendes Ergebnis für die gewünschte Diskretisierung von 10 m Gitterpunkt Abstand für das Geschwindigkeitsmodell erzielten. Zwar wurden grundsätzlich die geologischen Einheiten im großskaligen Bereich erfasst, jedoch kam es durch die fehlerhaften Picks zu zahlreichen signifikanten Artefakten im zentralen Modellbereich, die auch durch ein weiteres Aussortieren fehlerhafter Picks nicht reduziert werden konnten. Letztendlich wurden fast 50 % der

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 48

zur Verfügung gestellten Picks aussortiert, wobei das erhaltene tomographische Modell immer noch zahlreiche Artefakte enthielt.

Erneute Bestimmung der Ersteinsätze

Schließlich erfolgte eine gänzlich neue Bestimmung der Ersteinsätze für den gesamten Datensatz, um ein verlässliches und möglichst artefaktfreies Geschwindigkeitsmodell abzuleiten. Die dabei gewählte Vorgehensweise ist in Abbildung 27 dargestellt und zeigt die iterative Bestimmung der Ersteinsätze durch wiederholte Reduktion der Laufzeiten und gleichzeitige Einschränkung des Zeitfensters für den Autopicker. Die Bestimmung der Ersteinsätze erfolgte unter Verwendung der Kreuzkorrelation, d.h. dem Maß der Ähnlichkeit zweier benachbarter Spuren. Aus den bestimmten Ersteinsätzen wurde ein 3-Schicht-Geschwindigkeitsmodell als Startmodell für die Berechnung von synthetischen Laufzeiten erzeugt. Diese synthetisch berechneten Laufzeiten wurden von den Spuren subtrahiert, so dass im Idealfall, d.h. bei korrektem Geschwindigkeitsmodell, die Ersteinsätze horizontal auf dem gleichen Zeitniveau ausgerichtet sein sollten ("Flattened First Arrivals"). Je besser diese horizontale Ausrichtung der Ersteinsätze erfolgt, desto mehr Ersteinsätze können über Kreuzkorrelation innerhalb des festgelegten Zeitfensters bestimmt werden. Nach einer abschließenden Qualitätskontrolle konnten ca. 1,3 Milliarden Ersteinsätze zur Verwendung für die weitere Inversion bestimmt werden.

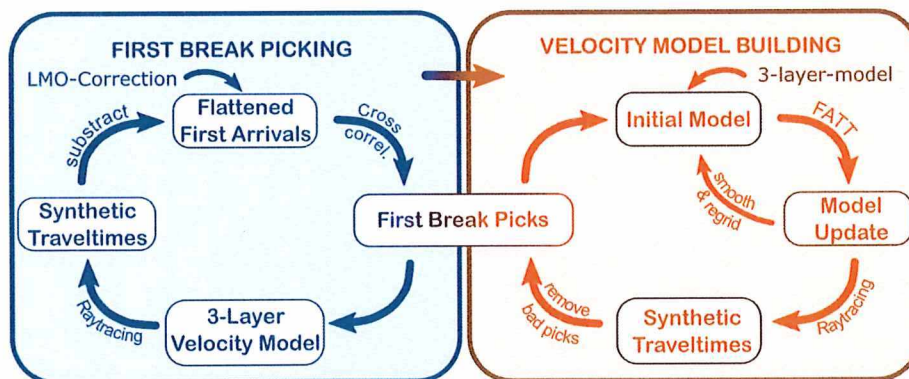


Abbildung 27: Übersicht zur Bestimmung von Ersteinsätzen (links) und Ableitung eines oberflächennahen Geschwindigkeitsmodells (rechts).

Workflow Ersteinsatzlaufzeittomographie

Der generelle Ablaufplan zur Erstellung eines tomographischen Modells ist in Abbildung 27 (rechts) dargestellt:

1. Definition eines Startmodells (z.B. 3-Schicht-Modell) basierend auf den berechneten Ersteinsätzen
2. Laufzeittomographie und Extraktion des Modell-Updates
3. Berechnung synthetischer Laufzeiten (Ray-Tracing) für das gefundene Modell-Update
4. Bestimmung der Abweichung zwischen gepickten und synthetischen Ersteinsätzen (Misfit) und Aussortierung von Spuren mit sehr hohem Misfit
5. Ableitung eines neuen Startmodells aus dem bisherigen Modellupdate mit Anpassung des Gitterpunktabstandes und Glättung des Modells

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 49

6. Iterative Durchführung bis zum finalen Modell

Die beschriebenen Schritte wurden nach ausgiebigen Tests zur Parameterwahl und Startmodelldesign fünffach durchgeführt, um von einem großskaligen grob-diskretisierten Modell (50 m Gitterpunktabstand) zu einem hochaufgelösten Geschwindigkeitsmodell (10 m Gitterpunktabstand) zu kommen (Abbildung 28). Je kleiner der Gitterpunktabstand gewählt wird, desto größer ist der Einfluss des Startmodells und der Pick-Qualität auf das Ergebnis. Daher dient für die Ableitung der hochaufgelösten Modelle (Durchgang 3 - 5 in Abbildung 28) ein Startmodell als Ausgang, das bereits großskalige langwellige Anteile des Geschwindigkeitsmodells (Durchgang 1 - 2 in Abbildung 28) beinhaltet.



Abbildung 28: Überblick zu den verwendeten Anteil an Daten ("Data in %"), Gittergröße ("Grid Size") und Qualität der Anpassung ("RMS Error") für die verschiedenen Tomographiedurchgänge.

Die Qualität des Tomographieergebnisses wird maßgeblich über folgende Parameter und Vergleiche gemessen:

- RMS-Fehler (Maß der Abweichung zwischen synthetischen und gepickten Ersteinsätzen) für den gesamten Datensatz
- Visueller Vergleich für einzelne Schusssektionen bezüglich der Anpassung der Ersteinsätze über den gesamten Offsetbereich
- Prüfung des Modell-Updates auf Artefakte und Abgleich der gefundenen Heterogenitäten mit geologischen Vorkenntnissen

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 50

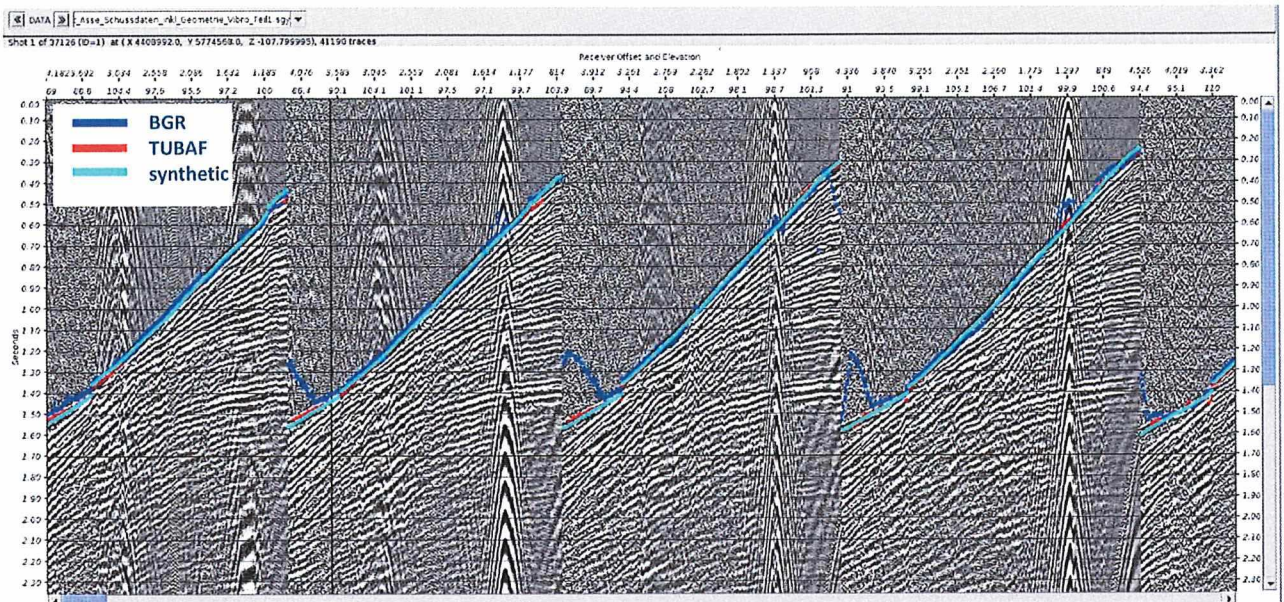


Abbildung 29: Vergleich der bestimmten Ersteinsätze von BGR (blau) und TUBAF (rot) mit den synthetisch berechneten Ersteinsätzen für das finale tomographische Modell (türkis).

Schließlich erzielte das finale tomographische Modell nach fünf Durchgängen einen RMS-Fehler von 4,83 ms, was eine sehr gute Anpassung der synthetischen an die gepickten Ersteinsätze beschreibt. Ein Beispiel der Anpassung ist für einen Datenausschnitt in Abbildung 29 dargestellt. Zu sehen sind zum einen die zur Verfügung gestellten Picks (blau), welche insbesondere bei größeren Offsets stark von den tatsächlichen Ersteinsätzen abweichen, die durch TUBAF bestimmten Ersteinsätze (rot) und die synthetischen Ersteinsätze für das finale tomographische Modell (türkis). Die Anpassung der Ersteinsätze für das finale Modell ist über den gesamten Offset sehr gut und beweist somit die gute Qualität des tomographischen Modells zur Erklärung der Ersteinsatzlaufzeiten im gesamten Untersuchungsgebiet.

Finales tomographisches P-Wellen-Geschwindigkeitsmodell

Horizontal- und Vertikalschnitte des finalen tomographischen Geschwindigkeitsmodells sind in Abbildung 30 bzw. in Abbildung 31 dargestellt und zeigen Geschwindigkeiten zwischen 1000 m/s und 5000 m/s für Modellbereiche mit Strahlendurchgang. Die Position der Vertikalschnitte ist in der Karte in Abbildung 32b durch gelbe Linien markiert. Mit einer maximalen Eindringtiefe von ca. 1250 m charakterisiert das Modell Strukturen vorrangig bis zum Muschelkalk sowie salinare Schichten im zentralen Modellbereich. Eine Überlagerung bekannter Schichtgrenzen, extrahiert aus einem durch die BGE zur Verfügung gestellten Strukturmodell in GOCAD, zeigt eine sehr gute Korrelation der beschriebenen Geologie und gibt diese mit einer sehr hochaufgelösten Geschwindigkeitsverteilung wieder.

Im zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes erscheint der Verlauf des Muschelkalks mit bekannten Mächtigkeiten von bis zu 80 m mit einer P-Wellengeschwindigkeit von ca. 4500 m/s (Abbildung 30). Ebenso kann das einheitliche Streichen der Nordflanke und das zweiteilige Streichen der Südflanke des Salzlückens abgebildet werden (Abbildung 30,c). Weitere zum Teil sehr steil einfallende Schichten (Keuper, Kreide), die an den Salzstock angrenzen, können ebenfalls gut im Modell abgebildet werden.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 51

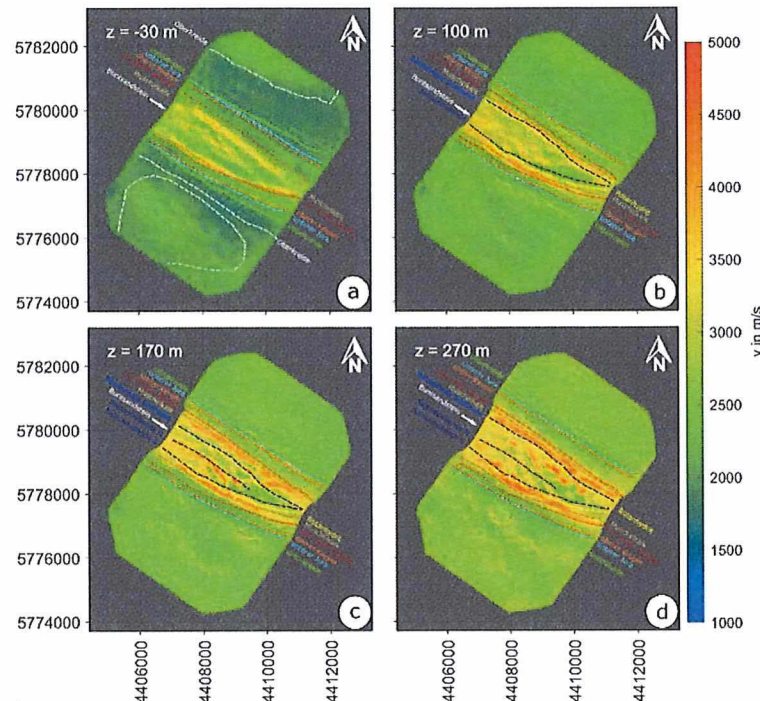


Abbildung 30: Horizontalschnitte durch das finale tomographische oberflächennahe Geschwindigkeitsmodell für -30 m (a), 100 m (b), 170 m (c) und 270 m (d) unter NN. Modellbereiche ohne Strahldurchgang sind ausgeblendet (grau).

Die in Richtung Südwest-Nordost verlaufenden Vertikalschnitte in Abbildung 31 e,f zeigen ebenfalls den Verlauf des Muschelkalks sowie leicht höhere Geschwindigkeiten im östlichen Bereich. Weiterhin ist im mittleren Modellbereich bei einer Tiefe von ca. 250 m unter NN ein Versatz im Salinar sichtbar. In den Northwest-Südost verlaufenden Vertikalschnitten (Abbildung 31 g, h) lässt sich der Muschelkalk wieder gut von den aufliegenden Schichten durch seine hohe Geschwindigkeit abgrenzen. Weiterhin lassen sich die Kreidebänke durch eine leicht erhöhte Geschwindigkeit von ca. 3500 m/s identifizieren, während die Modellbereiche zwischen Kreide und mittlerem Keuper generell eher eine vergleichsweise niedrige Geschwindigkeit von 2500 - 3000 m/s zeigen.

Vergleich mit Bohrlochdaten

Zur Verifizierung der abgeleiteten Geschwindigkeitsverteilung wurden vertikale Geschwindigkeits-Tiefen-Profile aus dem tomographischen Modell extrahiert und mit zur Verfügung gestellten Bohrlochinformationen verglichen.

Aus dem tomographischen Modell wurden die Geschwindigkeitswerte an den Stellen extrahiert, an denen Bohrlochinformationen verfügbar waren. Die Bohrlochdaten stammen von drei Bohrlöchern, deren Position in Abbildung 32b durch türkisarbene Punkte markiert ist. Alle drei Bohrlöcher liegen im zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes, so dass eine hohe Überdeckung und eine hohe Strahldichte in diesem Bereich durch die 3D-seismische Messung gegeben ist. Es lagen Daten aus Sonic-Log- sowie Checkshot-VSP-Messungen bis in eine Tiefe von 500 - 900 m unter NN vor. Während die Sonic-Log-Daten eine sehr hohe Auflösung besitzen und die Geschwindigkeitsverteilung in direkter

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 52

Bohrlochnähe sehr detailreich auflösen können, liefern die Checkshot-Daten eher ein grob aufgelöstes Geschwindigkeitsprofil mit zum Teil konstanten Geschwindigkeitswerten über mehrere Meter hinweg.

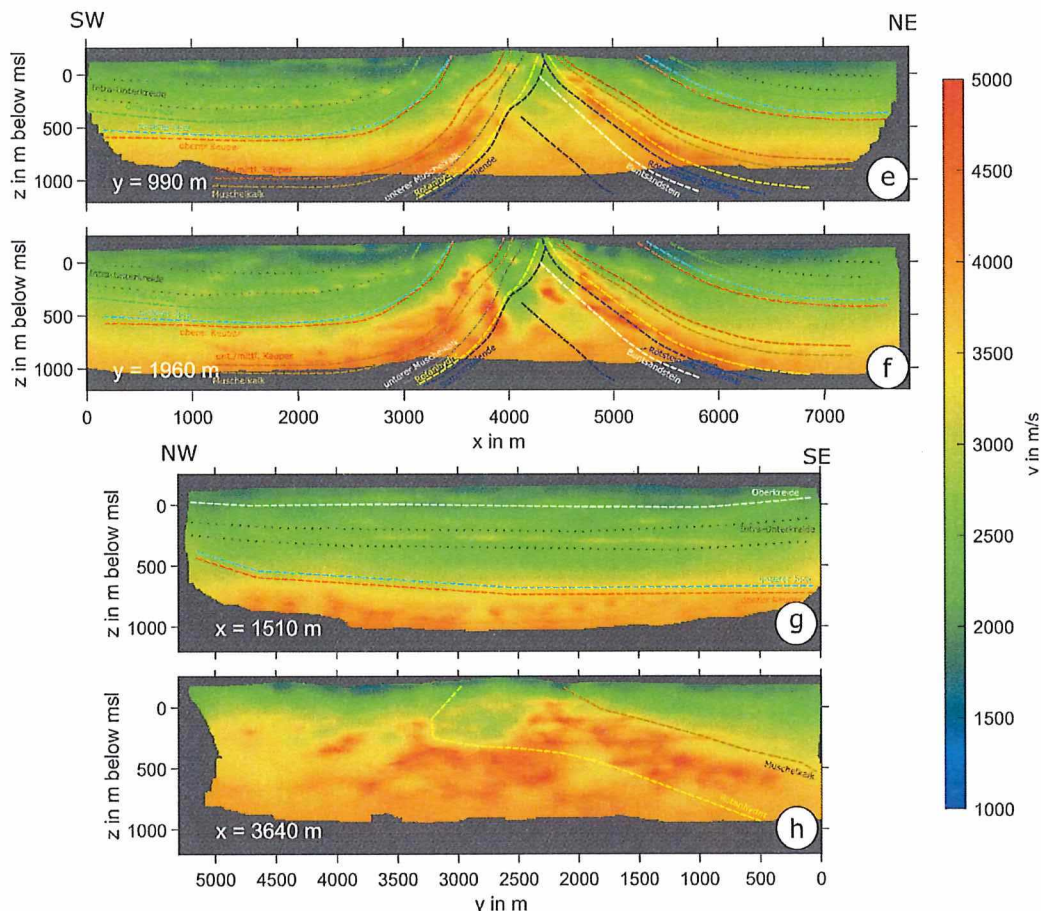


Abbildung 31: Vertikalschnitte durch das finale tomographische oberflächennahe Geschwindigkeitsmodell für unterschiedliche Inline- (e,f) und Crossline- (g,h) Positionen (auch Abbildung 32b). Modellbereiche ohne Strahldurchgang sind ausgeblendet (grau).

Der Vergleich der unterschiedlichen Geschwindigkeits-Tiefen-Profile ist in Abbildung 32 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Geschwindigkeiten aus dem tomographischen Modell (blaue Linie) dem generellen Verlauf der durch die Sonic-Log-Messung (gelb) bestimmten Geschwindigkeitsverteilung folgen. Eine Abgrenzung geologischer Schichten ist mit dem tomographischen Modell gegenüber den Bohrlochdaten aufgrund der unterschiedlichen Auflösung nur bedingt möglich. Während die Geschwindigkeiten aus der Sonic-Log-Messung lediglich die Geschwindigkeit über einen kleinen vertikalen Bereich von wenigen Zentimetern mittelt, beträgt die vertikale Auflösung des Checkshot-Geschwindigkeitsprofils mehrere Meter in Abhängigkeit des Empfängerpunkt-Abstandes im Bohrloch. Beide Messungen bestimmen die Geschwindigkeiten für vorwiegend vertikal laufende P-Wellen. Die Geschwindigkeiten aus der laufzeittomographischen Messung hingegen ergeben sich entlang der von vorwiegend horizontal verlaufenden Strahlwegen. Die Abweichungen, die sich zwischen tomographischem Geschwindigkeitsprofil und Bohrlochgeschwindigkeitsprofil ergeben, lassen sich somit zum einen auf die unterschiedliche Mittlung der Geschwindigkeiten über unterschiedliche Tiefenintervalle, zum anderen auf die Richtungsabhängigkeit der seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeit zurückführen. Einige besonders

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 53

signifikante Unterschiede zwischen dem tomographischen Modell und den bohrlochseismischen Geschwindigkeiten sind durch schwarze Pfeile in Abbildung 32a gekennzeichnet und betragen zum Teil bis zu 1000 m/s. Bezogen auf eine Intervallgeschwindigkeit von 4500 - 5000 m/s ist dies eine Variation von über 20 %.

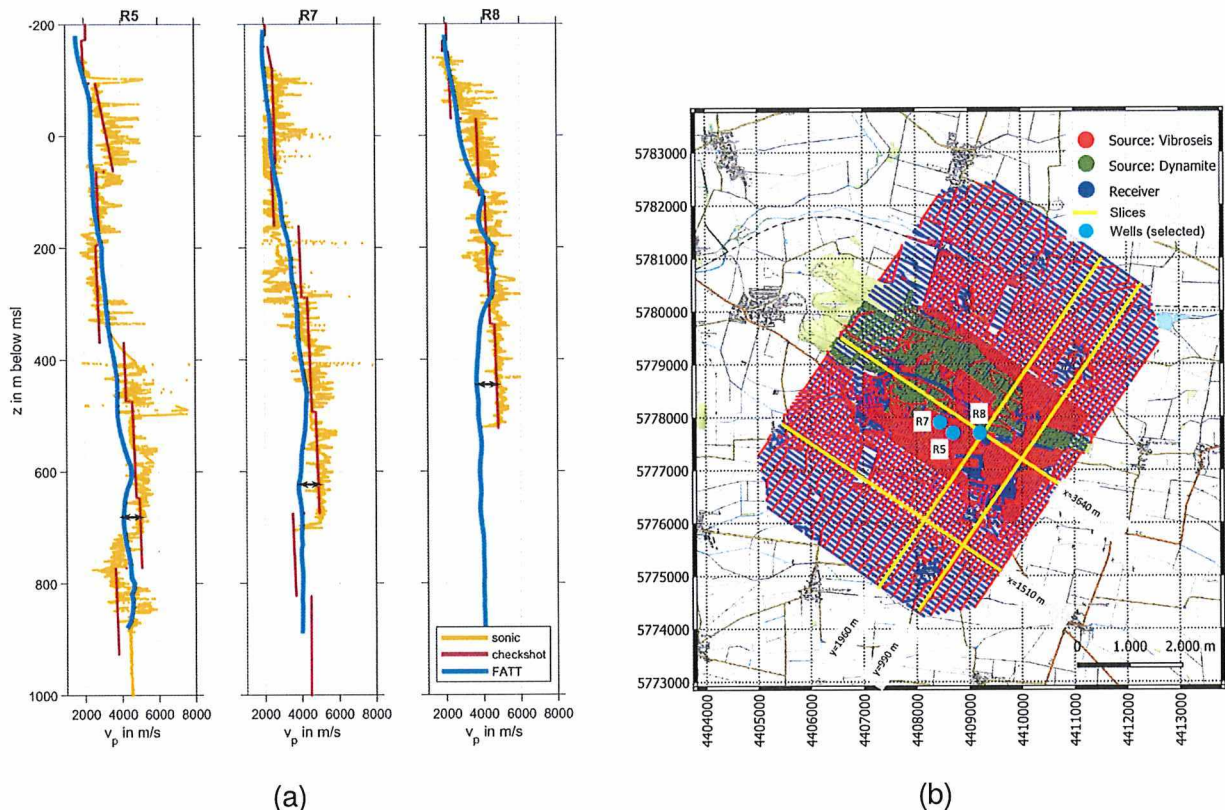


Abbildung 32: Vergleich von Geschwindigkeitsprofilen aus Sonic-Log- und Checkshot-Daten sowie extrahiert aus dem tomographischen Modell entlang drei verschiedener Bohrlochpfade (a). Die Positionen der Bohrungen sind in der Karte (b) mit türkisen Punkten markiert.

Vergleich mit LiDAR-Daten

Durch die detaillierte Abbildung der Kalkbänke im oberflächennahen Geschwindigkeitsmodell im zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes ergibt sich die Möglichkeit, diese Geschwindigkeiten mit einem digitalen Höhenmodell abzugleichen. Somit können topografische Variationen gegebenenfalls mit den gefundenen Geschwindigkeitsvariationen in Zusammenhang gebracht werden. Der Vergleich ist in Abbildung 33 dargestellt. Dabei zeigt die Abbildung in 33a den von der BGE zur Verfügung gestellten LiDAR-Kartenausschnitt über dem Untersuchungsgebiet und die Abbildung 33b einen oberflächennahen Horizontalschnitt aus dem tomographischen Geschwindigkeitsmodell. Die roten Pfeile und Markierungen in den Abbildungen deuten auf ähnliche strukturelle Details hin, die in beiden Datensätzen erkannt werden können. Insbesondere Heterogenitäten entlang der Hochgeschwindigkeitszonen können gut mit strukturellen Variationen in der LiDAR-Karte korreliert werden (siehe rote Pfeile am südlichen Flankenbereich und rote gestrichelte Linien im mittleren Bereich). Weiterhin lassen sich auch die an den Salzstock aufgestellten Schichten in der LiDAR-Karte und im tomographischen Modell wiederfinden.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 54

Der Vergleich unterstreicht die sehr gute Auflösung und Verlässlichkeit der einzelnen Strukturelemente im tomographischen Modell.

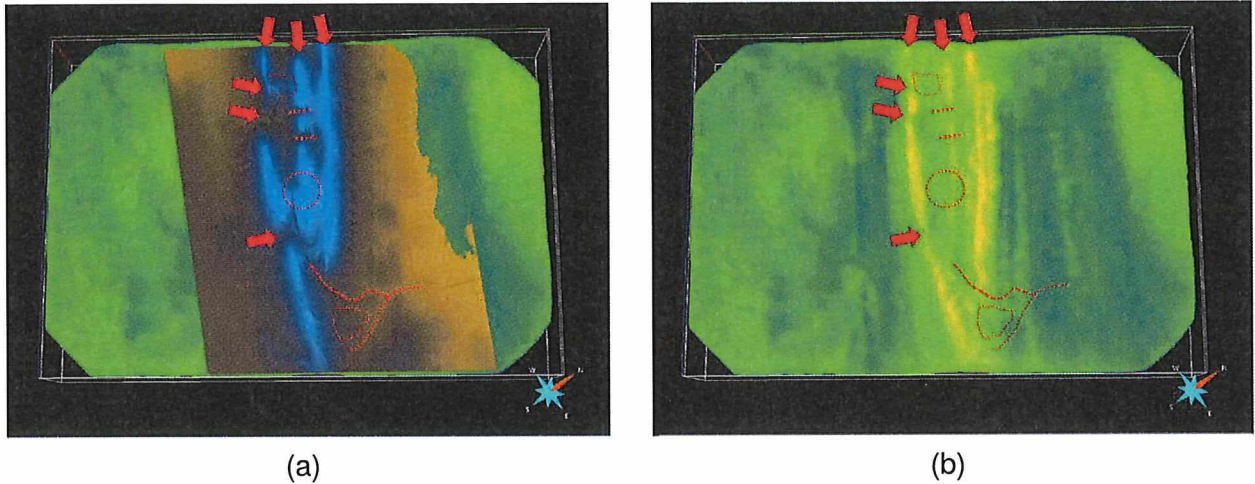


Abbildung 33: Darstellung von LiDAR-Daten (a) und Vergleich mit tomographischen Geschwindigkeitsmodell (b).

6.1.2 Unter-Tage-Stationen

Während der 3D-Seismik waren auch 24 Geophone unter Tage im Bergwerk installiert und registrierten insgesamt 37126 Vibroseisanregungen der 3D-Seismik (insgesamt 891024 Seismogramme). Die Daten wurden im SEG-D-Format inkl. SPS-Dateien übergeben. Die Aufbereitung der Daten beinhaltete folgende Schritte:

- Konvertierung von SEG-D- in das SEG-Y-Format
- Zuordnung der Koordinaten aus SPS-Dateien durch Abgleich mit den im SEG-D-Header gespeicherten Linien- und Punktnummern
- Aussortierung von unkorrelierten und wiederholenden Schüssen (ca. 20 %)
- Umsortierung von Schuss-Sektionen (Common-Shot-Gather, CSG) in Empfänger-Sektionen (Common-Receiver-Gather, CRG)
- Transformation der Koordinaten in das lokale Koordinatensystem

Die Lage der Unter-Tage-Stationen ist in Abbildung 34 zusammen mit den Schusspositionen und dem tomographischen Modell dargestellt. Die Stationen befanden sich in einer Tiefe von 290 - 640 m unter NN. Für die Bearbeitung der Daten wurden folgende Ziele definiert:

1. Bestimmung der Ersteinsätze
2. Verifikation der Ersteinsätze unter Verwendung des tomographischen Modells
3. Anwendung der Pre-Stack-Tiefenmigration (Kapitel 7.1.2)

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 55
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	64213000				HF	PH	0002	00	

Die Ersteinsätze wurden für einen Großteil der Empfänger manuell bestimmt. Sie zeigen eine über den gesamten Offsetbereich stark variierende Qualität. Bis zu einem Offset von 2500 - 3500 m war die Bestimmung der Ersteinsätze meist problemlos möglich. Für größere Offsets waren die Ersteinsätze bedingt durch ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis nur schwer bis gar nicht zu bestimmen.

Für alle Spuren wurden synthetische Laufzeiten basierend auf dem tomographischen Modell und einem 3-Schicht-Modell berechnet. Diese synthetischen Laufzeiten wurden im Anschluss mit den gepickten Ersteinsätzen verglichen. Dabei wurden für die meisten Spuren mit beiden Modellen vergleichsweise gute Anpassungen mit Misfits von weniger als 20 ms erzielt. Für einzelne Spuren war ein Misfit von durchschnittlich 40 ms zu beobachten, was einer unzureichenden Erklärung der Laufzeiten durch die Modelle entspricht. Für insgesamt neun Empfänger wurden größere Abweichungen von bis zu 200 ms ermittelt, was auf einen signifikanten geometrischen Fehler oder eine fehlerhafte Zeitsynchronisation der Unter-Tage-Stationen 106, 111, 112, 113, 114, 120, 122, 123 und 124 hinweist.

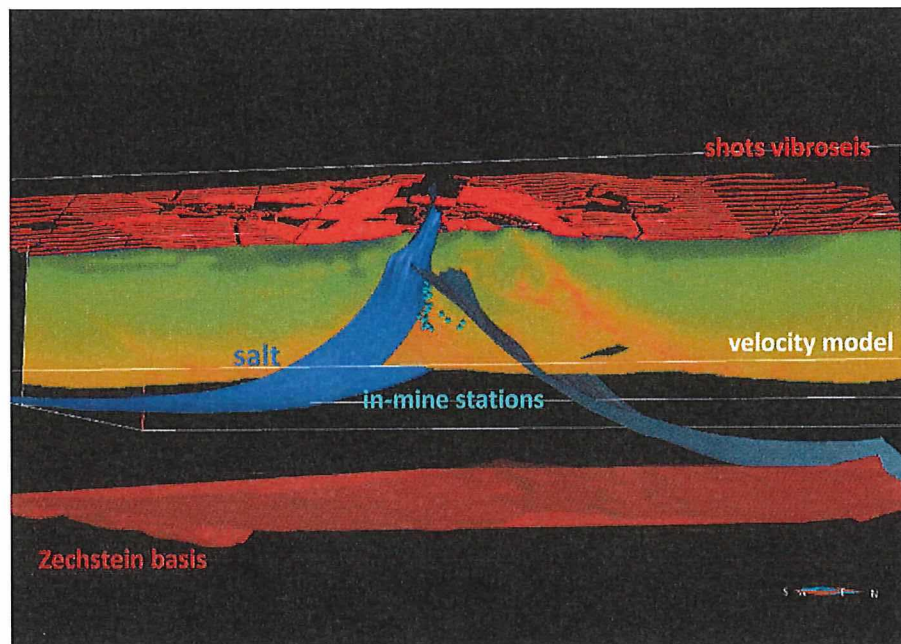


Abbildung 34: Lage der Unter-Tage-Stationen (türkis) und Darstellung des tomographischen Geschwindigkeitsmodells.

6.2 Reflexionstomographie

Das Ziel der angewandten Reflexionstomographie war die Berechnung von P-Wellengeschwindigkeitsmodellen, um neben dem Ergebnis der FWI ein alternatives, aus konventionellen Verfahren abgeleitetes P-Wellengeschwindigkeitsmodell verwenden zu können.

Da zu Beginn des Projektes noch kein synthetischer Datensatz zur Verfügung stand, wurde zunächst mit einer aus dem Asse 3D-Datensatz extrahierten 2D-Testlinie (Quelllinie 5421, Empfängerpunkt 5421) gearbeitet.

Um optimale Ergebnisse zu erzielen, wurde der gesamte Prozess der Reflexionstomographie in die folgenden Schritte unterteilt:

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 56

- Reprozessierung der 2D-Testlinie
- Reflexionstomographie an der extrahierten 2D-Testlinie

Reprozessierung

Das Hauptziel der Reprozessierung war die Bereitstellung optimaler Eingangsdaten für die Reflexionstomographie. Darüber hinaus zielte die Reprozessierung auch auf Folgendes ab:

- Verständnis des Prozessierungsablaufs und der Parameter, die vom vorherigen Prozessierungsprojekt auf den Datensatz angewendet wurden
- Verbesserung des ursprünglichen Prozessierungsablaufs, falls möglich und notwendig
- Vorbereitung optimaler Eingabefelddaten für die fokussierende Pre-Stack-Tiefenmigration, insbesondere wenn die Migration im Sinne einer True-Amplitude-Migration durchgeführt wird

Die Reprozessierung wurde mit der Software Reveal (Shearwater) durchgeführt, um die bislang an den Daten durchgeführten Prozessingschritte in genau der gleichen Weise übernehmen und anwenden zu können und so eine sehr gute Nachvollziehbarkeit und Qualitätskontrolle zu ermöglichen.

Abbildung 35 zeigt das extrahierte 2D-Post-Stack-Tiefenmigrationsprofil, das von der BGE unter Verwendung des ursprünglichen Prozessierungsablaufs an der Position der 2D-Testlinie erstellt wurde und das als Vergleich für die aktuelle Reprozessierung verwendet wurde. Dieses Profil sowie alle in diesem Abschnitt des Berichts gezeigten Profile werden mit dem Horizontal-Vertikal-Verhältnis 1:1 und mit angewandtem „Automatic Gain Control“ (AGC) dargestellt.

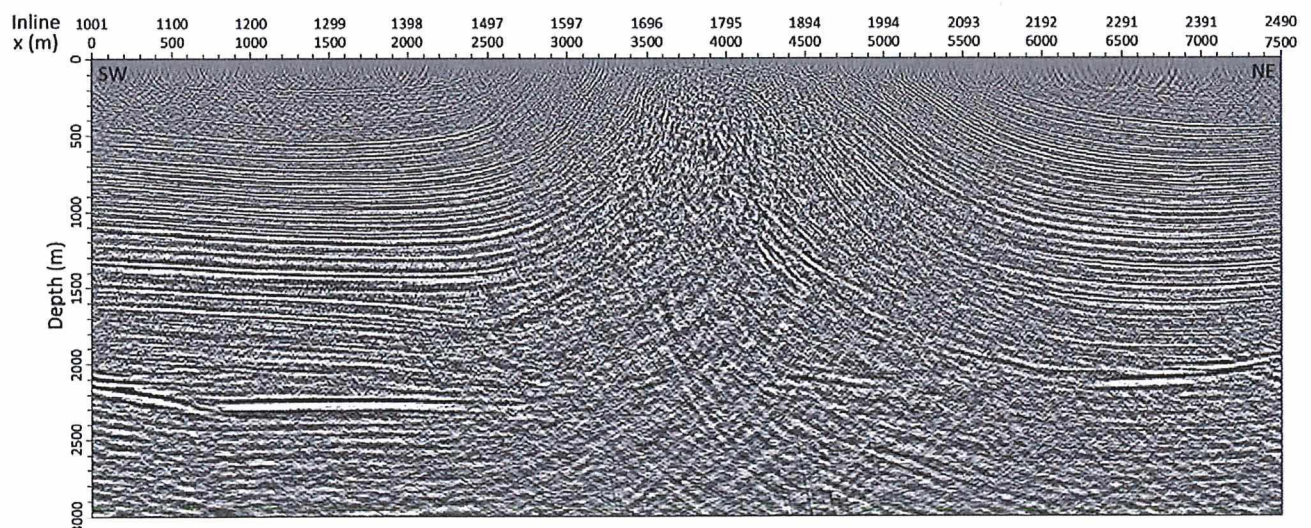


Abbildung 35: Extrahiertes 2D-Post-Stack-Tiefenmigrationsprofil
(Reveal-Datensatz 5011_QC_PoSDM_prozessiert_AGC_SL5421RP5421.seis).

Die Reprozessierung wurde zu Beginn mit nahezu demselben Prozessierungsablauf durchgeführt, den auch die BGE zur Erstellung des ursprünglichen Profils bis zur Post-Stack-Tiefenmigration angewendet

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 57
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	64213000				HF	PH	0002	00	

hatte. Der einzige Unterschied bestand darin, dass die Reprozessierung im CMP-Bereich statt im Inline-Crossline-Bereich (wie im ursprünglichen Prozessierungsablauf), durchgeführt wurde. Das Ergebnis der Reprozessierung ist in Abbildung 36 dargestellt.

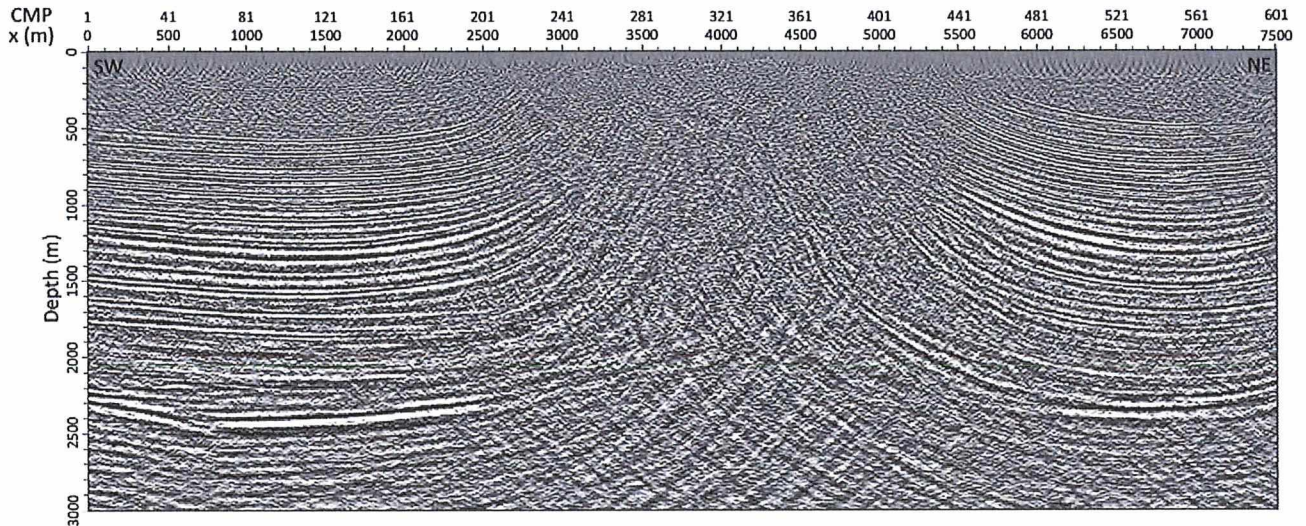


Abbildung 36: Reprozessierungsergebnis der 2D-Testlinie.

Im Vergleich zum ursprünglichen Ergebnis in Abbildung 35 ist zu erkennen, dass das Ergebnis der Reprozessierung relativ ähnliche Strukturen von den äußersten Rändern des Profils bis zu den Flanken des Salzstocks in einer Tiefe von weniger als 2200 m zeigt. Ein wesentlicher Unterschied der beiden Sektionen ist, dass das Reprozessierungsergebnis (Abbildung 36) keine kohärenten Reflektoren um den sehr oberflächennahen Bereich des Salzstocks herum inklusive der sehr steilen Flanken in seiner Nähe erkennen lässt. Außerdem scheint das Reprozessierungsergebnis (Abbildung 36) etwa 160 m tiefer als das ursprüngliche Ergebnis (Abbildung 35) zu liegen.

Das Reprozessierungsergebnis kann darauf hindeuten, dass der ursprüngliche Prozessierungsablauf, der für den seismischen 3D-Eingabedatensatz erstellt wurde, für die Prozessierung der 2D-Testlinie nicht vollständig geeignet ist. Daher wurde der ursprüngliche Prozessierungsablauf angepasst, um ihn für die seismischen 2D-Eingangsdaten zu optimieren. Die wichtigsten Änderungen, die im Rahmen der Reprozessierung vorgenommen wurden, sind:

- Prozessierung im CMP-Bereich anstelle von Inline-Crossline wie im ursprünglichen Prozessierungsablauf. Diese Änderung führt zu verschiedenen Ansätzen bei der Prozessierung im Gegensatz zum ursprünglichen Prozessierungsablauf, wie z.B. bei der GeometrieEinstellung und der Dip-Schätzung.
- Korrektur der Refraktionsstatik ohne Interpolation statt mit Interpolation wie im ursprünglichen Prozessierungsablauf.
- NMO-Korrektur unter Verwendung der RMS-Geschwindigkeit aus der zweiphasigen Geschwindigkeits-Semblance-Analyse anstelle der geschätzten Geschwindigkeiten wie im ursprünglichen Prozessierungsablauf. Die Geschwindigkeitsanalyse der ersten und zweiten Phase wurde für CMP-Intervalle von 1000 m bzw. 500 m durchgeführt.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 58

Um das Ergebnis zu verbessern, wurde zudem die Reprozessierung mit Hilfe von Tomo-Statik [34, 35] als zweiten Ansatz neben der Standardkorrektur der Refraktionsstatik durchgeführt. Die Post-Stack-Tiefenmigrationsprofile der 2D-Testlinie, die in der aktuellen Reprozessierung unter Verwendung der Standard-Refraktionsstatik und der Tomo-Statik erstellt wurden, werden in diesem Bericht als Refraktionsstatik-Profil und Tomo-Statik-Profil bezeichnet. Abbildung 37 und Abbildung 38 zeigen diese beiden Ergebnisse. Im Allgemeinen zeigt das Refraktionsstatik-Profil etwas klarere Reflexionen als das Tomo-Statik-Profil, während weitergehende Unterschiede zwischen den beiden Profilen relativ gering sind. Allerdings liegt das Refraktionsstatik-Profil etwa 76 m tiefer als das Tomo-Statik-Profil. Das Tomo-Statik-Profil selbst scheint die relativ gleiche Tiefenlage zu haben wie das in Abbildung 35 gezeigte ursprüngliche Profil.

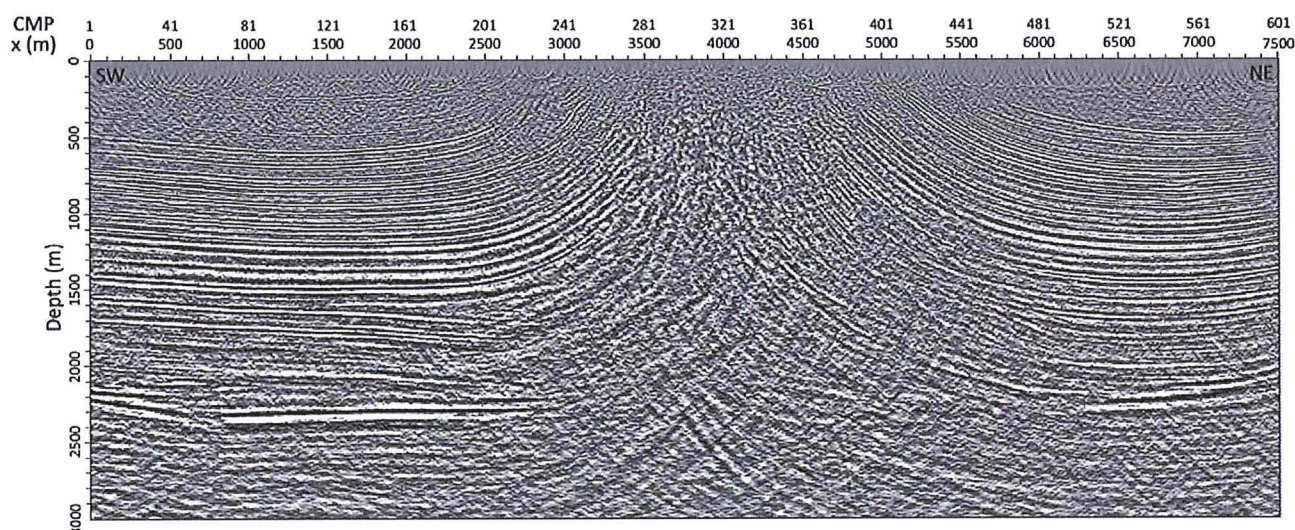


Abbildung 37: Refraktionsstatik-Profil, d. h. das Post-Stack-Tiefenmigration-Profil der 2D-Testlinie, das mit der aktuellen Reprozessierung unter Verwendung der Standard-Refraktionsstatikkorrektur erstellt wurde.

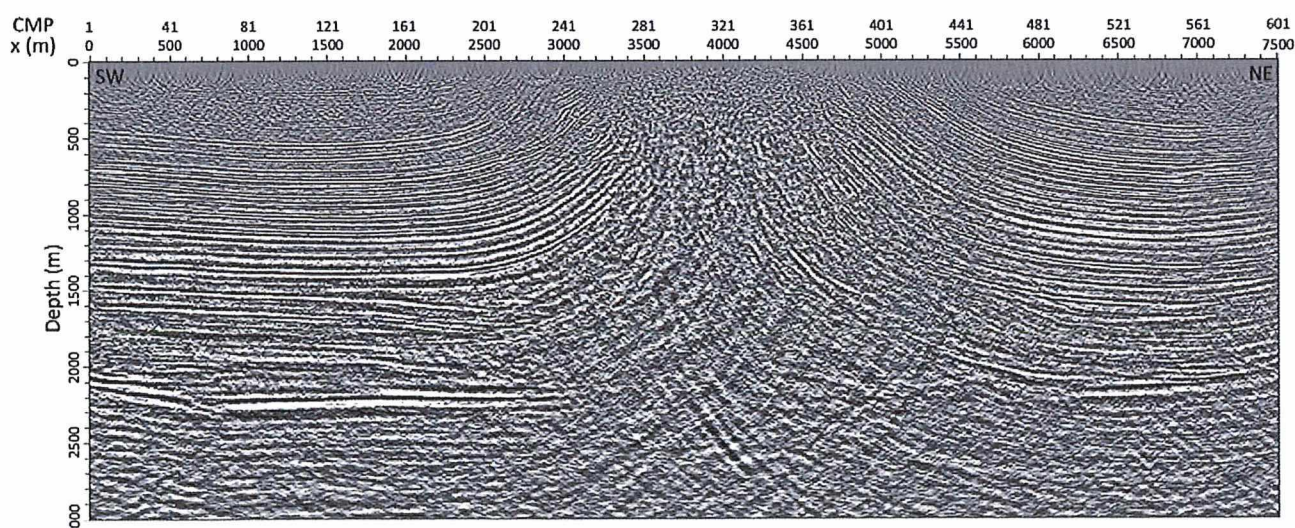


Abbildung 38: Tomo-Statik-Profil, d. h. das Post-Stack-Tiefenmigration-Profil der 2D-Testlinie, das mit der aktuellen Reprozessierung unter Verwendung von Tomo-Statik erstellt wurde.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 59

Die Abbildung 39 zeigt den direkten Nebeneinander-Vergleich zwischen dem ursprünglichen Profil (Abbildung 35) und dem Tomo-Statik-Profil (Abbildung 38), wobei einige der wichtigsten Unterschiede zwischen diesen Profilen an den mit gelben Pfeilen markierten Stellen hervorgehoben sind. Im Allgemeinen scheint das Tomo-Statik-Profil dem ursprünglichen Profil relativ ähnlich zu sein. Hier ist zu erkennen, dass das Tomo-Statik-Profil einige Reflexionen nicht so kohärent wie das ursprüngliche Profil zeigt, u. a. um die Spitze des Salzstocks (Pfeil 1) herum, an einem Teil der Nordostflanke (Pfeil 4) und bei einigen Reflektoren, die mit der Unterkante des Salzstocks zusammenhängen könnten (Pfeil 5). Andererseits zeigt das Tomo-Statik-Profil deutlich kohärentere Reflektoren an der Südwestflanke (Pfeil 2) und im tieferen Teil, der mit der Unterkante des Salzstocks in Verbindung stehen könnte (Pfeil 3). Ein Vergleich zwischen dem ursprünglichen Profil und dem Refraktionsstatik-Profil (Abbildung 37) führt zu demselben generellen Ergebnis-Vergleich, da die Refraktionsstatik- und Tomo-Statik-Profile sehr ähnlich sind.

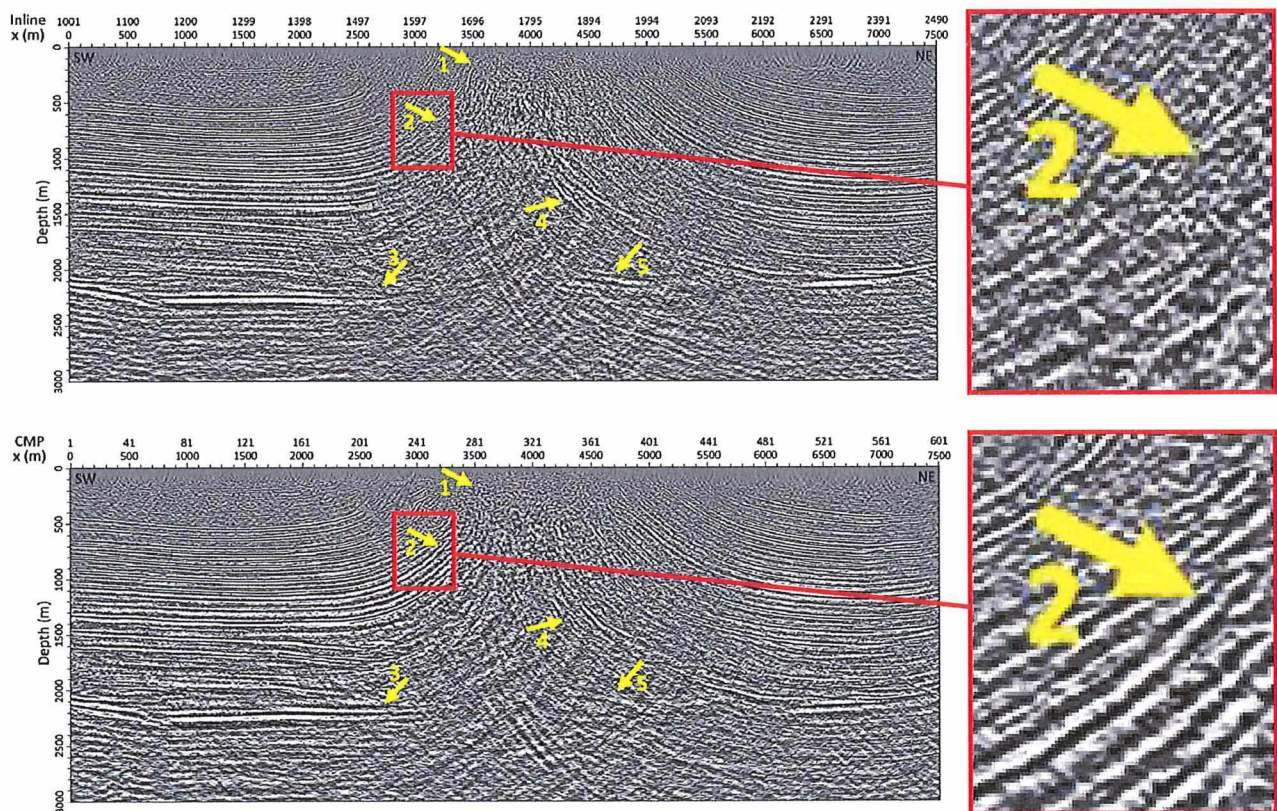


Abbildung 39: Direkter Vergleich zwischen ursprünglichem Profil (oben) und Tomo-Statik-Profil (unten). Einige wesentliche Unterschiede sind mit den gelben Pfeilen markiert hervorgehoben (Erklärungen dazu befinden sich im Text).

Der erste Schritt unseres Ansatzes zur Durchführung der Reflexionstomographie hat zu einem besseren Verständnis des ursprünglichen Prozessierungsablaufs geführt und die Möglichkeit eröffnet, den ursprünglichen Prozessierungsablauf so zu ändern, dass er für die 2D-Testlinie besser geeignet ist. Die Änderung des ursprünglichen Prozessierungsablaufs ermöglicht die optimalen Eingangsdaten nicht nur für die Reflexionstomographie, sondern auch für die fokussierende Pre-Stack-Tiefenmigration.

Im Rahmen der Reprozessierung wurde zudem das Verfahren der Tomo-Statik angewandt. Das Ziel war die Verbesserung des Ergebnisses im Vergleich zur Standard-Reprozessierung. Im Allgemei-

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	Blatt: 60
9A	64213000				HF	PH	0002	00	

nen scheinen sowohl das Refraktionsstatik-Profil als auch das Tomo-Statik-Profil dem ursprünglichen Profil, das mit dem 3D-Datensatz erstellt wurde, relativ ähnlich zu sein. Alle Schlüsselstrukturen, wie z. B. die Flanken der Salzstöcke, sind in den Profilen der Refraktionsstatik und der Tomo-Statik deutlich zu erkennen. Die Unterschiede sind im Vergleich zum ursprünglichen Profil relativ gering. Ferner zeigt das Refraktionsstatik-Profil im Allgemeinen deutlichere Reflexionen als das Tomo-Statik-Profil. Im Gegensatz zum Tomo-Statik-Profil scheint das Refraktionsstatik-Profil jedoch um etwa 76 m tiefer als das ursprüngliche Profil verschoben zu sein. Die Ursache für diese Statikverschiebung sollte noch weiter untersucht werden. Alles in allem scheinen sowohl das Refraktionsstatik-Profil als auch das Tomo-Statik-Profil die besten Reprozessierungs-Ergebnisse für die 2D-Testlinie darzustellen.

Zum Thema der Anwendung verschiedener Statik-Korrekturen auf die aus dem Asse 3D-Datensatz extrahierte 2D-Testlinie wurde im Projektzeitraum an der TUBAF eine Bachelorarbeit angefertigt (Muhlanga, 2022). Einige der Ergebnisse aus dieser Arbeit sind in den obigen Teil bei dem Vergleich der Statik-Korrekturen eingegangen.

Reflexionstomographie

Der Ablauf der Reflexionstomographie ist in Abbildung 40 illustriert.

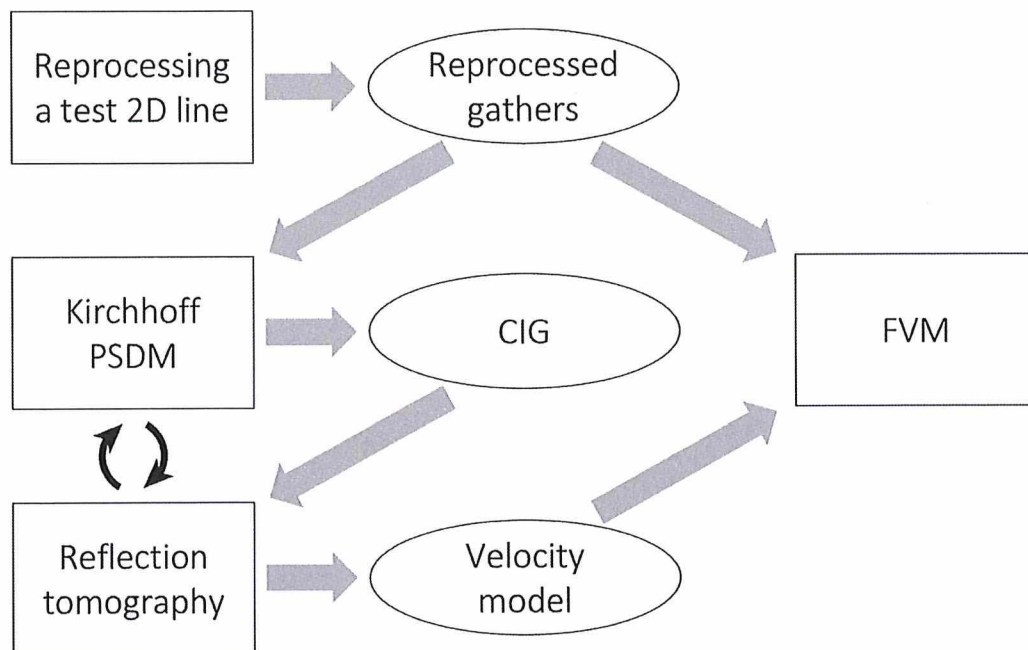


Abbildung 40: Ablauf der Reflexionstomographie.

Die Reflexionstomographie nutzt die reprozessierten Daten in einem iterativen Prozess, welcher zum Ziel hat, die Reflektoren in den Common Image Gathern nach der Kirchhoff-Pre-Stack-Tiefenmigration über einen großen Offset-Bereich zu korrigieren. Schrittweise wird damit das für die Migration verwendete Modell verbessert. Jeder Durchlauf der Tomographie beginnt mit der Wahl der Zielhorizonte. Für alle Horizonte wird anschließend im CIG der Moveout gepickt. Danach wird die Tomographie durchgeführt und damit verbunden das Geschwindigkeitsmodell angepasst. Basierend auf der neuen Variante des Modells wird eine Strahlverfolgung (Ray-Tracing) zur Berechnung von Laufzeittabellen durchgeführt.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht

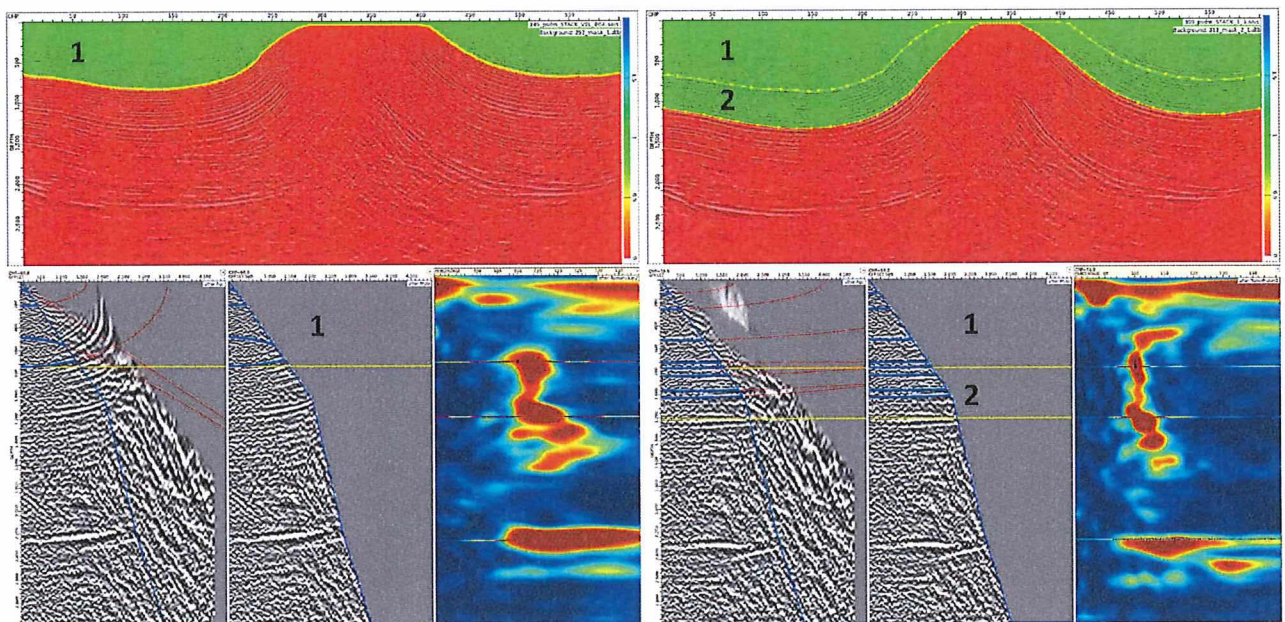


BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 61

Diese werden für die Pre-Stack-Tiefenmigration verwendet, wodurch aktualisierte Common Image Gather zur Verfügung stehen. Das abschließende Migrationsergebnis als interpretierbares seismisches Volumen erhält man durch Stapelung der Common Image Gather. Die Gesamtzahl der Tomographie-Durchläufe ergibt sich aus der Multiplikation der verwendeten Horizonte (2-4) und Anzahl der Iterationen (2-3). Die Zahl der verwendeten Horizonte wird dabei kontinuierlich erhöht, beginnend bei der geringsten Tiefe (Top-Down-Ansatz) (Abbildung 41).



1. Iteration mit Schicht 1

1. Iteration mit Schicht 1+2

Abbildung 41: Allgemeine Strategie der Reflexionstomographie.

Für die Pre-Stack-Tiefenmigration (Tabelle 6) und die Reflexionstomographie (Tabelle 7) wurde die Software Reveal verwendet.

Tabelle 6: Parameter der Pre-Stack-Tiefenmigration in Reveal.

Parameter	Angewandt
Ray tracing stepper type	Adaptive
Number of & max. ray tracing take-off angle [deg.]	60,0 & 60,0
Reveal Tool	PreStackDepth
Offset-bin size [m]	50
Geometry mode	Common offset & zero azimuth
Aperture depth/radius pairs [m]	0-200/500-500/2000-2000
Derivative filter	2D
Antialiasing max. frequency [Hz]	60,0
Antialiasing filter increment [Hz]	5

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 62

Tabelle 7: Parameter der Reflexionstomographie in Reveal.

Parameter	Angewandt
Gather outer mute	Manually designed
Preprocessing	Radon, FXDecon
Moveout mode	Hyperbolic
Dip field	13-15 ms/bin
Tomography cell size	1st, 2nd, 3rd iterations: 500 m, 250m, 50 m
Smoothing preconditioner	Depth-varying
Regularization	Laplacian, top-bottom: 4000 - 4000
Top-down approach	Yes

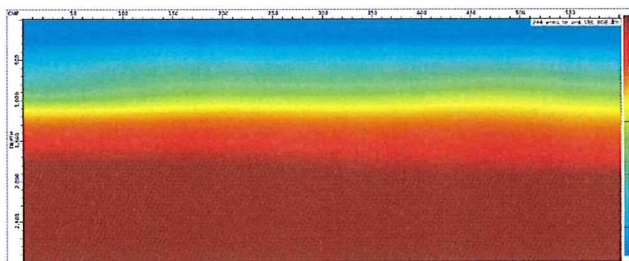
Das Ergebnis des Verfahrens ist maßgeblich von dem verwendeten Geschwindigkeits-Startmodell abhängig. Daher wurden drei verschiedene Versionen des Geschwindigkeitsmodells im Rahmen des Projekts miteinander verglichen:

- Version 1: Einfache horizontale Schichtung
- Version 2: Startmodell aus der Post-Stack-Tiefenmigration
- Version 3: Modifizierte Variante der Version 2

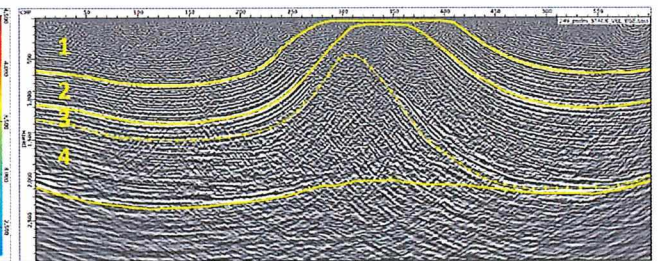
Die erzielten Ergebnisse werden beispielhaft an Version 1 und 2 präsentiert. Ziel der Untersuchung war die Verbesserung des Ergebnisses der Post-Stack-Tiefenmigration der 3D-prozessierten Daten (Abbildung 35), also des von der BGE ursprünglich bereitgestellten Ergebnisses.

Version 1: Einfache horizontale Schichtung

Der Ausgangspunkt des Ergebnisvergleichs ist jeweils die Pre-Stack-Tiefenmigration auf Grundlage des Startmodells (Abbildung 42). Im Ergebnis der Migration werden dann abweichend vom interpretierten Post-Stack-Ergebnis die Reflektoren gewählt, für die schrittweise die Reflexionstomographie durchgeführt wird.



(a) Geschwindigkeits-Startmodell



(b) Pre-Stack-Tiefenmigration mit gewählten Reflektoren

Abbildung 42: Ausgangspunkt der Reflexionstomographie (Version 1)

Das beschriebene Prinzip für die Durchführung der Reflexionstomographie wurde erfolgreich auf Grundlage des horizontal geschichteten Geschwindigkeitsmodells (Version 1) getestet (Abbildung 43). Man erkennt, dass durch den Top-Down-Ansatz Anpassungen im Geschwindigkeitsmodell zunächst im oberflächennahen Bereich erfolgen. Nach Anpassung der oberen Schicht wird die Tiefe erhöht, sodass eine höhere Plausibilität des Gesamtergebnisses erzielt wird.

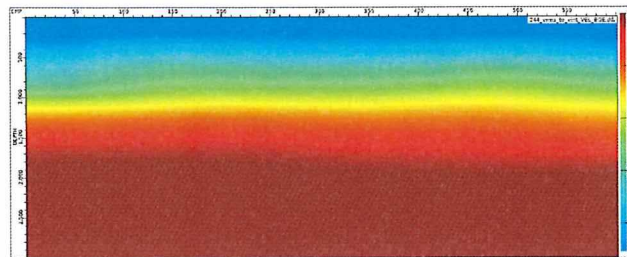
Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



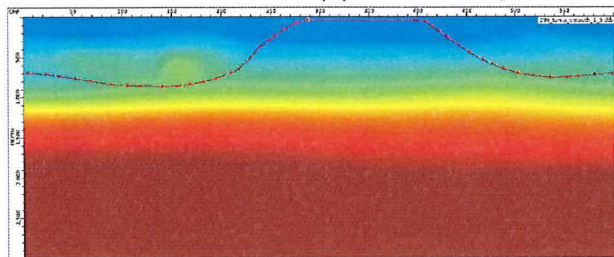
BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

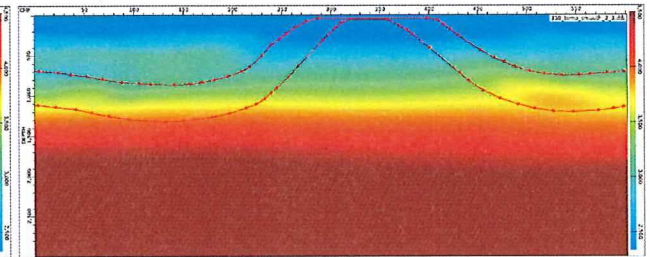
Blatt: 63



(a) Geschwindigkeits-Startmodell (Version 1)



(b) Nach 3 Iterationen mit Schicht 1.

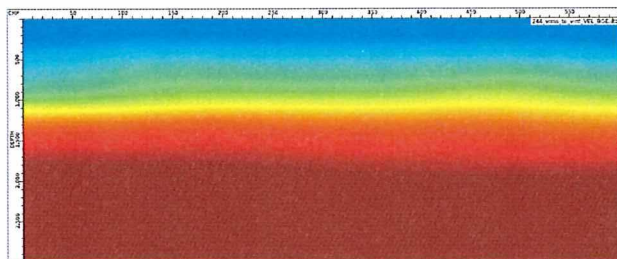


(c) Nach 3 Iterationen mit Schicht 1+2.

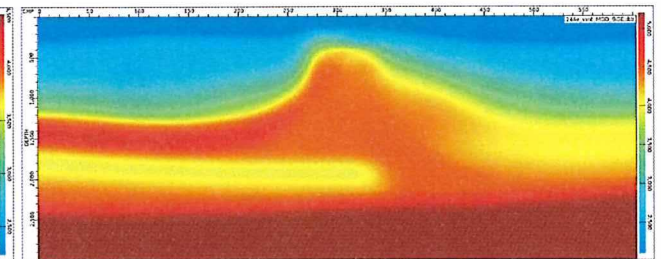
Abbildung 43: Update des Geschwindigkeitsmodells (Version 1).

Version 2: Startmodell aus der Post-Stack-Tiefenmigration

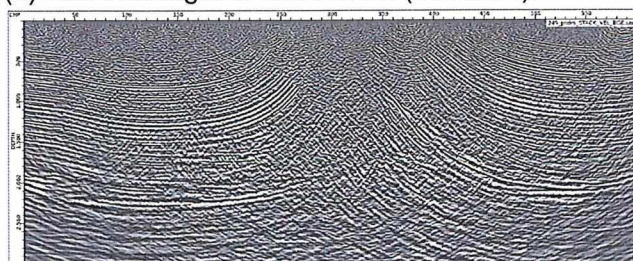
Nach der Verifizierung des Ansatzes wurde ein realistischeres Startmodell (Version 2) verwendet. Die Verbesserungen im Vergleich zu Version 1 sind dadurch bereits in den Ergebnissen der Pre-Stack-Tiefenmigration basierend auf dem jeweiligen Startmodell sichtbar (Abbildung 44). Sowohl die bekannte horizontale Schichtung der Sedimente als auch der tiefe Zechsteinreflektor sind deutlicher abgebildet. Das Ausgangsergebnis ist damit auch näher an dem Benchmark-Ergebnis der Post-Stack-Migration.



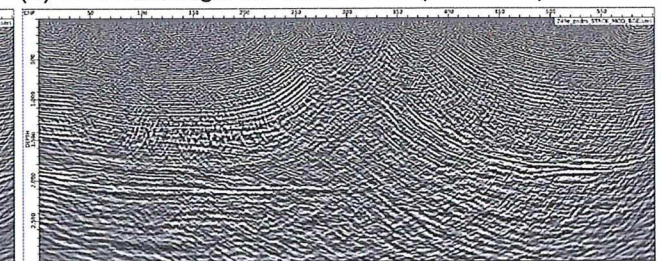
(a) Geschwindigkeits-Startmodell (Version 1).



(b) Geschwindigkeits-Startmodell (Version 2).



(c) Pre-Stack-Tiefenmigration (Version 1).



(d) Pre-Stack-Tiefenmigration (Version 2).

Abbildung 44: Vergleich der Ergebnisse der Pre-Stack-Tiefenmigration basierend auf den Startmodellen von Version 1 und 2.

Die Reflexionstomographie mit dem Startmodell Version 2 wurde mit allen vier gewählten Reflektoren

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht

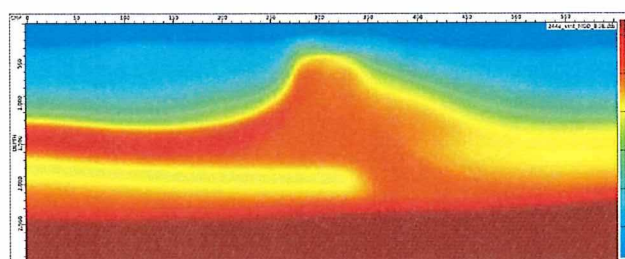


BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

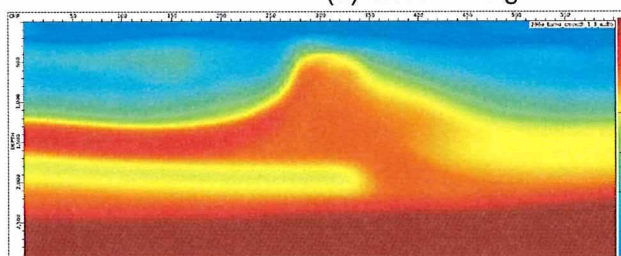
Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 64

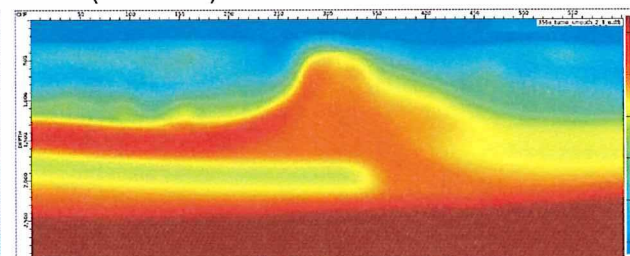
berechnet. Durch die Wahl von drei Iterationen pro Schicht ergeben sich insgesamt zwölf Iterationen bis zum finalen Ergebnis. Die Entwicklung des Geschwindigkeitsmodells (Abbildung 45) und des dazugehörigen Pre-Stack-Tiefenmigrationsergebnisses (Abbildung 46) zeigen die Ergebnisse vor der Hinzunahme einer neuen Schicht. Es ist eine schrittweise Verbesserung der Abbildungsqualität der Reflektoren in den Migrationsergebnissen erkennbar. Das Endergebnis verbessert die Kontinuität und die Schärfe aller Reflektoren verglichen mit dem Startmodell (Abbildungen 47, 48). Trotz dieser Beobachtung muss die gleichzeitige Veränderung des Geschwindigkeitsmodell kritisch hinterfragt werden. Im Verlauf der Tomographie tendiert das Modell zu einem horizontal geschichteten Modell, was den generellen Informationen über die Geschwindigkeitsverteilung im Bereich der Asse-Salzstruktur widerspricht.



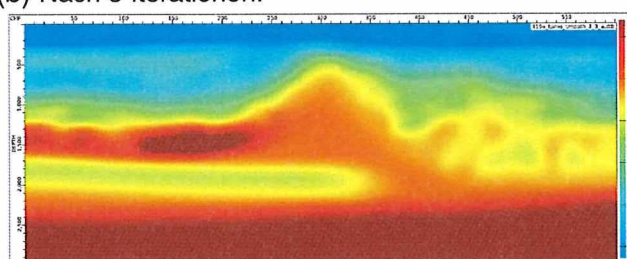
(a) Geschwindigkeits-Startmodell (Version 2).



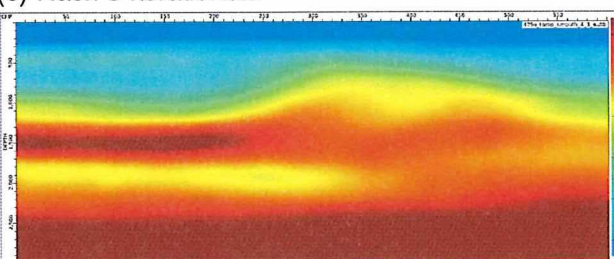
(b) Nach 3 Iterationen.



(c) Nach 6 Iterationen.



(d) Nach 9 Iterationen.



(e) Nach 12 Iterationen.

Abbildung 45: Update des Geschwindigkeitsmodells (Version 2).

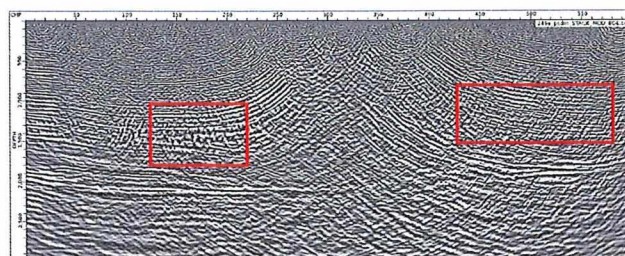
Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



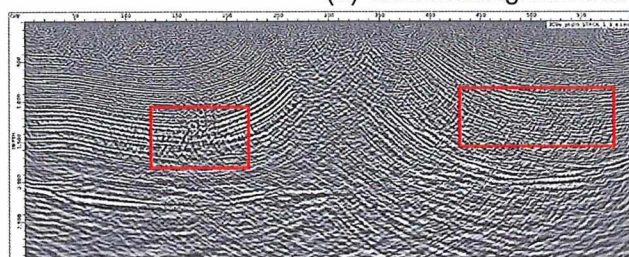
BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

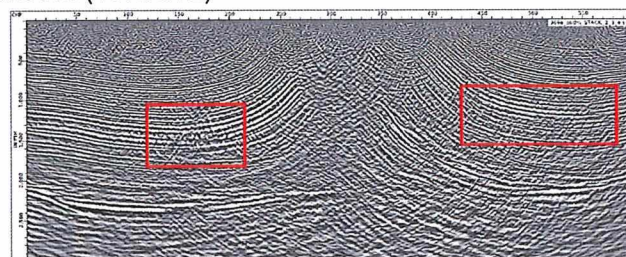
Blatt: 65



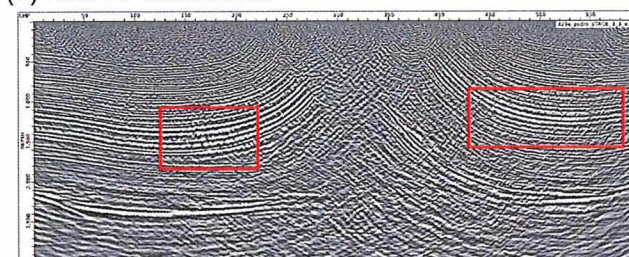
(a) Geschwindigkeits-Startmodell (Version 2)



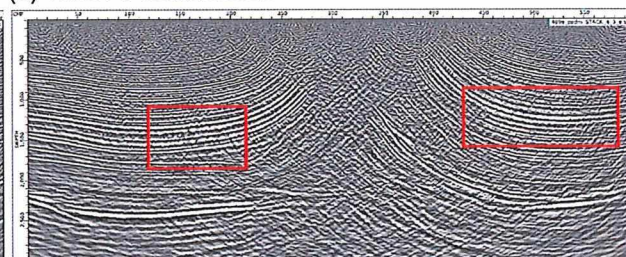
(b) Nach 3 Iterationen.



(c) Nach 6 Iterationen.

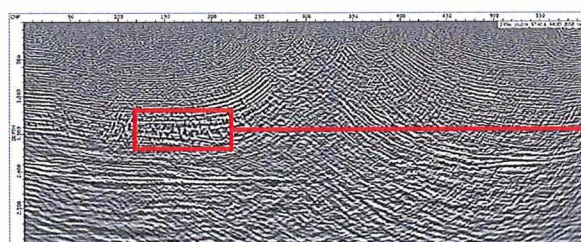


(d) Nach 9 Iterationen.

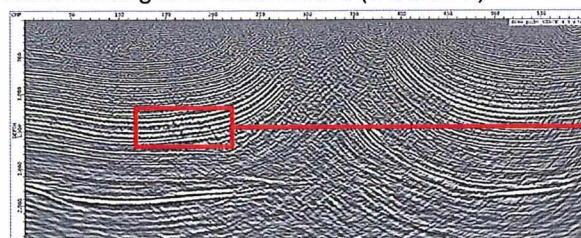
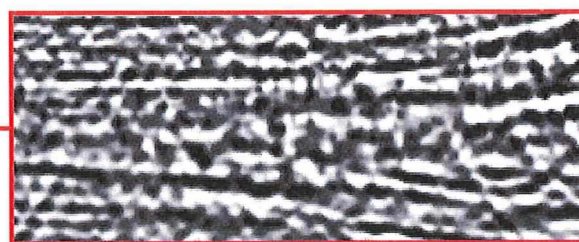


(e) Nach 12 Iterationen.

Abbildung 46: Update der Pre-Stack-Tiefenmigration (Version 2).



Geschwindigkeits-Startmodell (Version 2)



Finales Ergebnis nach 12 Iterationen

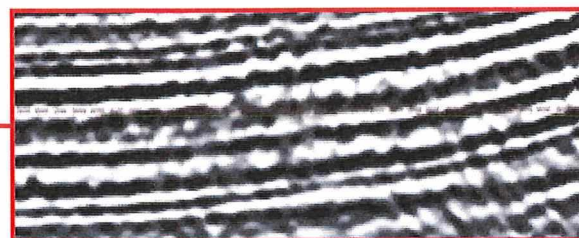


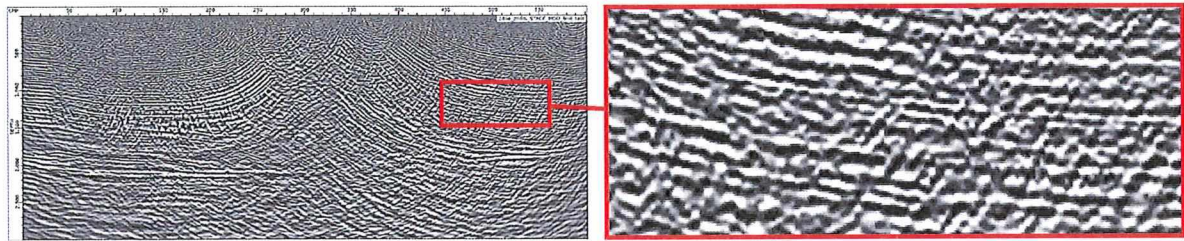
Abbildung 47: Vergleich der Pre-Stack-Tiefenmigration von Startmodell mit finalem Ergebnis (Version 2, Teil 1).

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht

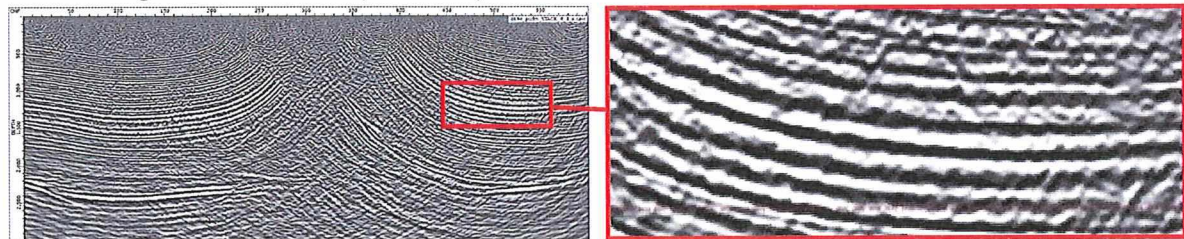


BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 66
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	64213000				HF	PH	0002	00	



Geschwindigkeits-Startmodell (Version 2).



Finales Ergebnis nach 12 Iterationen.

Abbildung 48: Vergleich der Pre-Stack-Tiefenmigration von Startmodell mit finalem Ergebnis (Version 2, Teil 2).

Der Vergleich zwischen dem Ergebnis der Reflexionstomographie für Version 2 und dem Post-Stack-Migrationsergebnis zeigt ebenfalls eine Verbesserung (Abbildung 49). Die Kontinuität der sedimentären Schichtungen für horizontale und steil gestellte Strukturen erhöht sich in der Reflexionstomographie. Der Zechsteinreflektor ist im vorgestellten Ergebnis nun auch lateral bis in den zentralen Bereich unterhalb des Salzrückens verfolgbar.

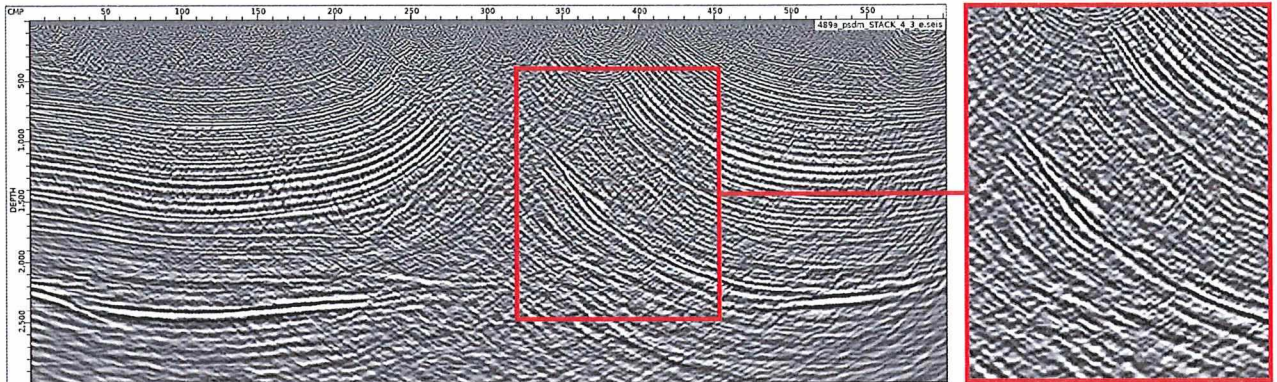
Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



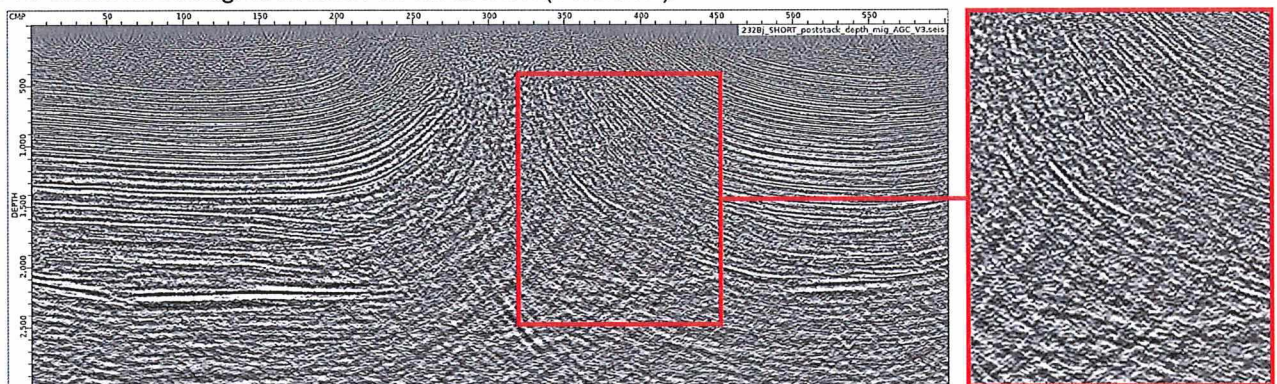
BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 67



Pre-Stack-Tiefenmigration nach 12 Iterationen (Version 2).



Post-Stack-Tiefenmigration (Benchmark).

Abbildung 49: Vergleich der finalen Pre-Stack-Tiefenmigration aus Reflexionstomographie (Version 2) mit Ergebnis aus Post-Stack-Tiefenmigration.

Version 3: Modifizierte Variante der Version 2

Für eine weitere Verbesserung der Reflexionstomographie wurde eine dritte Variante eines Startmodells bestimmt (Abbildung 50d). Dafür wurde das Ergebnis der Pre-Stack-Tiefenmigration (Abbildung 50b) aus dem Startmodell von Version 2 herangezogen (Abbildung 50a). Die für die Reflexionstomographie gewählten Reflektoren im Migrationsergebnis dienten nun als Horizonte für den Aufbau des neuen Startmodells (Version 3, Abbildung 50c). Den einzelnen Einheiten wurden konstante Geschwindigkeitswerte zugewiesen. Abschließend wurde das Modell geglättet (Abbildung 50d).

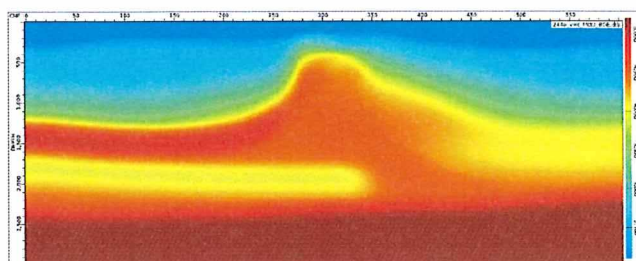
Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



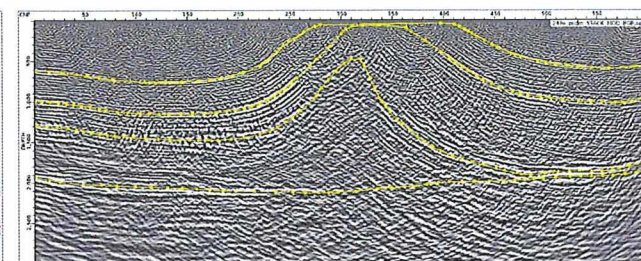
BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

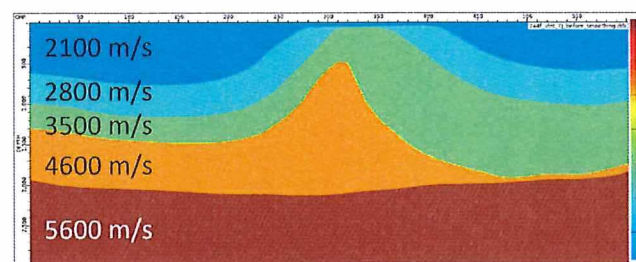
Blatt: 68



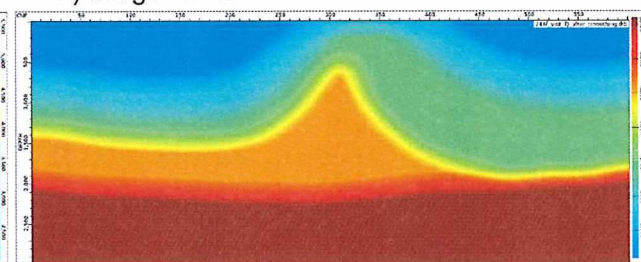
(a) Geschwindigkeits-Startmodell (Version 2)



(b) Pre-Stack-Tiefenmigration mit Startmodell (Version 2) mit gewählten Reflektoren.



(c) Geschwindigkeits-Startmodell (Version 3)



(d) Geschwindigkeits-Startmodell (Version 3) + Glättung

Abbildung 50: Erstellen des Geschwindigkeitsmodells Version 3.

Schlussfolgerungen

Die Reflexionstomographie wurde mit unterschiedlichen Versionen eines initialen Geschwindigkeitsmodells durchgeführt. Daraus wurden jeweils finale Pre-Stack-Tiefenmigrationen berechnet, die mit dem Ausgangsergebnis der Post-Stack-Tiefenmigration verglichen wurden. Es zeigte sich, dass die Geschwindigkeitsupdates in der Tomographie stark von dem verwendeten Startmodell und den interpretierten seismischen Horizonten abhängen. Die Version 2 des Startmodells führt zu einer deutlichen Verbesserung des Migrationsergebnisses im Vergleich zu dem aus dem 3D-Volumen extrahierten Ergebnis der Post-Stack-Tiefenmigration.

6.3 Wellenfeldinversion (FWI)

Das Prinzip der FWI basiert auf der Simulation seismischer Daten anhand eines vorgegebenen Erdmodells unter Verwendung der im Feld genutzten Messkonfiguration. Die durch die Modellierung basierend auf finiten Differenzen (FD) simulierten Daten werden im Anschluss mit den gemessenen Felddaten verglichen – Abweichungen zwischen den Datensätzen werden dabei auf ein fehlerhaftes Erdmodell zurückgeführt. Anhand der Differenz der Datensätze kann nun durch einen rechenintensiven Algorithmus das Erdmodell verbessert werden. Dieser Prozess der Simulation seismischer Daten, des Vergleichs mit Felddaten und die Aktualisierung des Erdmodells wird wiederholt, bis die Differenz zwischen simulierten Daten und Felddaten möglichst klein und damit das ermittelte Erdmodell möglichst gut ist. Im Gegensatz zur klassischen Laufzeitomographie nutzt FWI dabei nicht nur die Laufzeiten der seismischen Wellen (Phase), sondern auch deren Wellenformen, so dass in einem geeigneten Zeitfenster bis zu einer bestimmten Frequenz eine möglichst gute Übereinstimmung der Daten in Phase und Amplitude erzielt wird. Die im Rahmen dieses Projektes erzielten Fortschritte der FWI sind in diesem Kapitel aufgeführt.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 69

6.3.1 Vorstudien

In Vorbereitung der 3D-FWI wurden einige Vorstudien durchgeführt, die im Folgenden beschrieben sind.

6.3.1.1 Seismische Modellierung

Da der Fluideintrag eine entscheidende Rolle für die Integrität des Endlagers spielt, wurde die Asse-Geologie entlang der Südflanke der Salzstruktur, die mit potenziellen Fluidwegen in Zusammenhang steht, untersucht. Die vorherrschende Hypothese besagt, dass Fluide von der Spitze des Salzstocks durch die etwa 16 Meter dicke, fragmentierte Röt-Anhydrit-B-Formation in die Mine gelangen. Mithilfe von Modellierungen wurde untersucht, wo sich Änderungen in den Eigenschaften dieser Formation in den aufgezeichneten seismischen Daten an der Oberfläche zeigen würden. Um den Einfluss der Röt-Anhydrit-B-Formation auf die seismischen Daten zu verstehen, wurden außerdem mehrere geologische Modelle erstellt und zur Simulation seismischer Daten mithilfe der FD-Methode verwendet. In einem letzten Schritt wurden die migrierten Felddaten analysiert und auf mögliche Signaturen überprüft, die den in den synthetischen Studien beobachteten Effekten ähneln.

Bei der Untersuchung der komplexen Salzstruktur der Asse stellte sich unter anderem die Frage, ob auf Grund der starken Neigung der Schichten möglicherweise keine Signale vom Röt-Anhydrit-B-Reflektor im Bereich der Südflanke die Oberfläche erreichen. Um diese Frage zu beantworten, wurde das Konzept des explodierenden Reflektors verwendet, das einen systematischen Ansatz zum Verständnis des Verhaltens seismischer Wellen bietet. In einem Modell werden seismische Quellen in engen Abständen entlang der gesamten interessierenden Grenzfläche, in diesem Fall des Röt-Anhydrit-B-Reflektors, platziert. Die daraus resultierenden seismischen Daten liefern Einblicke in das Verhalten von Wellen bei ihrer Interaktion mit den geologischen Strukturen, analog zum Verhalten einer ebenen Welle. Für diesen Test wurden insgesamt 3532 Quellen entlang der Röt-Anhydrit-B-Schicht auf der Südflanke platziert. Das erstellte Modell entspricht XL 1545 (Abbildung 51).

Der Test mit dem explodierenden Reflektor ermöglicht, die Zero-Offset-Ausbreitung seismischer Wellen zu betrachten und Einblicke in das Verhalten von Wellen im Modell zu erhalten. Abbildung 52 zeigt zwei Zeitschritte: Der erste entspricht der Ausbreitung der P-Welle, die unmittelbar nach der Aktivierung der Quellen auftritt. Insbesondere zeichnet der Empfänger in der Nähe der Achse der Antiklinale in Richtung der südlichen Flanke das Signal zuerst auf. Anschließend tritt eine Reflexion an der Oberfläche auf, was zu einer Verringerung der Amplitude aufgrund negativer Interferenzen mit nachfolgenden Reflexionen führt. In Bereichen, in denen der Reflektor nahezu vertikal ist, sind die in der vertikalen Komponente aufgezeichneten Amplituden niedrig, da sich die Energie überwiegend horizontal ausbreitet. In Anbetracht der Polarisierung der Wellen in dieser Konfiguration zeichnet die vertikale Komponente in diesem Bereich nur minimale Energie auf.

Der zweite Zeitschritt zeigt das Eintreffen fast aller Zero-Offset-Reflexionen der P-Welle an der Oberfläche. Mit diesem Test kann beobachtet werden, dass Zero-Offset-Signale von jedem Teil des abfallenden Reflektors für Empfänger erwartet werden können, die etwa 1000 m horizontal von der Antiklinalachse entfernt platziert sind. Empfänger, die weiter von der Achse entfernt platziert sind, würden hauptsächlich Zero-Offset-Reflexionen von Teilen des Röt-Anhydrit-B Reflektors aufzeichnen, die weiter von der Antiklinalstruktur entfernt sind, d.h. dort, wo die Schicht nahezu horizontal ist.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 70

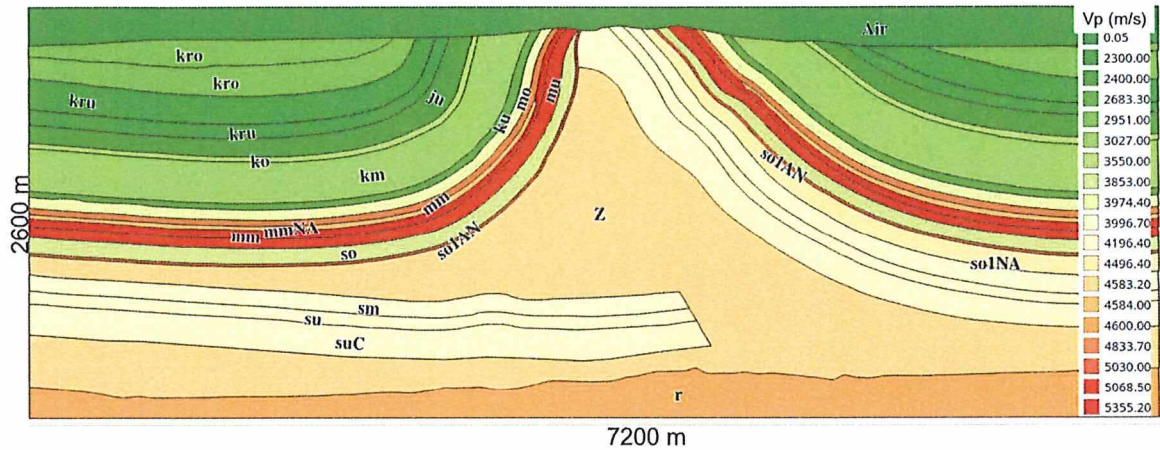


Abbildung 51: Erstelltes Modell für XL 1545.

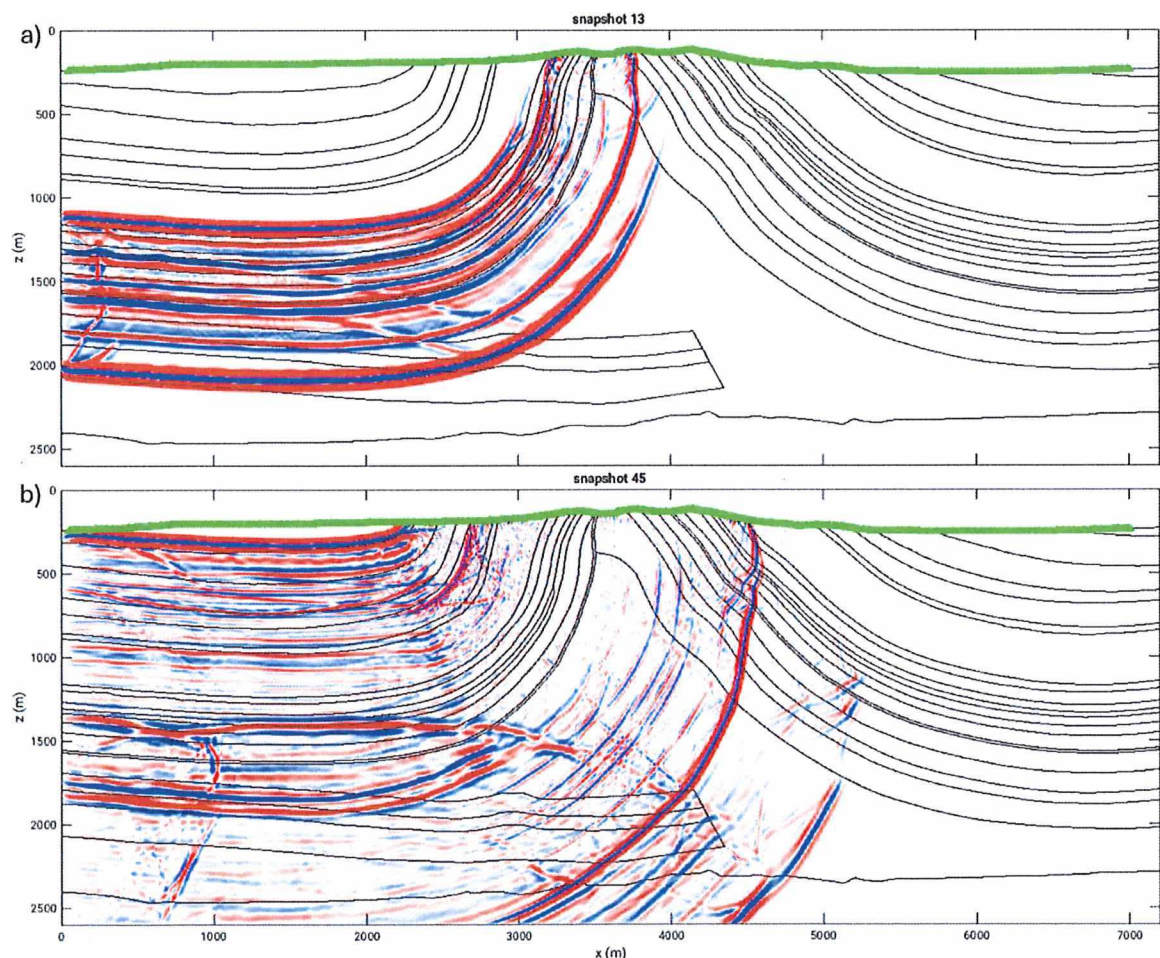


Abbildung 52: Wellenausbreitung zu zwei Zeitschritten für einen sogenannten Explodierenden-Reflektor-Test für die Röt-Anhydrit-B-Schicht entlang XL 1545. Gezeigt ist die Vertikalkomponente des Wellenfeldes.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 71

6.3.1.2 2D-akustische Wellenfeldinversion mit synthetischen Daten

Unter Verwendung der von der BGE bereitgestellten Daten wurde ein Untergrundmodell entwickelt (Abbildung 51), das für Rekonstruktionstests mit der 2D-akustischen FWI verwendet wurde. Ein Startmodell wurde durch Glättung des Referenzmodells erstellt. Es wurden Tests der Inversionsparameter durchgeführt sowie die Schussanzahl und Empfängergeometrie untersucht. Außerdem wurde die Anwendung von Zeitfenstern betrachtet. Die Ergebnisse der Inversionstests zeigen eine erfolgreiche Rekonstruktion des vorgegebenen Modells und sind Grundlage für die weitere Anwendung der akustischen Inversion auch in 3D.

Das erstellte Modell (Abbildung 53) hat die Dimensionen 6000 m x 1700 m sowie einen Gitterpunktabstand von 2 m. Die Simulationszeit beträgt 2.5 s mit einer zeitlichen Abtastung von 0,1 ms. Es wurden 595 Empfänger zwischen den Koordinaten 30 m und 5970 m in 10 m-Abständen platziert. Die Abstände zwischen den Quellen wurden zwischen 58 m und 300 m (103 bzw. 20 Quellen) variiert. Als Quellsignal wurde ein Ricker-Signal mit 6 Hz Zentralfrequenz verwendet. Bei der Inversion wurde ein Tiefpassfilter in 2 Hz-Schritten zwischen 5 und 12 Hz angewandt.

In Abbildung 54 sind die Ergebnisse für die getesteten Schussgeometrien mit und ohne Anwendung von Zeitfenstern dargestellt. Die Schussanzahlen der gezeigten Ergebnisse sind 20, 60 und 103. Die Inversionen mit Zeitfenster zeigen eine schlechtere Modellrekonstruktion als die Inversionen ohne Zeitfenster. Die Qualitätssteigerung der zeitgefensterten Inversionen aufgrund einer höheren Schusszahl ist allerdings deutlicher als bei den Inversionen ohne Zeitfenster.

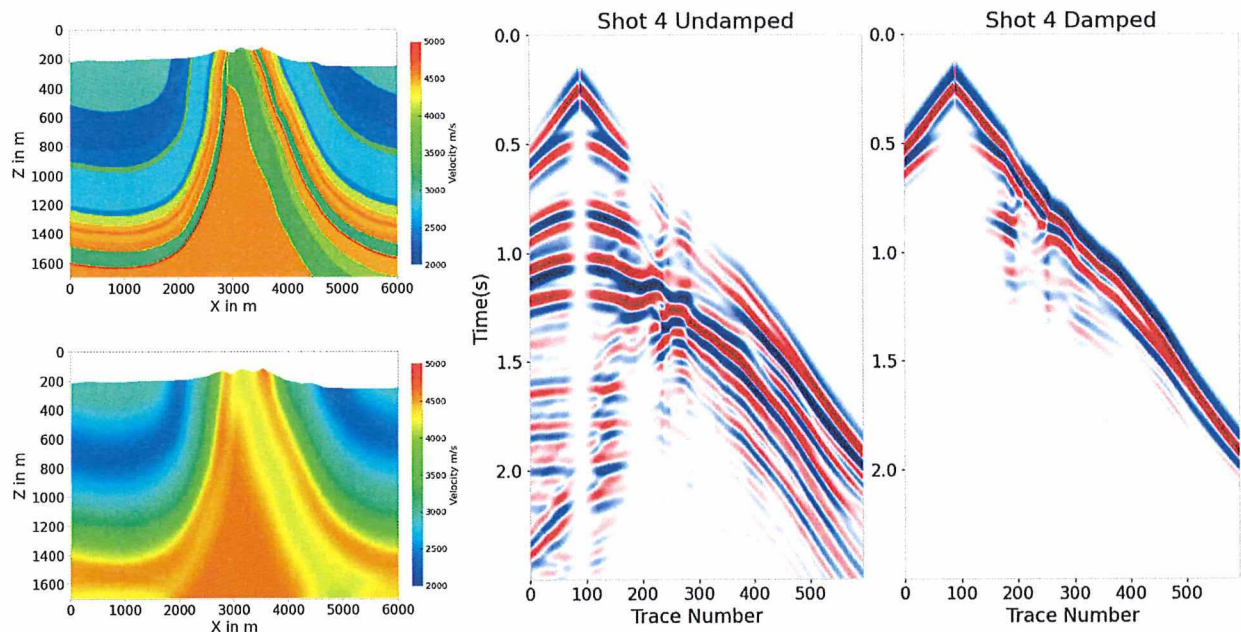


Abbildung 53: Wahres Modell (links oben) und Startmodell (links unten) für die synthetischen, akustischen 2D-FWI-Auflösungstests. Modellierter Daten ohne und mit Zeitfenster (rechts).

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 72

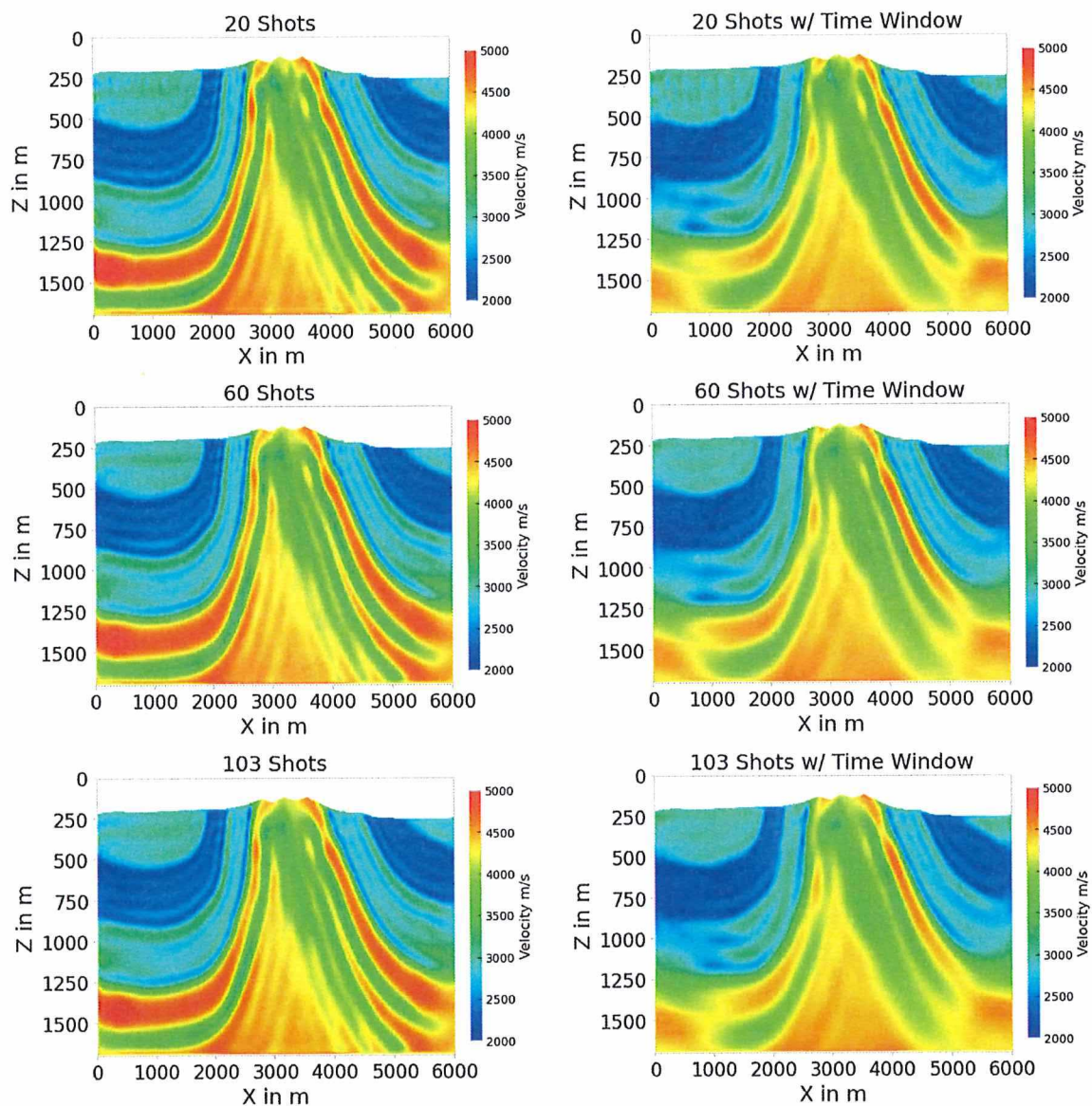


Abbildung 54: Geometrie-Tests (obere Reihe 20 Schüsse, mittlere Reihe 60 Schüsse, letzte Reihe 103 Schüsse) sowie Vergleich der Inversionsergebnisse ohne und mit Zeitfenster (links bzw. rechts) mit akustischer 2D-FWI.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 73

6.3.2 Tests mit 3D-Felddaten

Als eines der Hauptprojektziele war Arbeitspaket 3 (AP3) des Projektantrags ausgemacht worden. In diesem geht es um die Verwendung des Asse 3D-Datensatzes bzw. eines adäquaten 3D-Teilgebietes aus dem Asse 3D-Datensatz zur Rekonstruktion der elastischen Parameter. Diese Arbeiten wurden mit großer Priorität Anfang 2024 angegangen. Aus Gründen der Rechenkapazitäten wurden alle Tests, wie in den regelmäßigen Projekttreffen gemeinsam beschlossen, akustisch durchgeführt. Die bisherigen Arbeiten zu diesem Arbeitspaket sind im Folgenden erläutert.

6.3.2.1 Auswahl des Untersuchungsgebiets

Der 3D-Seismik-Datensatz umfasst ein Gebiet von ca. 40 km² mit 36.137 Schusspositionen und 44.677 Empfängerpunkten. Selbst mit einem sehr groben Gitter von 10 m Gitterpunktabstand musste das Gebiet stark beschränkt werden, um es auf lokalen Rechenkapazitäten in realistischen Zeiten rechnen zu können. Ausschlaggebend für die Auswahl des Teilgebietes war, den geologisch interessantesten Bereich rund um den neu geplanten Rückholschacht abzudecken, die Eigenschaften des Datensatzes mit seinen für die FWI nützlichen großen maximalen Offsets ausnutzen zu können und die Nähe zu zusätzlichen Datenquellen wie Bohrlochdaten für die Qualitätskontrolle des FWI-Updates zu haben. Die Tests wurden somit auf einem Streifen durchgeführt, der sich in voller Länge in südwestlich-nordöstlicher Richtung über das Messgebiet erstreckt und eine Länge von 7590 m hat (*Inline*-Bereich 991 - 2510). In der Breite wurde das Gebiet jedoch stark eingeschränkt und deckt lediglich einen Bereich von 1 km ab (*Crossline*-Bereich 1540 - 1739; siehe Abbildung 55). Es umfasst in etwa 1/5 des Gesamtgebietes.

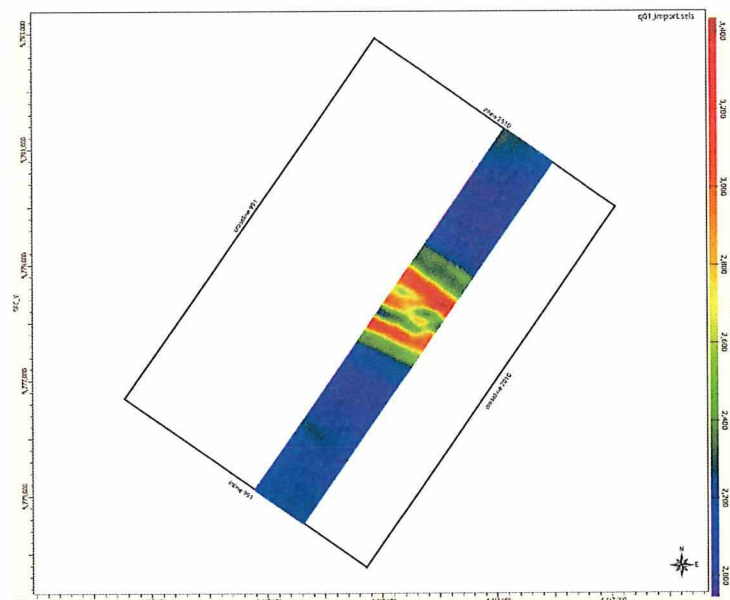


Abbildung 55: Farbkodiert ist der Tiefenschnitt bei NN des für die FWI-Tests gewählten Gebietes. Zur Referenz ist das gesamte Messgebiet schwarz umrandet dargestellt.

Trotz der räumlichen Beschränkung des Untersuchungsgebiets befinden sich im Innern dieses Teilgebietes immer noch 7177 Schüsse (Abbildung 56 a). Da bei der FWI jeder Schuss einzeln modelliert werden muss, hätte dies weiterhin einen zu großen Rechenaufwand dargestellt. Zunächst wurden Schüsse und Empfänger in einem Abstand von weniger als 100 m vom Rand des Modells aussortiert, da bei der FD-Simulation ein Dämpfungsbereich entlang des Randes gesetzt werden muss, um

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 74

Reflexionen vom Modellrand zu vermeiden. Für erste Tests wurden im Folgenden 18 Schüsse, die gleichmäßig über das Testgebiet verteilt sind, extrahiert (Abbildung 56 c). Da die Anzahl an Empfängern keinen zusätzlichen Rechenaufwand bedeutet, wurden alle etwa 8000 Empfänger des jeweiligen Schusses benutzt. Damit konnte selbst bei einer geringen Anzahl von lediglich 18 Schüssen eine gute Durchleuchtung des Modells erreicht werden. Nachdem der FWI-Code um die Option zufälliger Schussauswahl erweitert worden war (*random shot selection*), wurden die Schüsse für weitere Tests auf ein 100 m x 100 m Gitter begrenzt, was eine Anzahl von 255 Schüssen für die Zufallsauswahl ergab (Abbildung 56 b).

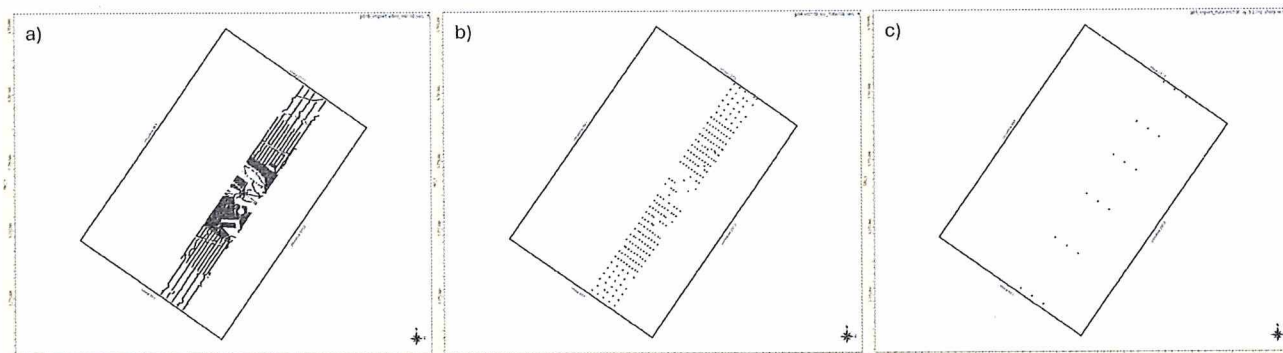


Abbildung 56: a) Positionen aller Schüsse im Untersuchungsgebiet, b) nach Beschränkung auf ein 100 m x 100 m Grid und c) 18 gleichmäßig verteilte Schüsse.

6.3.2.2 Datenvorbereitung

Zunächst wurde mit den Rohdaten gearbeitet. In späteren Tests wurde Rauschunterdrückung in Schussortierung durchgeführt, um zu untersuchen, ob einige Artefakte, die in den Modell-Updates beobachtet wurden, auf Störsignale in den Felddaten zurückzuführen sind. Für die Störsignalunterdrückung wurde der Bearbeitungsprozess in der Schussortierung benutzt, der auch für die Prozessierung der Felddaten vor der Migration durch Geofizyka Toruń benutzt und von der BGE bereitgestellt wurde. Weitere Prozessierungsschritte zur Rauschunterdrückung konnten aus dem Datenprozessierungsablauf von Geofizyka Toruń nicht übernommen werden, da sie in Empfänger- oder *Crossspread*-Sortierung das Einlesen aller Daten erforderlich gemacht hätten und nicht nur des ausgewählten Bereichs. Stattdessen wurde ein weiterer Schritt zur Störsignalunterdrückung in der Schussortierung hinzugefügt und ein F-K-Filter angewendet. Bei all diesen Prozessen wurde sichergestellt, dass sie die Wellenform nicht verändern. Im Rahmen der Störsignalunterdrückung wurden auch Spuren, die während der Prozessierung von der BGE als untauglich befunden wurden, entfernt (*Trace Edits*). Statische Korrekturen wurden nicht angewendet, da erwartet wird, dass die FWI die für die statischen Korrekturen verantwortlichen Effekte im flachen Untergrund auflösen kann. Abbildung 57 zeigt eine Empfängerlinie eines ausgewählten Schusses vor und nach der Rauschunterdrückung sowie deren Differenz (ohne F-K-Filter).

Sowohl die Daten mit Störsignalunterdrückung als auch die ohne durchliefen anschließend denselben Bandpassfilter (2 Hz / 90 dB - 100 Hz / 96 dB) und wurden um den gleichen Zeitversatz (9 ms) verschoben wie das Quellsignal (5). Dies ist entscheidend, um die Ähnlichkeit zwischen modellierten und Felddaten zu erhöhen und keinen Trend in das Modell-Update zu injizieren sowie die STFI zur Anpassung des Quellsignals an die Felddaten nur möglichst geringfügig in Anspruch zu nehmen.

Des weiteren wurden verschiedene Zeiten bestimmt, mit denen die Seismogramme auf bestimmte Datenausschnitte eingeschränkt werden können (Zeitfensterung). Die übliche Vorgehensweise bei

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 75

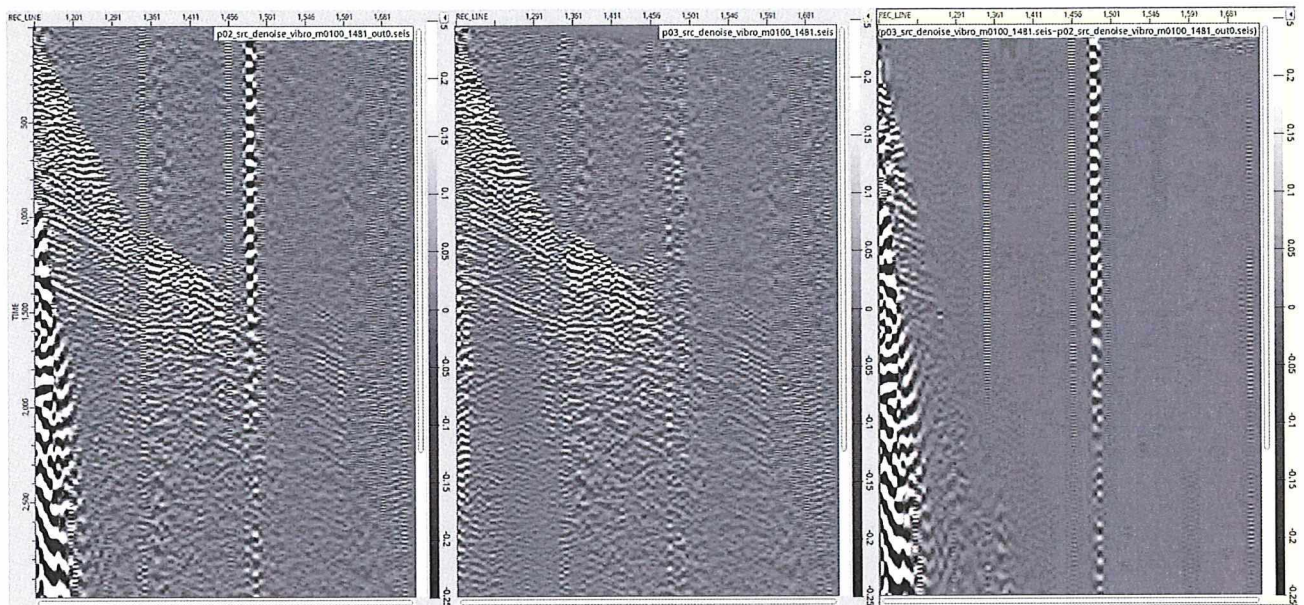


Abbildung 57: Seismogramm in Schusssortierung vor (links) und nach Störsignalunterdrückung (Mitte) sowie deren Differenz (rechts).

der FWI ist, sich zunächst auf die Tauchwellen zu beschränken und mit ihnen das Modell-Update im oberflächennahen Bereich zu verbessern. In späteren Iterationen lässt man sukzessive später ankommende Wellenzüge mit in das Modell-Update einfließen. Über diese Zeitfensterung wurde auch der Bereich der genutzten Schuss-Empfänger-Abstände eingeschränkt.

6.3.2.3 Startmodelle

Mehrere Geschwindigkeitsmodelle standen als mögliche Startmodelle für die FWI zur Verfügung, wobei alle auf den bereits in Kapitel 6.3.2.1 beschriebenen Modellausschnitt *Crossline*-Bereich 1540 - 1739 und *Inline*-Bereich 991 - 2510 beschränkt wurden. Zunächst gab es das Geschwindigkeitsmodell von Geofizyka Toruń, das im Rahmen der Prozessierung und Tiefenmigration erstellt und von der BGE zur Verfügung gestellt wurde. Dies war ein detailarmes, für strahlenwegbasierte Migration ausgelegtes Modell. Da die Migration Anisotropie berücksichtigte, existierten hierfür neben dem V_p -Geschwindigkeitsmodell auch Epsilon-, Delta- und Dip-Modelle.

Des Weiteren wurde von den Kollegen der TUBAF ein tomographisches V_p -Geschwindigkeitsmodell berechnet und zur Verfügung gestellt (Kapitel 6.1). Das Tomographiemodell hat eine hohe Auflösung und wurde nach dem Einlesen auf den gesamten für die FWI benötigten Modellbereich durch lineare Extrapolation erweitert und leicht geglättet.

Von den Kollegen der TUBAF wurde für die FVM ein weiteres Modell erstellt, bei dem das Tomographiemodell, das gerade im oberflächennahen Bereich eine sehr hohe Auflösung aufweist, mit dem ursprünglichen Migrationsgeschwindigkeitsmodell von Geofizyka Toruń zusammengeschnitten wurde (Abbildung 58 c).

Da dieses Geschwindigkeitsmodell für die FVM verwendet wurde (siehe Kapitel 7.1.1), wurde es zunächst auch als Startmodell für die FWI benutzt, um die dabei erzielten Modellverbesserungen über eine Migration direkt mit den bisherigen Ergebnissen vergleichen und bewerten zu können.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 76
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	64213000				HF	PH	0002	00	

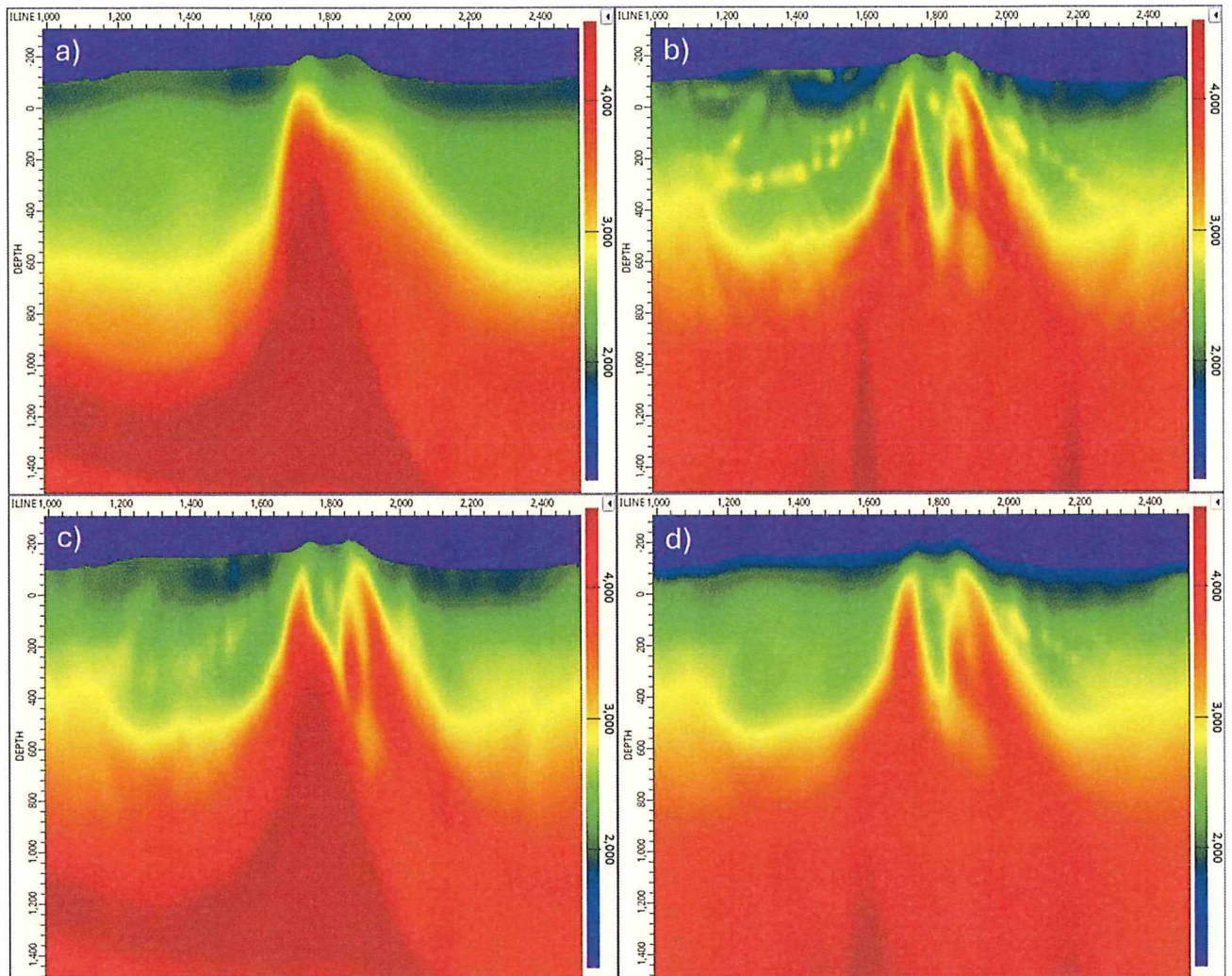


Abbildung 58: Schnitt entlang Crossline 1642 durch die zur Verfügung stehenden Startmodelle a) Migrationsmodell von Geofizyka Toruń, b) Tomographiemodell von TUBAF, c) Mergemodell von TUBAF und d) Mergemodell von KIT.

Eine durchgeführte eingehende Untersuchung der V_p -Geschwindigkeitsmodelle zeigte jedoch, dass die Datenanpassung bei keinem der bisher erwähnten Modelle für die FWI optimal war. Abbildung 59 zeigt die Datenanpassung am Beispiel eines Schusses südöstlich des Assehügels für die zuvor erwähnten Geschwindigkeitsmodelle, wobei die modellierten Daten in Wiggle-Darstellung und die Felddaten in Farbdarstellung aufgetragen sind. In Abbildung 59 a) ist zu erkennen, dass das Migrationsmodell von Geofizyka Toruń große Probleme hat, die großen Schuss-Empfängerabstände adäquat zu erklären, während die kleinen Abstände gut angepasst sind. Im Gegensatz dazu kommt in dem Tomographiemodell die erstankommende Welle bei den kleinen Abständen zu spät an, was auf zu niedrige Geschwindigkeiten im oberflächennahen Bereich des Modells hindeutet. Die großen Schuss-Empfängerabstände zeigen hingegen eine gute Übereinstimmung (Abbildung 59 b). Das kombinierte Geschwindigkeitsmodell (Abbildung 59 c) ist im Bereich dieses Schusses eine ungünstige Kombination der Modelle. Es erzeugt weder für die kleinen noch für die großen Schuss-Empfängerabstände eine gute Anpassung der Ersteinsätze. Nordöstlich der Asse-Struktur ist der Effekt weniger stark ausgeprägt und die Datenanpassung ist ausreichend, um als Startmodell für die FWI zu dienen.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 77
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	64213000				HF	PH	0002	00	

Bei der Betrachtung der Modelle und deren Datenanpassung ist zu berücksichtigen, dass die Analyse der Daten gezeigt hat, dass ein hohes Maß an Anisotropie im Bereich der Asse-Struktur vorliegt. Diese wurde bei der Erstellung des Migrationsmodells von Geofizyka Toruń berücksichtigt, während für die Tomographie sowie die 3D-Modellierung in Abbildung 59 a) - d) und die FWI aufgrund der beschränkten Rechenkapazitäten die Annahme isotroper Wellenausbreitung gemacht wurde. Dies bedeutet, dass die Migrationsgeschwindigkeiten bei isotroper Betrachtung tendenziell fehlerhaft sind, während die Geschwindigkeiten in den tomographiebasierten Modellen den durch die Isotropiebetrachtung eingeführten Fehler mit entsprechenden Geschwindigkeiten korrigieren. Eine ausführlichere Betrachtung ist Kapitel 6.3.2.5 zu entnehmen.

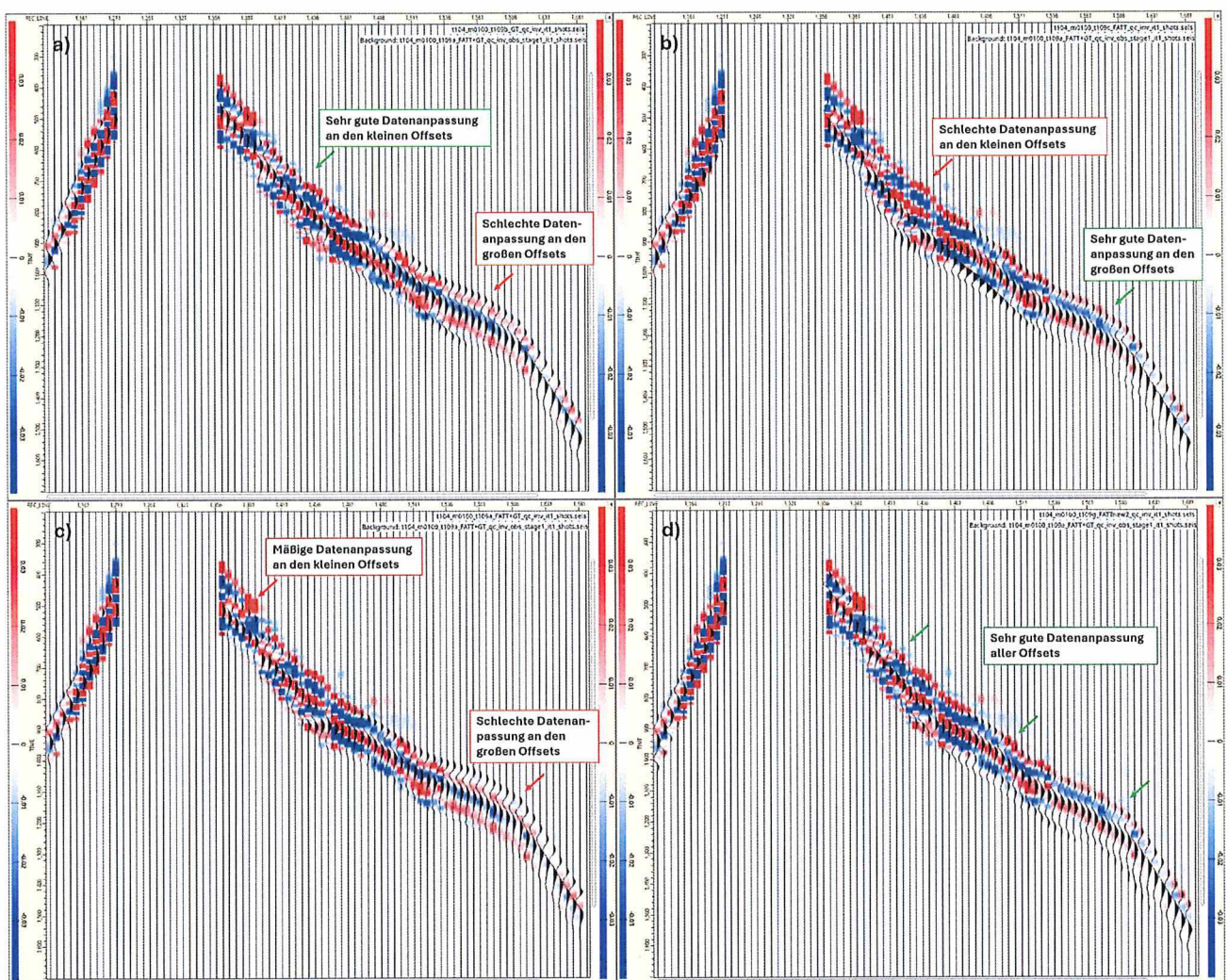


Abbildung 59: Modellerte Daten (Wiggle-Darstellung) und Felddaten (Farbdarstellung) für die zur Verfügung stehenden Startmodelle: das Migrationsmodell von Geofizyka Toruń (a), das Tomographiemodell von TUBAF (b), das FVM-Migrationsmodell von TUBAF (c) und das von KIT erzeugte Startmodell (d).

Aus der Analyse der verschiedenen Modelle wurde ein weiteres Modell gebaut, welches ein Zusammenschchnitt aus dem Migrationsmodell von Geofizyka Toruń und dem FVM-Modell von TUBAF ist. Zusätzlich wurde die Geschwindigkeit in den ersten 50 m heruntergesetzt. Dies zeigte die beste Datenanpassung bei den erstankommenden Wellen über den gesamten Modellausschnitt sowohl für kleine als auch große Schuß-Empfängerabstände.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 78

Das Dichtemodell jedes dieser Modelle wurde über die Gardner-Beziehung mit $\rho = 256 \cdot V_p^{0,25}$ bestimmt und deutlich stärker geglättet als die Geschwindigkeitsmodelle, da es nicht über die FWI verbessert werden sollte und keinen zu starken Einfluss auf die Verbesserung des Geschwindigkeitsmodells nehmen sollte.

6.3.2.4 FWI-Tests am Asse 3D-Datensatz

Für die ersten FWI-Tests wurden 18 Schüsse, wie in Abbildung 56 c) gezeigt, ausgewählt. Mit dieser geringen Zahl war eine realistische Rechenzeit bei gleichzeitig guter Untergrunddurchleuchtung ermöglicht. Als Startmodell diente das erweiterte Tomographiemodell, das einen Gitterabstand von 5 m hatte, und somit eine Größe von $1520 \times 200 \times 360$ Gitterpunkten (Abbildung 58 c). Mit diesem Setup konnten erste Parametertests durchgeführt sowie Erkenntnisse zu der Genauigkeit des Startmodells und Lehren für das weitere Vorgehen gewonnen werden. Die Inversion benötigte auf 192 Kernen eine Rechenzeit von etwa 4,4 h pro Iteration. Abbildung 60 zeigt für einen dieser Tests Tiefenschnitte durch (a) das Startmodell, (b) das Inversionsergebnis nach 5 Iterationen sowie (c) die Änderung des Modells. In die Inversion sind Frequenzen von 5 Hz bis 10 Hz eingeflossen.

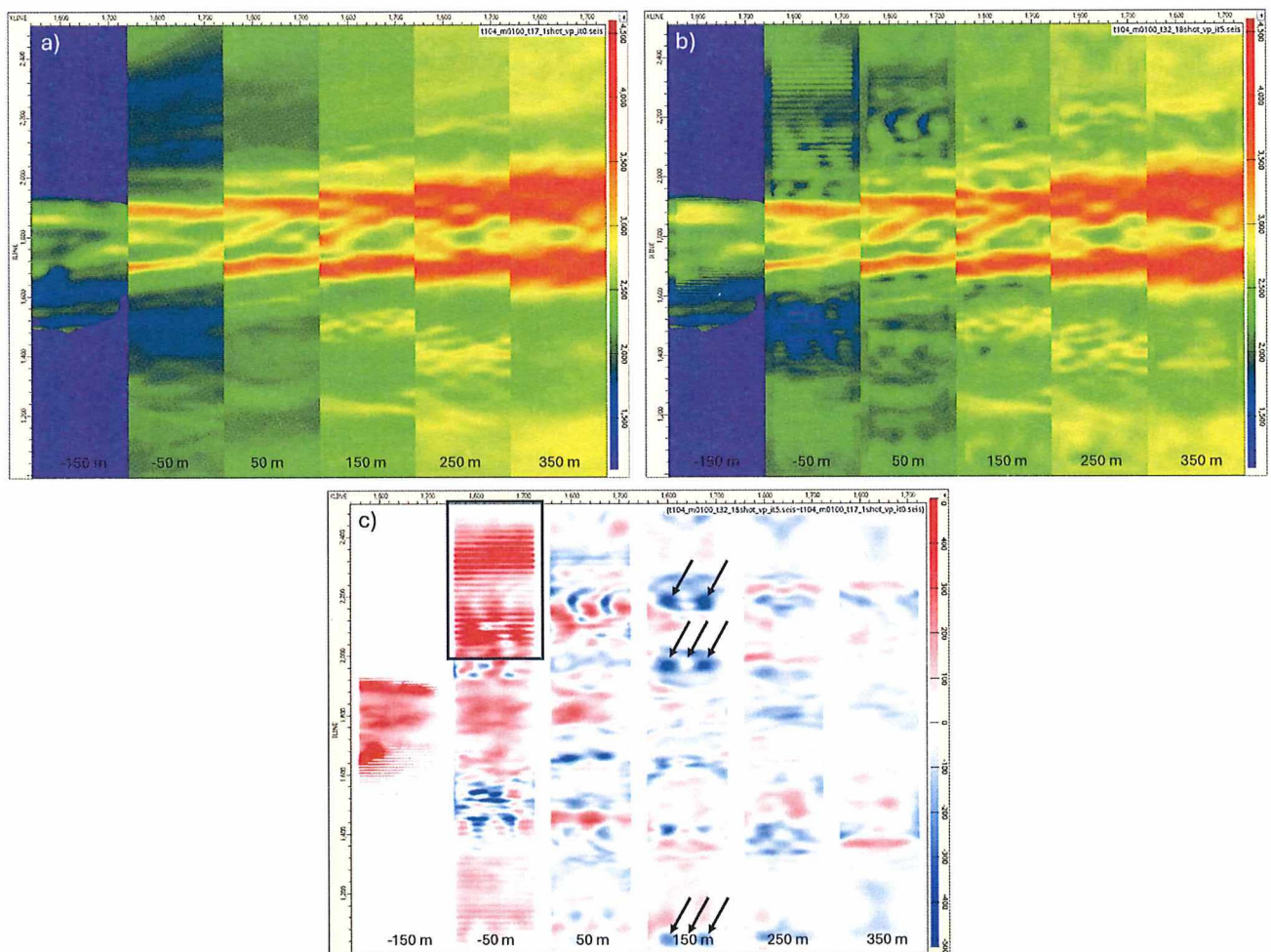


Abbildung 60: Tiefenschnitte durch das a) v_P -Startmodell, b) v_P -Geschwindigkeitsmodell nach 5 Iterationen für einen Test mit 18 Schüssen und c) deren Differenz.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 79

Aus Abbildung 60 c) ist zu erkennen, dass die FWI den oberflächennahen Bereich deutlich um bis zu 500 m/s schneller macht. Allerdings ist in der Differenz auch deutlich ein Akquisitionsabdruck von Schüssen (schwarze Pfeile) und Empfängern (schwarze Box) zu erkennen. Der Abdruck der Schüsse ließe sich durch Nutzen einer größeren Zahl an Quellpositionen verringern. Das Unterdrücken des Abdrucks der Empfängerlinien ist schwieriger zu beheben, da diese für alle Schüsse gleich sind.

Um den Akquisitionsabdruck der Schüsse zu verringern, wurde neben der einfachen Hinzunahme weiterer Schusspositionen, die die Rechenzeit deutlich erhöhen würden, der FWI-Code um die Möglichkeit einer zufälligen Auswahl an Schüssen pro Iteration erweitert. Dies garantiert eine vergleichsweise geringe Rechenzeit pro Iteration entsprechend der Anzahl an Schüssen, die pro Iteration genutzt werden sollen, während gleichzeitig eine große Anzahl unterschiedlicher Schüsse über mehrere Iterationen benutzt wird. Zur Unterdrückung des Empfängerabdrucks wurde dem Code eine Option zur Glättung der Gradienten hinzugefügt.

In dem Testergebnis nach der Implementierung der oben erwähnten Code-Erweiterungen sind in der Differenz in Abbildung 61 c) keine Akquisitionsabdrücke mehr zu erkennen. Auch in diesem Beispiel wurde die Inversion lediglich im niedrigen Frequenzbereich von 5 Hz bis 10 Hz durchgeführt. Bei allen hier gezeigten Tests wurden nur Schuss-Empfänger-Abstände von mehr als 400 m berücksichtigt. Die für die FWI verwendeten seismischen Daten wurden durch Zeitfensterung auf die ersten Wellenzüge beschränkt. Als Startmodell diente das von der TUBAF mit der Tomographie zusammengeschnittene Migrationsmodell. In diesem Test wurden 8 zufällig ausgewählte Schüsse pro Iteration invertiert und ein Glättungskernel von 11 Gitterzellen in horizontaler und 5 Gitterzellen in vertikaler Richtung benutzt. Dies führte zu Rechenzeiten von 2,5 h pro Iteration auf 192 Kernen.

Da die Inversion in sämtlichen durchgeführten Tests lediglich im niedrigen Frequenzbereich unterhalb von 15–20 Hz eine stabile Konvergenz aufwies, wurde das Startmodell einer detaillierten Analyse unterzogen. Infolgedessen wurde ein weiteres Modell entwickelt (siehe Kapitel 6.3.2.3). Dieses Modell zeigte eine verbesserte Übereinstimmung zwischen den simulierten und den Felddaten. Nachfolgende Tests mit diesem Ausgangsmodell zeigten eine robuste Konvergenz im niedrigen Frequenzbereich, allerdings keine signifikante Verbesserung bei Frequenzen oberhalb von 15 Hz.

Der nachfolgend beschriebene Test basiert auf einem Setup mit 60 Schusspositionen pro Iteration, die nicht variiert wurden. Diese Anzahl erwies sich als ausreichend, um signifikante Akquisitionsartefakte zu vermeiden und die Berechnungen innerhalb einer angemessenen Zeitspanne durchzuführen. In früheren Untersuchungen führte eine zufällige Auswahl der Schüsse zu guten Ergebnissen und einer effektiven Unterdrückung von Akquisitionsartefakten. Jedoch unterlag der Misfit, welcher als Maß für die Qualität der Datenanpassung dient, gewissen Schwankungen, die durch die Variation der Schüsse und die dadurch veränderte Datengrundlage verursacht wurden. Um die Entwicklung des Konvergenzprozesses über den Misfit präzise zu analysieren, wurde in diesem Test bewusst auf eine zufällige Auswahl der Schüsse verzichtet.

Die Anzahl der invertierten Frequenzen wurde auf 16 in Stage 1 bzw. 17 in Stage 2 erhöht. Eine größere Frequenzanzahl erwies sich als förderlich für die Stabilität der Inversion, indem sie die Entstehung kleinräumiger Anomalien im Geschwindigkeitsmodell reduzierte. Allerdings führte die Erhöhung der Frequenzanzahl zu einem gesteigerten Speicherbedarf bzw. einer längeren Rechenzeit. Die gewählte Frequenzanzahl stellte daher einen Kompromiss zwischen den Speicherrestriktionen der HPC-Systeme und einer vertretbaren Berechnungsdauer dar. Mit diesem Setup konnten jeweils 20 Schüsse parallel modelliert werden, was zu Rechenzeiten von etwa 4 Stunden bzw. 6,5 Stunden pro Iteration führte. Um den Konvergenzverlauf der Inversion umfassend zu analysieren, wurden neben dem Misfit im Frequenzbereich für die ausgewählten Frequenzen, der die Inversion steuert, auch der Misfit im Zeitbereich, der die Anpassung der tiefpassgefilterten Seismogramme reflektiert, ausgegeben.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 80

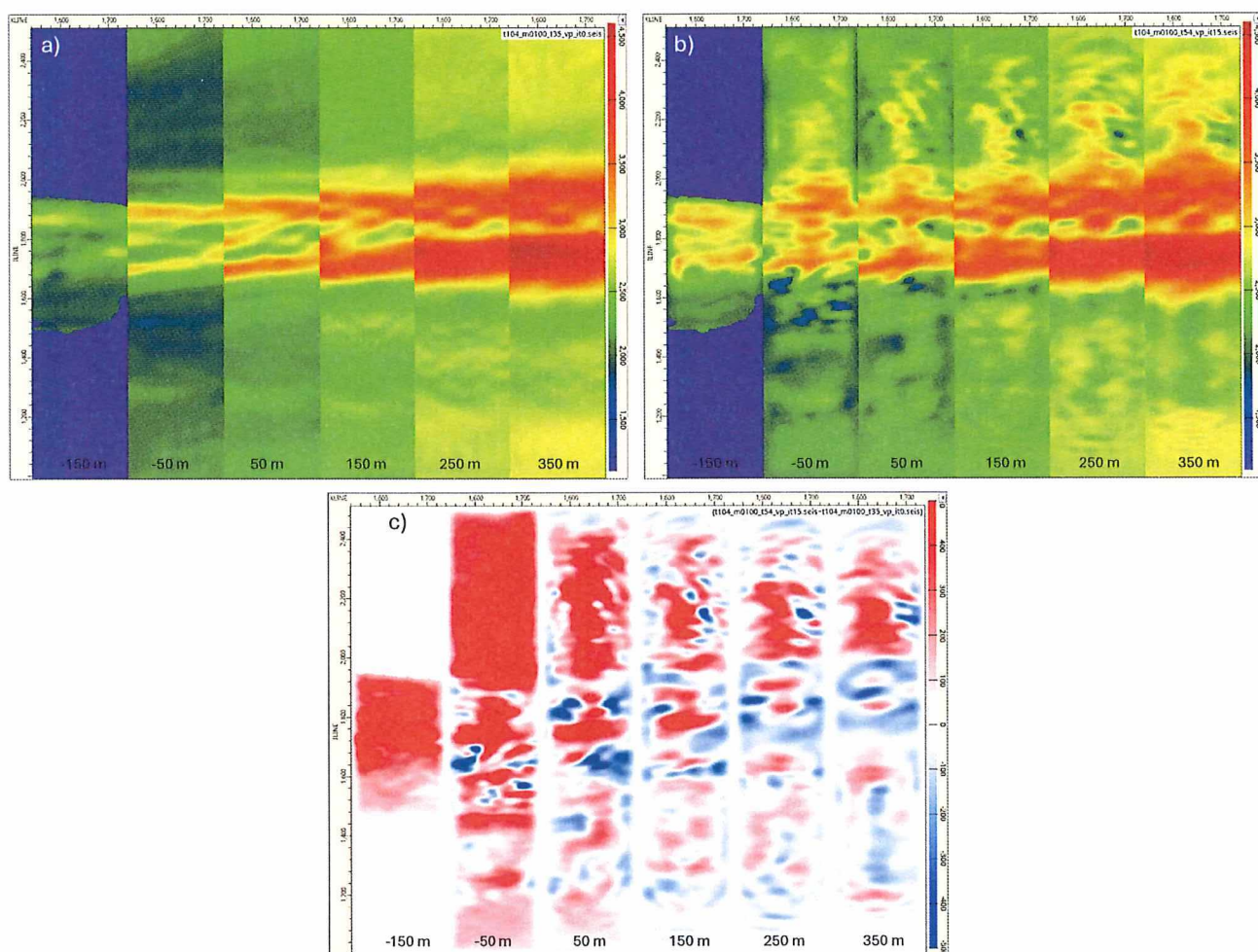


Abbildung 61: Tiefenschnitte durch das a) v_P -Startmodell, b) v_P -Geschwindigkeitsmodell nach 15 Iterationen für einen Test mit zufälliger Schussauswahl und c) deren Differenz.

Tabelle 8: Tabelle der Zeitfensterung und Frequenzauswahl des FWI-Tests.

Iteration	Offset-Fenster	Invertierte Frequenzen [Hz]
1-5	400m - 1200m	7,0; 7,2; 7,4; 7,6; 7,8; 8,0; 8,2; 8,4; 8,6; 8,8; 9,0; 9,2; 9,4; 9,6; 9,8; 10,0
6-12	400m - 4000m	7,0; 7,2; 7,4; 7,6; 7,8; 8,0; 8,2; 8,4; 8,6; 8,8; 9,0; 9,2; 9,4; 9,6; 9,8; 10,0
13-17	400m - 4000m	7,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 9,5; 10,0; 10,5; 11,0; 11,5; 12,0; 12,5; 13,0; 13,5; 14,0; 14,5; 15,0
18-21	400m - 4000m	8,0; 10,0; 11,0; 12,0; 13,0; 14,0; 15,0; 15,5; 16,0; 16,5; 17,0; 17,5; 18,0; 18,5; 19,0; 19,5; 20,0

Die Auswahl der invertierten Frequenzen sowie die Offset-Fensterung wurden gemäß der in Tabelle 8 dargestellten Parameter variiert. In Stage 1 erfolgte zunächst die Anpassung der kleineren Offsets, wodurch insbesondere der oberflächennahe Bereich des Modells optimiert wurde. Dabei kamen niedrige Frequenzen bis 10 Hz zum Einsatz, um eine stabile Modellierung zu gewährleisten.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 81

Im weiteren Verlauf wurden größere Offsets integriert, wodurch eine breitere Datengrundlage für die Inversion geschaffen wurde. Anschließend erfolgte die schrittweise Erweiterung des Frequenzfensters hin zu höheren Frequenzen, um die Modellanpassung über einen größeren spektralen Bereich zu verfeinern.

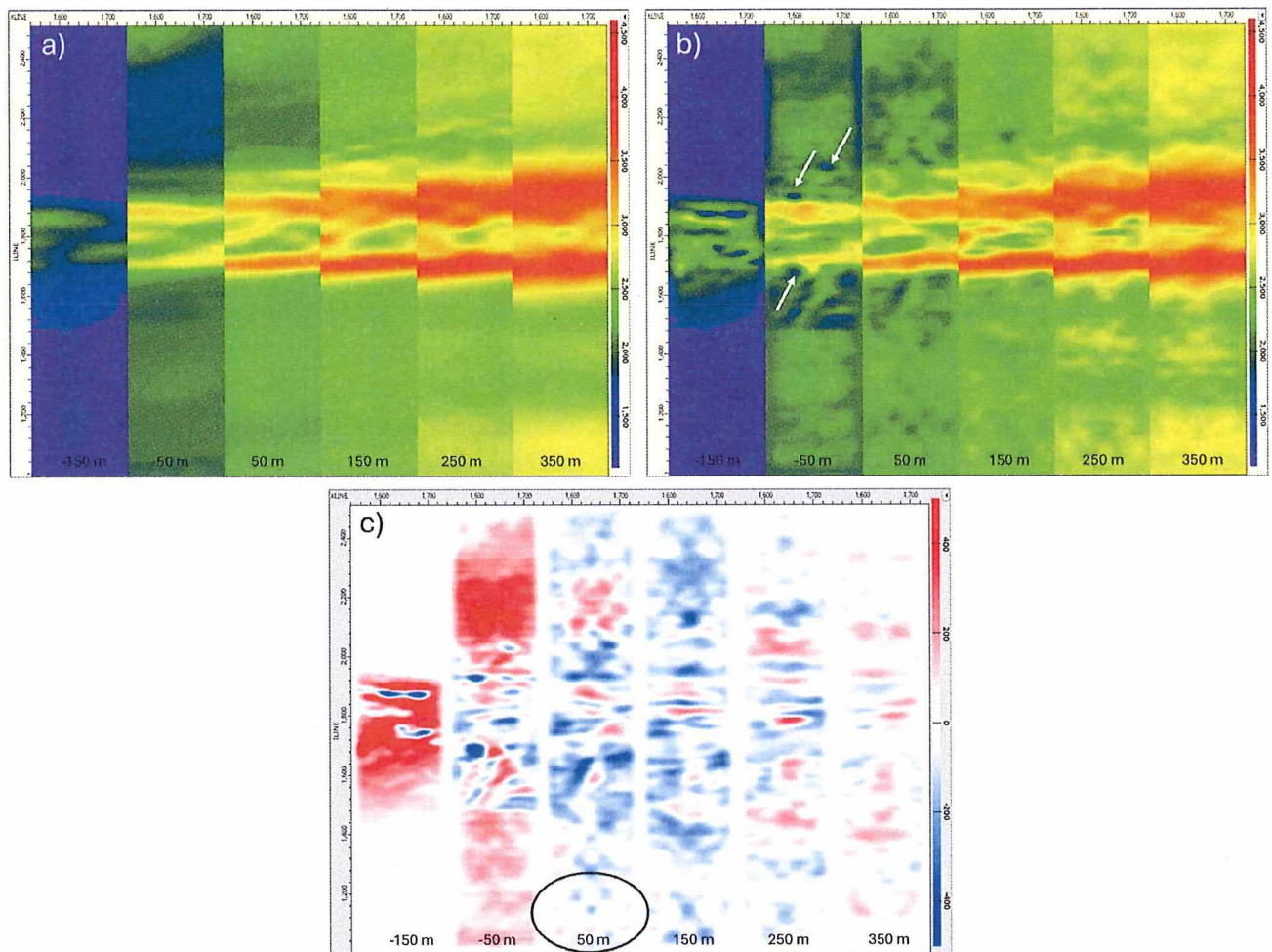


Abbildung 62: Tiefenschnitte durch das a) v_P -Startmodell, b) v_P -Geschwindigkeitsmodell nach 17 Iterationen und c) deren Differenz.

Abbildung 62 zeigt Tiefenschnitte durch das Startmodell (a), das Modell nach 17 Iterationen (b) sowie deren Differenz (c). In der Differenzdarstellung ist aufgrund der konstanten Schusspositionen ein leichter Abdruck dieser Positionen erkennbar (markiert durch schwarze Pfeile in Abbildung 62 c)). Aufgrund der Vielzahl der verwendeten Schüsse ist dieser Effekt jedoch weniger ausgeprägt als im vorhergehenden Beispiel (Abbildung 60 c)). Ein Abdruck der Empfängerpositionen ist hingegen infolge der angewandten Glättung nicht sichtbar.

Die durchgeführte Inversion führt zu einer signifikanten Erhöhung der Geschwindigkeitswerte im oberflächennahen Bereich, wobei die stärkste Beschleunigung im zentralen und nordöstlichen Modellbereich auftritt, mit einem Geschwindigkeitsanstieg von bis zu 500 m/s. Mit zunehmender Tiefe wird das Update des Modells zusehends komplexer. In einem Tiefenbereich von 100 m - 500 m unterhalb der Modelloberkante wird im zentralen Bereich des Modells im Bereich der Salzstruktur eine verstärkte Ausprägung der steilstehenden Schichtungen der aufgeschobenen Sedimente beobachtet. Ein vergleichbarer Effekt ist im Querschnitt in Abbildung 63 ersichtlich. Dort lassen sich einzelne Schichten in

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 82

der steilstehenden Nordflanke der Asse-Struktur zunehmend detailliert herausarbeiten (Abbildung 63 b und c).

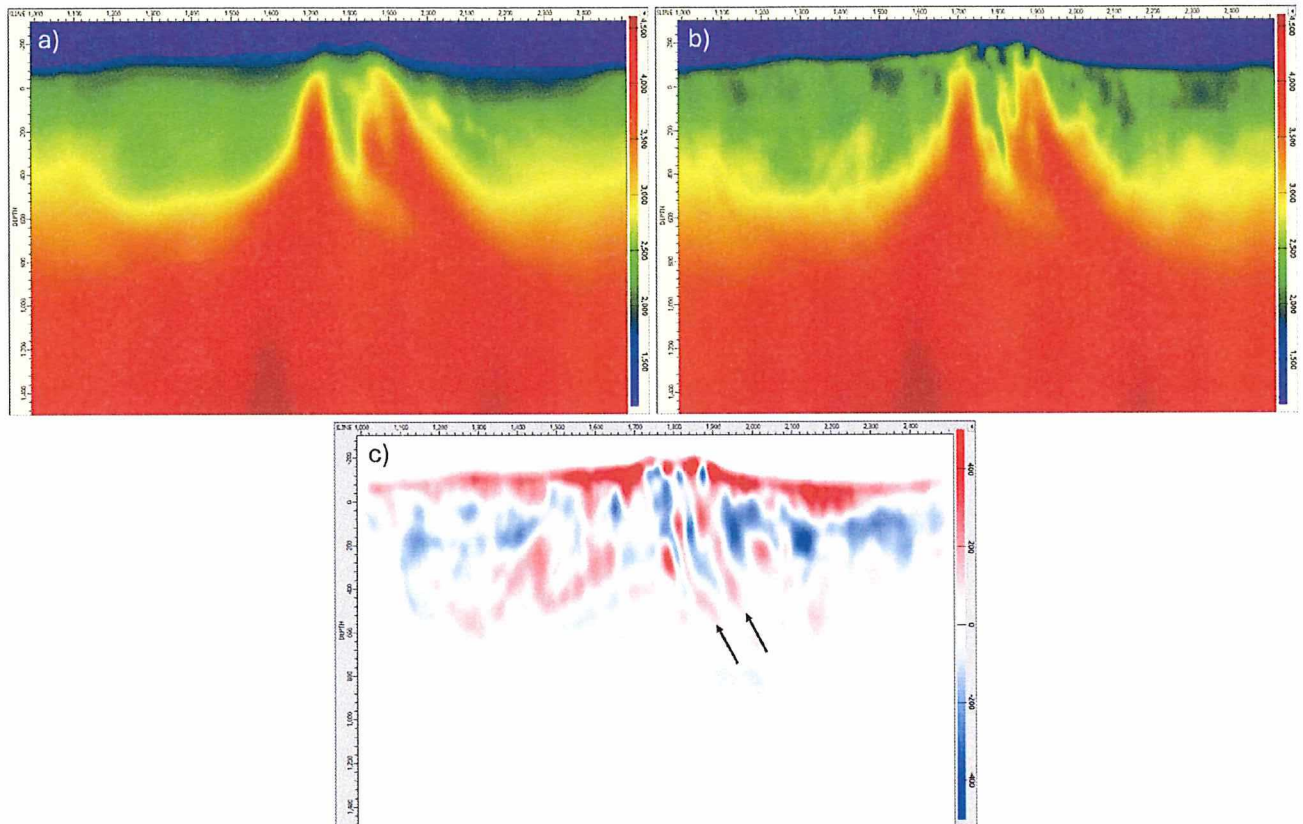


Abbildung 63: Schnitt (Crossline 1642) durch das a) v_P -Startmodell, b) v_P -Geschwindigkeitsmodell nach 17 Iterationen und c) deren Differenz.

Im Bereich des Asse-Hügels lassen sich kleinräumige Strukturen mit ausgeprägten Geschwindigkeitskontrasten im Vergleich zu den umgebenden Regionen identifizieren. Diese Effekte nehmen mit zunehmender Frequenz deutlich zu, lassen sich jedoch nicht durch bekannte geologische Strukturen erklären. Es ist daher naheliegend, dass es sich um Inversionsartefakte handelt, die möglicherweise auf sogenanntes „Cycle-Skipping“ hinweisen.

Zur Validierung der Modellqualität sowie zur Beurteilung der Eignung für die seismische Migration erfolgt ein Vergleich zwischen den gemessenen Seismogrammen der Feldkampagne und den synthetisch modellierten Daten. Abbildung 64 zeigt die Felddaten im rot-weiß-blauen Farbschema, während die modellierten Daten in Form von Wiggle-Darstellungen überlagert sind. Ein Schuss aus dem süd-östlichen Bereich des Modells verdeutlicht insbesondere im markierten Bereich (schwarzer Kreis) eine verbesserte Übereinstimmung der Daten nach 17 Iterationen (Abbildung 64 b) im Vergleich zum Ausgangsmodell (Abbildung 64 a).

Der in Abbildung 64 c dargestellte Schuss aus dem nordöstlichen Bereich zeigt bereits zu Beginn der Inversion eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den modellierten Daten. Nach 17 Iterationen (Abbildung 64 d) ist jedoch eine leichte, für manche Spuren sogar deutliche Verschlechterung der Datenanpassung zu beobachten (vgl. Pfeilmarkierungen). Dies weist darauf hin, dass bestimmte lokal eingeführte Modelländerungen keine globale Optimierung bewirken und möglicherweise sogar kontraproduktiv sind.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 83

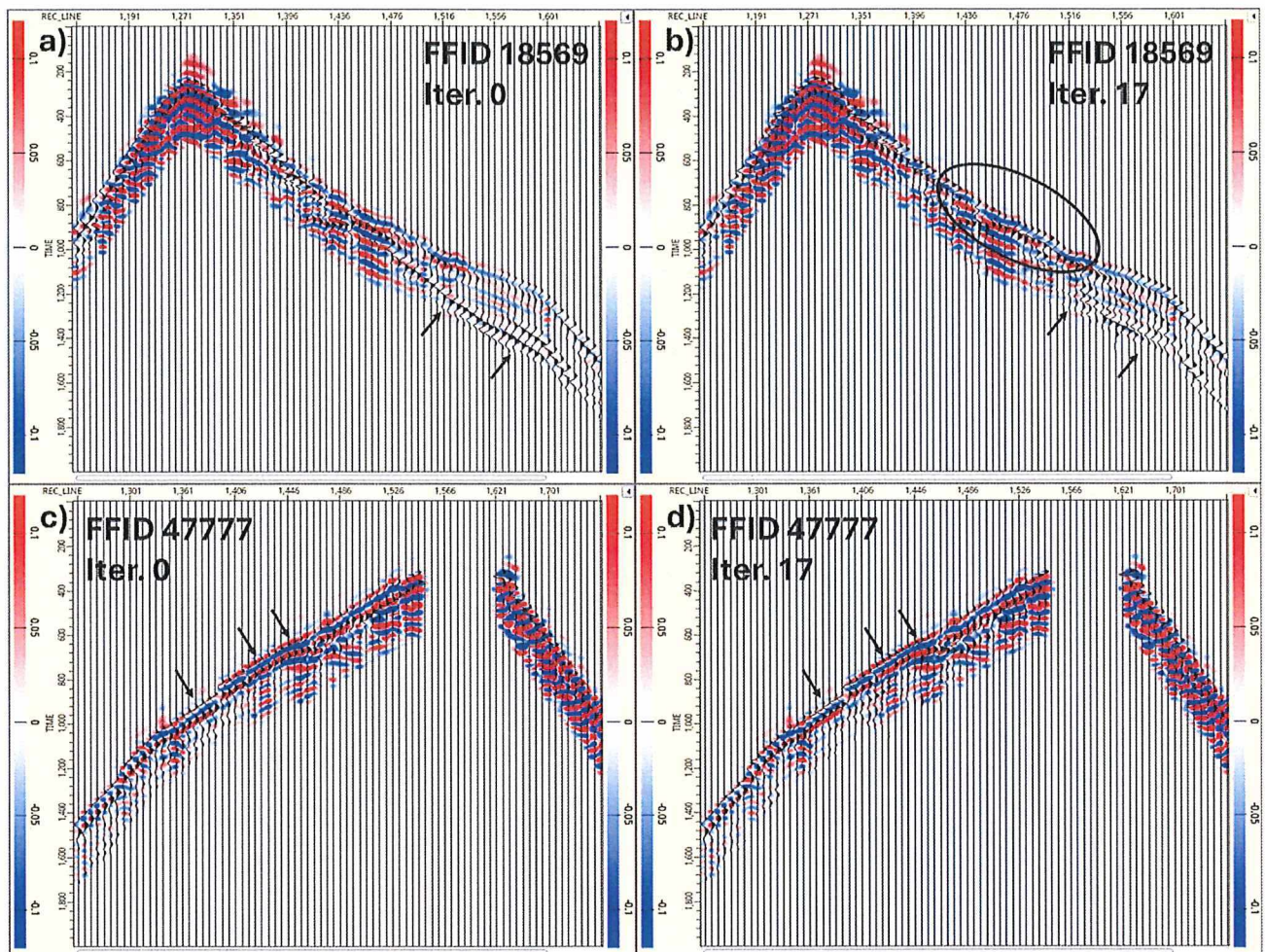


Abbildung 64: Überprüfung der Datenanpassung auf Schusseisemogrammen auf dem Startmodell (a und c) und nach Iteration 17 (b und d) für einen Schuss südwestlich des Assehügels (a und b) und einen nordwestlich davon (c und d). Dargestellt sind die modellierten Daten in Wiggles-Darstellung und die Felddaten im rot-weiß-blau-Farbschema.

Zur übergeordneten Bewertung der Datenanpassung wurde der sogenannte Misfit herangezogen. In Abbildung 65 ist für diesen Test sowohl der Misfit für die ausgewählten Frequenzen – welcher die Inversion direkt steuert – als auch der Misfit im Zeitbereich dargestellt, der einer Betrachtung der tiefpassgefilterten Seismogramme wie in Abbildung 64 entspricht. Eine detaillierte Betrachtung des frequenzbasierten Misfits zeigt in den ersten fünf Iterationen einen kontinuierlichen Rückgang, was auf eine Verbesserung der Anpassung der entsprechenden Frequenzen und somit des Modells hindeutet. Im Gegensatz dazu zeigt der Misfit im Zeitbereich keine systematische Entwicklung und keine Verbesserung der Anpassung des Frequenzbandes unterhalb von 10 Hz bei kleinen Offsets durch die Modellanpassungen.

Bei Hinzunahme größerer Offsets (Iteration 5-11 in Abbildung 65) verringert sich der Misfit im Frequenzbereich kaum. Die Inversion kann also zu keiner substantiellen Verbesserung der Anpassung der einzelnen Frequenzen führen. Allerdings zeigt der Misfit im Zeitbereich hier einen leichten, stetigen Trend zur Verbesserung der Datenanpassung.

Der nachfolgende Übergang zu höheren Frequenzen (Iterationen 12-16) resultiert erneut in einer

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 84

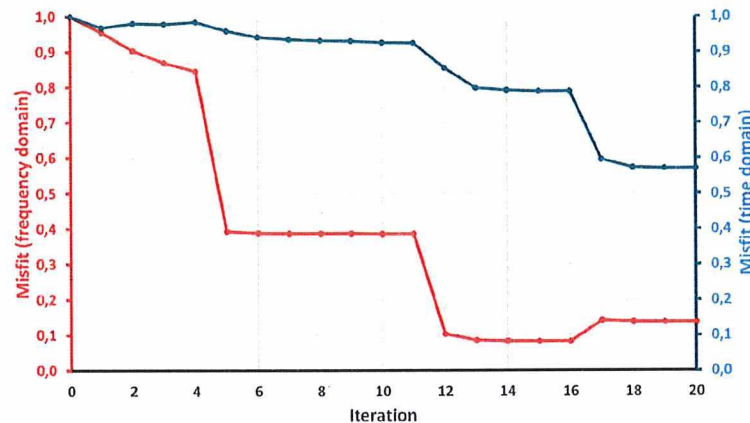


Abbildung 65: Misfit im Frequenzbereich (rot) und im Zeitbereich (blau) des Inversionstests.

leichter Verbesserung des Misfit im Frequenz- sowie im Zeitbereich. Beide Kurven in Abbildung 65 zeigen einen Abwärtstrend in Iteration 13 und 14, der in einen Sättigungsbereich übergeht. Im gesättigten Bereich wurde dann in den nächsthöheren Frequenzbereich bis 20 Hz gewechselt. Mit dem ersten Modell-Update in Iteration 18 wird noch eine leichte Verbesserung des Misfit erzielt, bevor sich eine Stagnation einstellt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass durch die Modell-Updates keine signifikanten Verbesserungen des Misfit erzielt werden konnten. Die auffälligen Sprünge in Abbildung 65 sind auf eine Änderung der Misfit-Berechnung durch Hinzunahme zusätzlicher Offsets oder anderer Frequenzen zurückzuführen. Während Veränderungen des Misfit insbesondere in der initialen Phase (Stage 1) beobachtet werden konnten, bleibt eine Verbesserung der Anpassung im Zeitbereich aus. Die Ursache dieser Diskrepanz konnte nicht abschließend geklärt werden, da die Kontrolle der Anpassung im Frequenzbereich für isolierte Frequenzen herausfordernd bleibt.

Angestrebte Lösungsansätze, wie eine optimierte Rauschunterdrückung und der Ausschluss stark verrauschter niedriger Frequenzen unterhalb von 7 Hz, führten nicht zur Lösung des Problems. Daher wird für die Zukunft ein Wechsel von der Frequenzbereichsinversion zur Zeitbereichsinversion angestrebt. Diese Umstellung erfordert jedoch eine umfassende Modifikation des Codes sowie eine Neustrukturierung des Speichermanagements, da sie mit einem erheblichen Anstieg des Speicherbedarfs bzw. der Rechenzeit einhergeht und konnte daher nicht mehr im Rahmen dieses Projektes umgesetzt werden.

6.3.2.5 Anisotropie

Während die FWI bei niedrigen Frequenzen bis etwa 15 Hz zu einer moderaten Verbesserung des Modells und einer besseren Übereinstimmung zwischen den simulierten und gemessenen Daten führte, blieb eine substanzielle Optimierung aus, und die Methode erwies sich bei höheren Frequenzen als instabil.

Ein möglicher Grund hierfür könnte die sehr komplexe Geologie sein, die durch starke Kontraste an Muschelkalk und der Salzstruktur gekennzeichnet ist. Diese starken Materialübergänge und die damit verbundenen konvertierten Wellen würden sich möglicherweise durch eine elastische FWI präziser erfassen lassen. Ansätze wie das sogenannte „Salt Flooding“ wurden getestet, führten jedoch zu keiner signifikanten Verbesserung der Ergebnisse.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 85

Ein weiterer entscheidender Faktor, der zu Beginn des Projekts noch unbekannt war, ist die vorhandene Anisotropie des geologischen Untergrunds. Diese ist nicht nur im Bereich der steil stehenden Flanken der Asse-Struktur sehr stark ausgeprägt, sondern wurde von Geofizyka Toruń beim Modellieren des Geschwindigkeitsmodells für die Migration selbst für die Sedimentbecken südwestlich und nordöstlich des Asse-Hügels mit 15% ($\epsilon = 0.15$) berücksichtigt, um optimale Abbildungsergebnisse zu erzielen. Obwohl die anisotrope Wellengleichung sowohl in 2D als auch in 3D implementiert wurde (siehe Kapitel 5.1.2), konnte sie aufgrund der hohen Speicher- und Rechenanforderungen nicht auf das Asse-Modell angewendet werden.

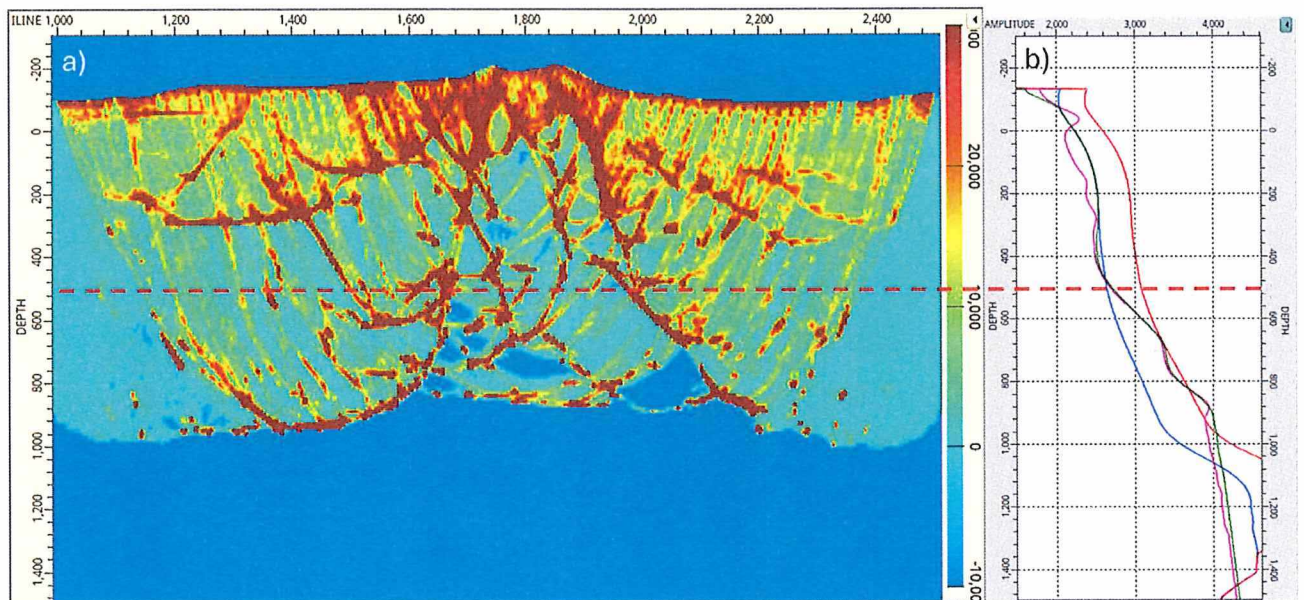


Abbildung 66: Tauchwellenabdeckung der Tomographie (a) und Geschwindigkeitsprofile (b) der Vertikal- (blau) bzw. Horizontalkomponente (rot) des TTI-Migrationsmodells von Geofizyka Toruń sowie des Tomographie-Modells der TUBAF (magenta) und des FWI-Modells (grün).

Das zugrunde liegende Problem lässt sich anschaulich anhand der Strahlenanalyse der Tomographie erläutern. Abbildung 66 a) zeigt die Strahlenabdeckung der Tomographie und verdeutlicht, dass im Bereich zwischen 0 m und 350 m sowohl eintauchende Wellen mit vorwiegend vertikalen Laufwegen als auch Strahlenanteile von Tauchwellen an ihrem Umkehrpunkt mit überwiegend horizontaler Ausbreitung vorliegen. Ab einer Tiefe von etwa 500 m bis zur Modelluntergrenze beginnen Strahlen mit horizontaler Laufrichtung zu dominieren, da die tiefen Bereiche des Modells nur noch von den Apizes der Strahlenwege erreicht werden. Bei ausgeprägter Anisotropie muss folglich der tiefere Teil des Modells von der horizontalen Geschwindigkeit dominiert sein. Dies wird durch den Modellschnitt in Abbildung 66 b) unterstützt, in dem die vertikale (blau) und die horizontale Geschwindigkeit (rot) des TTI-Migrationsmodells von Geofizyka Toruń dargestellt sind. Des Weiteren sind die isotropen Geschwindigkeitsprofile des Tomographie-Modells (magenta) und des FWI-Modells (grün) gezeigt. Bis zu einer Tiefe von etwa 500 m orientieren sich die Geschwindigkeiten der Tomographie und der FWI primär an der Vertikalgeschwindigkeit des Migrationsmodells, da hier die Tomographie hauptsächlich durch vertikal eintauchende Wellen beeinflusst wird. Ab einer Tiefe von 500 m bis zur maximalen Eindringtiefe der Tomographie bei etwa 1000 m nähern sich die Geschwindigkeitswerte der Tomographie und der FWI zunehmend der horizontalen Geschwindigkeit des TTI-Migrationsmodells an. Das größte Problem für die FWI liegt somit im oberflächennahen Bereich, in dem vertikale und horizontale Wellenausbreitungen mit einer isotropen Betrachtungsweise nicht konsistent abgebildet werden können.

Zukünftige Entwicklungen sollten darauf abzielen, die Effizienz der Lösung der anisotropen (TTI) Wellen-

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 86
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	64213000				HF	PH	0002	00	

gleichung weiter zu optimieren und die bestehende Problemstellung mittels anisotroper Berechnungen zu adressieren, um eine präzisere Modellierung der Geschwindigkeitsverteilungen zu ermöglichen.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 87

7 Imaging

7.1 Geometrie und Migrationsgeschwindigkeitsmodelle

Die Anwendung der Pre-Stack-Tiefenmigration gliederte sich in die Untersuchung von zwei Teilbereichen im Messgebiet. Zunächst wurden Arbeiten an der Testlinie XL 1641 durchgeführt, die 739 Quell- und 100 Empfängerpositionen umfasste. Anschließend wurde das Untersuchungsgebiet auf den Crossline-Bereich 1540 – 1739 erweitert, wodurch die Anzahl der Quellen auf 7602 und die der Empfänger auf 9713 stieg. Mit der Erweiterung des Bereichs erhöhte sich der Rechen- und Speicherbedarf erheblich, so dass die entsprechenden Berechnungen auf den HPC-Clustern der TUBAF und der TU Dresden durchgeführt wurde.

Für die Migration der Daten standen die 3D-Multiparametermodelle eines BGE-Auftragnehmers (Geofizyka Toruń, GT) zur Verfügung. Diese Modelle ermöglichten neben der isotropen Laufzeitberechnung (v-Modell, Abbildung 67) auch die Berücksichtigung von Anisotropie, wie VTI (ϵ - und δ -Modell) und TTI (Azimut- und Neigungsmodell). Die Beschreibung des Salzstocks Asse als anisotropes Medium ist unerlässlich, um eine verlässliche Tiefenlage der Reflektoren zu erhalten und die steil stehenden Salzflanken korrekt in Lage und Neigung abzubilden (Abschnitt 5.2.2).

Das verwendete Geschwindigkeitsmodell von GT zeigt eine relativ glatt verlaufende großskalige Geschwindigkeitsverteilung. Der oberflächennahe Bereich besitzt jedoch zum Teil eine hohe Komplexität mit entsprechenden starken räumlichen Inhomogenität der Geschwindigkeit. Dieser oberflächennahe Bereich beeinflusst die Laufzeiten und insbesondere die im Rahmen der Laufzeitberechnung berechneten Strahlwege stark, so dass diesem oberflächennahen Bereich im Geschwindigkeitsmodell eine relativ hohe Bedeutung zukommt. Das Geschwindigkeitsmodell von GT wurde daher mit den Modellen aus der Ersteinsatztomographie (FATT) (Abschnitt 6.1) und der FWI (Abschnitt 6.3) kombiniert. Bei der Zusammenführung wurden sämtliche Bereiche des ursprünglichen Modells durch Werte aus den Modellen der FATT bzw. FWI ersetzt, wobei die tatsächliche Abdeckung der Strahlenwege berücksichtigt wurde. Da die oberflächennahen Methoden Schwierigkeiten bei der Rekonstruktion der hohen Geschwindigkeiten des Salzdoms aufweisen, wurden Bereiche mit $v > 4000$ m/s aus dem ursprünglichen Migrationsgeschwindigkeitsmodell beibehalten. Im abschließenden Schritt wurde das zusammengeführte Modell geglättet, um starke Geschwindigkeitskontraste und artifizielle Übergänge an den Grenzen der kombinierten Modelle anzugleichen. Zusätzlich wurden zwei weitere Geschwindigkeitsmodelle durch die BGE verknüpft und bereitgestellt. Dabei wurden zunächst die zwei Versionen von FWI-Modellen bis 2750 m erweitert. Anschließend wurde der als Salz interpretierte Teil des Modells mit einer konstanten Geschwindigkeit von 4550 m/s aufgefüllt. Der oberflächennahe Bereich wurde durch das jeweilige FWI-Modell ersetzt und der Übergangsbereich zwischen den Modellen leicht geglättet.

Die Verknüpfung erfolgte für den Bereich XL 1540 – 1739. Damit lagen insgesamt fünf verschiedene Geschwindigkeitsmodelle für die Migration der Daten vor (Tabelle 9). Dabei ist zu beachten, dass die Modelle aus FATT und FWI von einem isotropen Untergrund ausgehen. Aus diesem Grund sind die Modelle 2, 3, 4 und 5 nicht direkt mit den anisotropen Parametermodellen von GT kombinierbar.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 88

Tabelle 9: Verfügbare Migrationsgeschwindigkeitsmodelle.

Geschwindigkeitsmodell	Richtungsabhängigkeit	Bezeichnung
Geofizyka Toruń (GT)	isotrop, anisotrop (VTI, TTI)	Modell 1
FATT + GT	isotrop	Modell 2
FWI (Version 1) + GT (TUBAF)	isotrop	Modell 3
FWI (Version 1) + GT (BGE)	isotrop	Modell 4
FWI (Version 2) + GT (BGE)	isotrop	Modell 5

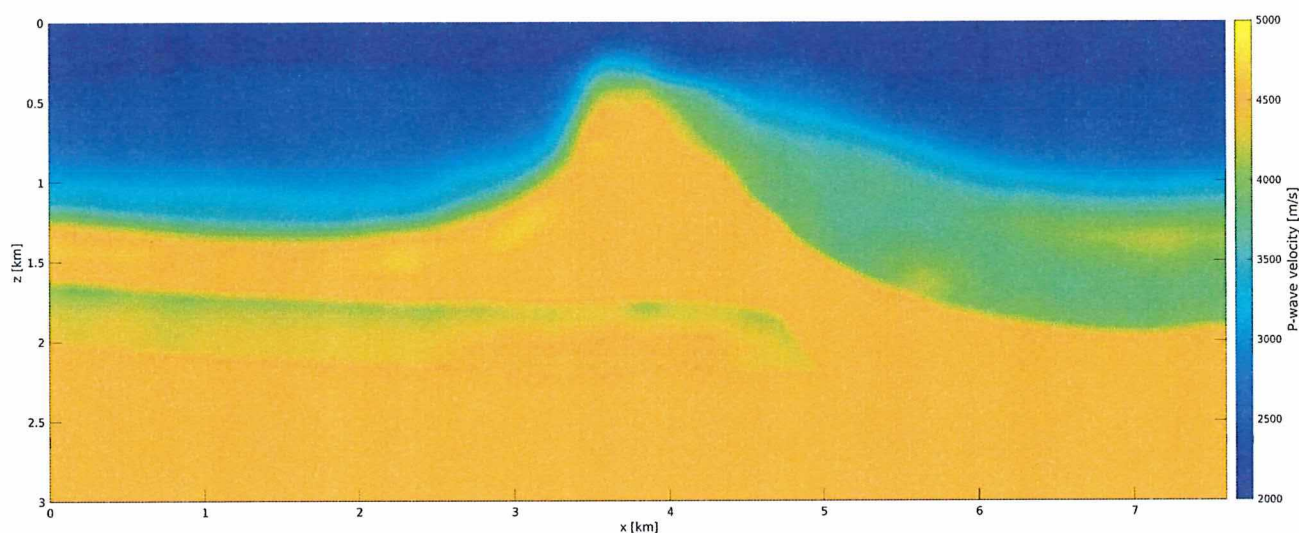


Abbildung 67: Geschwindigkeitsmodell von Geofizyka Toruń (GT) für XL 1641.

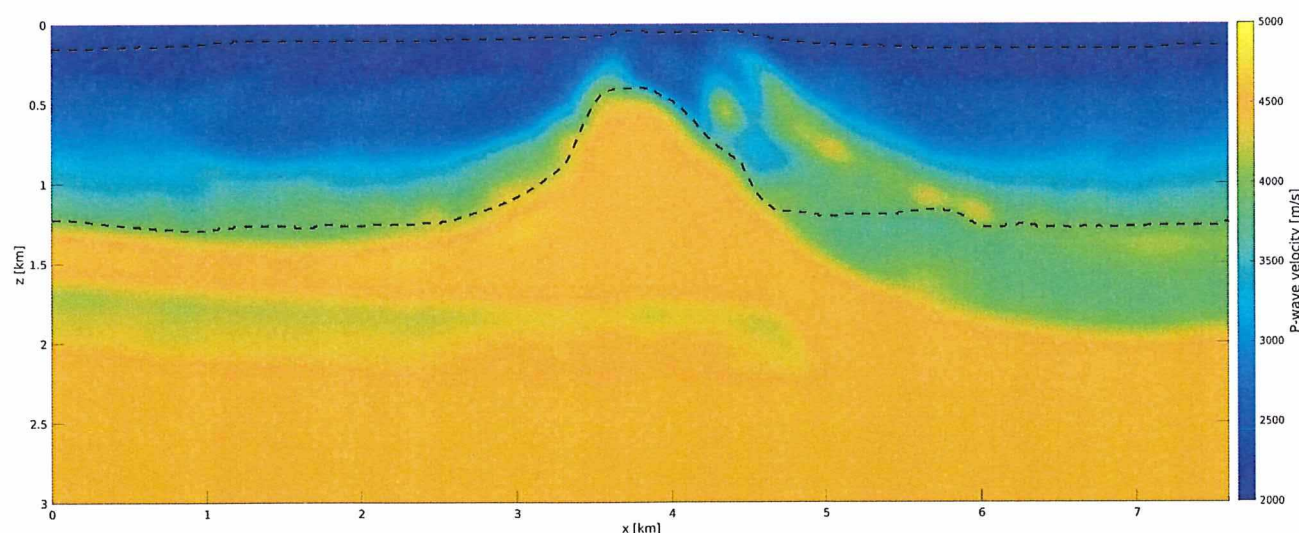


Abbildung 68: Geglättetes Geschwindigkeitsmodell kombiniert aus FATT und GT-Modell für XL 1641. Die gestrichelte Linie zeigt den Übergangsbereich zwischen den Modellen an.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Modell 1 und den Geschwindigkeitsmodellen aus FWI und FATT liegt in der Bezugsfläche für die Quell- und Empfängerhöhen. In der seismischen Datenbearbei-

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 89
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	64213000				HF	PH	0002	00	

tung wurden statische Korrekturen angewendet, um Höhenunterschiede entlang des Profiles sowie oberflächennahe Geschwindigkeitsvariationen auszugleichen. Modell 1 basiert auf einem berechneten gleitenden Bezugsniveau (Floating Datum), das einem geglätteten Verlauf der Quell- und Empfängerhöhen entspricht. Die 3D-zeitprozessierten Daten sind ebenfalls auf diese Höhe bezogen. Im Gegensatz dazu verwenden die Modelle aus FATT und FWI die während der Feldmessungen eingemessene tatsächliche Topografie als Referenz. Um eine Konsistenz zwischen den Modellen herzustellen, stellte die BGE Skripte bereit, mit denen die 3D-Daten vom Floating Datum auf die Topografie verschoben werden können. Manche statische Korrekturen, wie die Verschiebung der Explosionsquellen auf die Erdoberfläche (Uphole Statics), bleiben dabei erhalten.

7.1.1 Pre-Stack-Tiefenmigration der 3D-Seismik

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Pre-Stack-Tiefenmigration im Einzelnen beschrieben, und zwar zunächst für eine einzelne Crossline XL 1641 und anschließend für den Crossline-Bereich XL 1540 - 1739.

XL 1641

Die Crossline 1641 (XL 1641) bildete die Grundlage für die Anwendung aller Weiterentwicklungen der Migrationssoftware. Dabei wurden neben der KPSPDM auch fokussierende Migrationsverfahren wie die FVM eingesetzt, um anisotrope (VTI, TTI) sowie viskoelastische (Q) Effekte der Wellenausbreitung zu berücksichtigen. Zusätzlich kam die COG-Migration zum Einsatz, um die Ergebnisse weiter zu verbessern und den Einfluß der verschiedenen Geschwindigkeitsmodelle besser miteinander vergleichen zu können..

Durch die Anwendung der einzelnen Verfahren und Geschwindigkeitsmodelle wurde eine Vielzahl von resultierenden Migrationsergebnissen für den Salzstock Asse erstellt (Tabelle 10). Die verwendeten Bezeichnungen für die Datenprozessierung beschreiben den Unterschied zwischen der Reprozessierung der Daten ("2D", Abschnitt 6.2) und der von der BGE bereitgestellten ursprünglichen Prozessierung ("3D").

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 90

Tabelle 10: Übersicht der Migrationsergebnisse für XL 1641.

Verfahren	Richtungs- abhängigkeit	Geschwindigkeits- modell	Datenprozessierung
KPSDM	Isotrop	Modell 1	2D & 3D
KPSDM	VTI	Modell 1	2D & 3D
KPSDM	TTI	Modell 1	2D & 3D
FVM	Isotrop	Modell 1	2D & 3D
FVM	VTI	Modell 1	2D & 3D
FVM	TTI	Modell 1	2D & 3D
QPSDM (CRG 8261)	Isotrop	Modell 1	2D
QPSDM (COG)	Isotrop	Modell 1	3D
QFVM (COG)	Isotrop	Modell 1	3D
FVM (COG)	Isotrop	Modell 1	3D
FVM (COG)	Isotrop	Modell 2	3D
FVM (COG)	VTI	Modell 1	3D
FVM (COG)	TTI	Modell 1	3D

Exemplarisch für die Vielzahl der Ergebnisse werden hier die Resultate der FVM unter Verwendung des TTI-Geschwindigkeitsmodells vorgestellt. Dabei lässt sich der Einfluss der Eingangsdaten im Hinblick auf die 2D- (Abbildung 69) und 3D-Prozessierung (Abbildung 70) am besten vergleichen. Die blauen Pfeile heben Bereiche hervor, in denen die Vorteile der 3D-Datenverarbeitung besonders deutlich werden. Sowohl die steil stehenden Salzflanken als auch die Zechsteinbasis sind in der 3D-Prozessierung schärfer abgebildet und zeigen eine deutliche Zunahme der Reflektoramplituden.

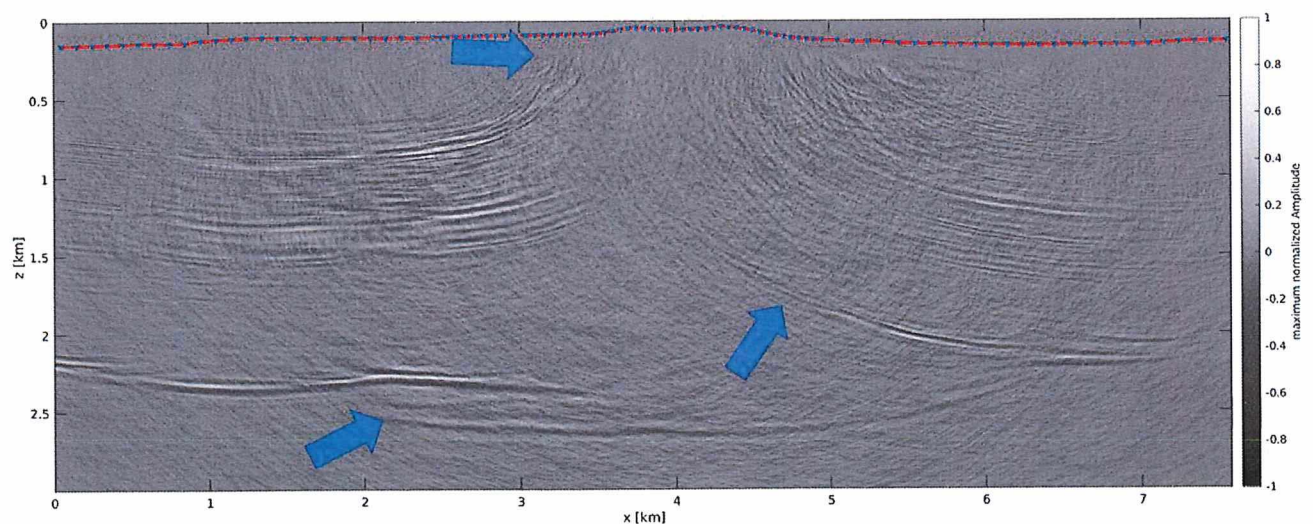


Abbildung 69: Ergebnis der FVM für TTI-Modell 1 (XL 1641). Die Eingangsdaten sind 2D-prozessiert.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 91

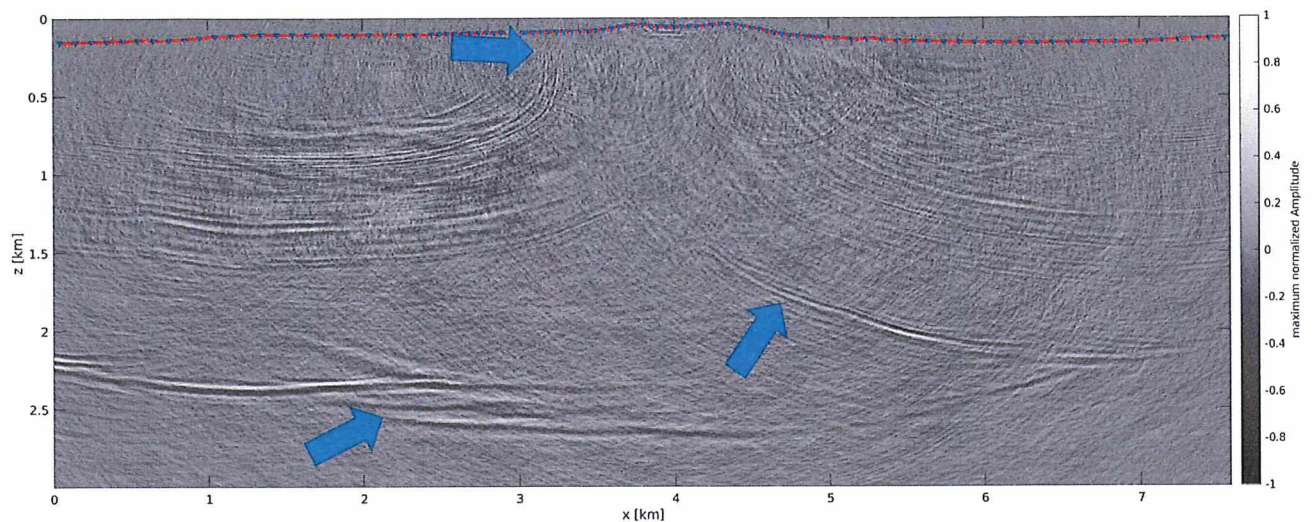


Abbildung 70: Ergebnis der FVM für TTI-Modell 1 (XL 1641). Die Eingangsdaten sind 3D-prozessiert.

Q-Kompensation

Die Anwendung der QPSDM auf reale Daten brachte die Herausforderung mit sich, dass Rauschen, welches im gleichen Frequenzbereich wie das Nutzsignal liegt, ebenfalls kompensiert und somit verstärkt wird. Dies machte eine gründliche Frequenzanalyse der zu migrierenden Daten unverzichtbar. Besonders problematisch waren späte Rauschanteile im Seismogramm, da die zunehmende Laufzeit T zu einer höheren Kompensationslaufzeit T^* führte, was wiederum eine unerwünschte Verstärkung des Rauschens bewirkte.

Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurden verschiedene Strategien implementiert. Eine davon war der Einsatz von Kosinustapern (Hanning- oder Tukey-Fenster) bei der Berechnung der Kompensationsfunktionen D_a (Abbildung 71). Der entscheidende Parameter dabei ist die maximale Frequenz, bis zu der eine Kompensation erfolgen soll, welche in Abhängigkeit vom Frequenzbereich des Quellsignals gewählt werden muss. Das Tukey-Fenster ermöglicht zusätzlich die Anpassung der Steilheit des Filters über den Kosinusanteil r , was in unserem Fall definiert, wie schnell die Kompensationsfunktion auf 0 abfällt. Da das Abfallen auf 1 bedeutet, dass keine Frequenzänderung vorgenommen wird, wirkt der Kosinustapern zugleich als Tiefpassfilter.

Eine weitere Methode zur Begrenzung der Q-Kompensation besteht darin, einen maximalen Kompensationswert festzulegen, der nicht überschritten werden darf. Dadurch wird verhindert, dass starkes Rauschen das kompensierte Migrationsbild dominiert und die Qualität der Ergebnisse beeinträchtigt. Diese Herangehensweise ist geläufig für praktische Anwendungen und wird auch in vergleichbaren kommerziellen Softwarepaketen verwendet.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 92

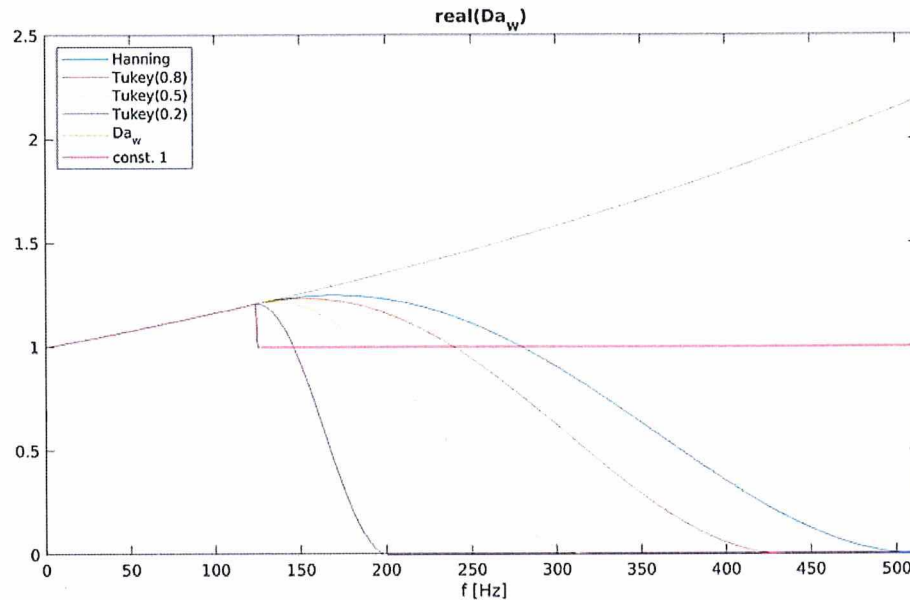


Abbildung 71: Vergleich des Einflusses von Hanning- und Tukey-Taper auf Realteil der Kompensationsfunktion D_a .

Für die Anwendung der QPSDM auf reale Daten wurde zunächst das Common-Receiver-Gather (CRG) des Empfängers 8261 aus der Testlinie XL 1641 ausgewählt (Abbildung 72). In der Abbildung sind bereits potenziell problematische Rauschanteile hervorgehoben, die auf Grund ihrer großen Laufzeit eine starke Q-Kompensation erfahren. Als Q-Modell wird ein konstanter Wert von $Q = 100$ gewählt. Der Vergleich der Migrationsergebnisse ohne Q-Kompensation (Abbildung 73) und mit Q-Kompensation (Abbildung 74) verdeutlicht die Problematik trotz der implementierten Kosinustaper und einer Begrenzung der maximalen Verstärkung. Das markierte Rauschen wird in den Tiefenbereich von $x = 4,5 - 6,5$ km migriert und dominiert dort das Abbild durch seine hohe Amplitude.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 93

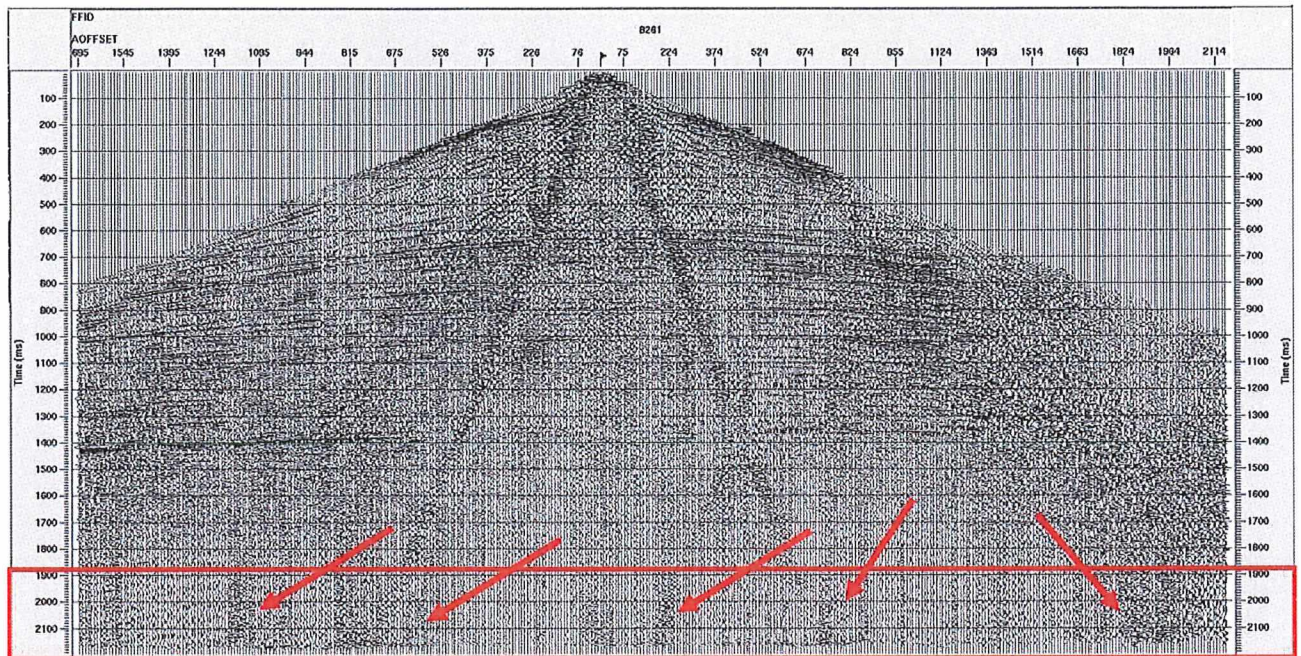


Abbildung 72: CRG von Empfänger 8261 (XL 1641). Markiert ist hochfrequentes Rauschen mit später Ankunftszeit.

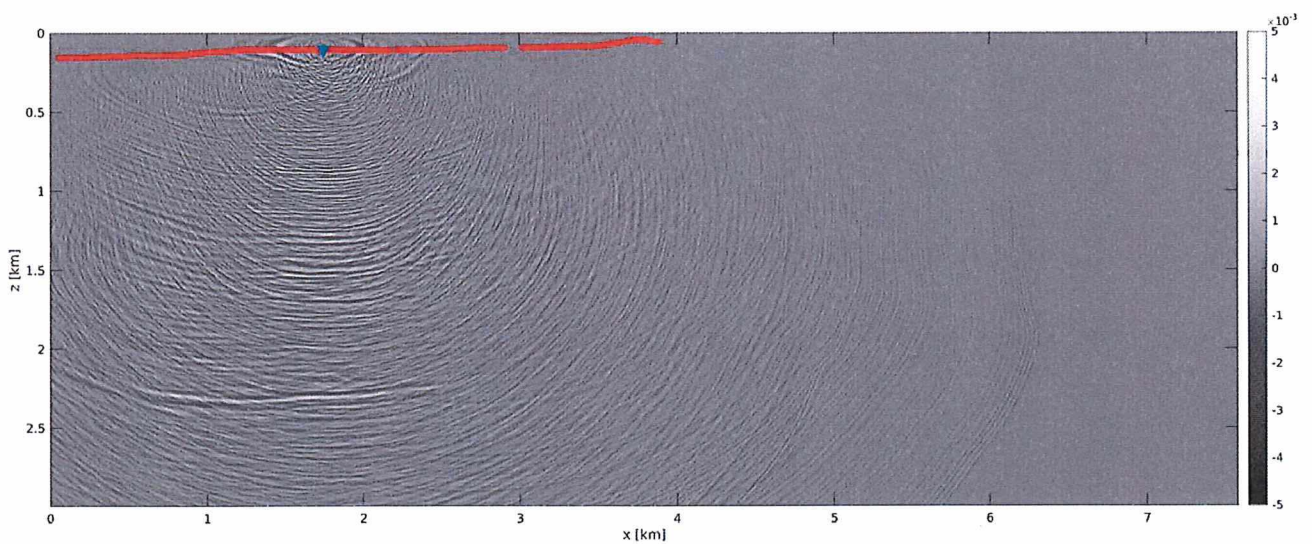


Abbildung 73: Ergebnis der KPSDM für isotropes Modell 1 von CRG8261 (XL 1641). Blaues Dreieck: Empfänger, Roter Stern: Quellen.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 94

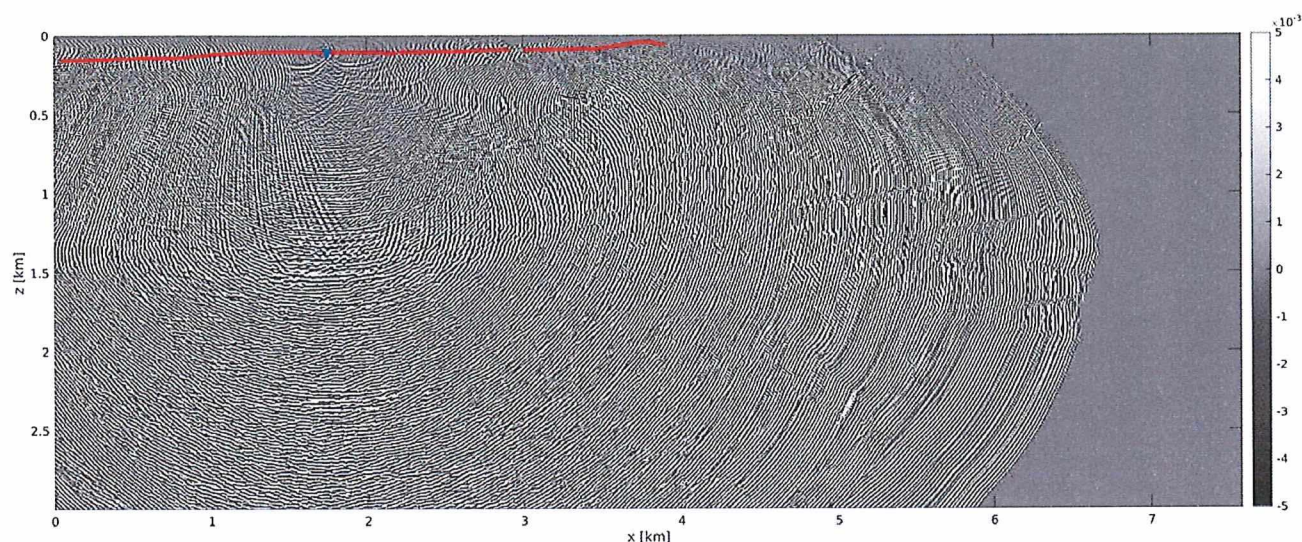


Abbildung 74: Ergebnis der QPSDM für isotropes Modell 1 von CRG8261 (XL 1641). Tukey-Kosinustaper mit $r = 0,01$ und maximaler Frequenz 120 Hz. Blaues Dreieck: Empfänger, Roter Stern: Quellen.

Im nächsten Schritt wurde die komplette Testlinie XL 1641 für die Q-Kompensation genutzt. Als Q-Modell wurde eine empirische Beziehung zwischen der Wellengeschwindigkeit und dem Qualitätsfaktor verwendet [36]. Tests mit einer Q-Kompensation ohne Beschränkung der maximalen Verstärkung zeigten die bereits beschriebene übermäßige Verstärkung von Rauschen im Frequenzbereich des Signals. Deshalb wird auch für diesen Fall eine maximale Verstärkung der Amplituden genutzt. Die Anwendung der QFVM mit Amplitudenbeschränkung zeigt nur leichte Abweichungen gegenüber der konventionellen FVM in Hinblick auf die Verhältnisse der Amplituden zueinander (Abbildung 75). Die absoluten Amplitudenwerte der Reflektoren werden durch den Ansatz jedoch wie gewünscht verstärkt, ohne dass ungewollt Rauschen die geologisch relevanten Strukturen überdeckt. Damit konnte gezeigt werden, dass die Q-kompensierte FVM erfolgreich auf die bereitgestellten realen Daten anwendbar ist. Für tiefergehende Analysen und Betrachtungen des Amplitudenverhaltens über verschiedene Offsets (AVO) wird allerdings ein realistisches Q-Modell benötigt, das für den hier betrachteten Datensatz nicht vorlag.

Diese Tests unterstreichen die Herausforderungen der Q-Kompensation realer Daten. Dennoch konnte gezeigt werden, dass das Verfahren sowohl auf synthetische als auch auf reale Daten anwendbar ist. Eine weitergehende Optimierung der Ergebnisse kann beispielsweise durch spezielle Preprocessing-Schritte erreicht werden, die gezielt das späte Rauschen in den seismischen Daten minimiert.

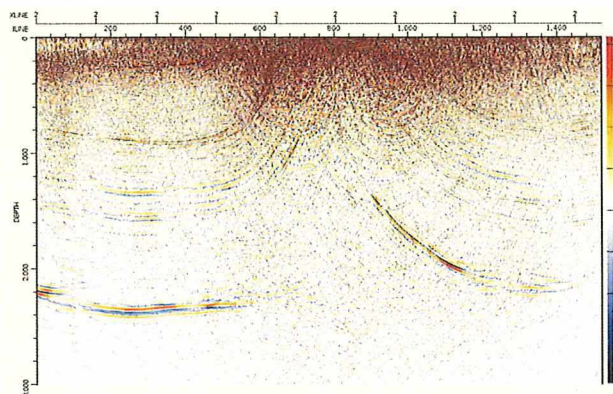
Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



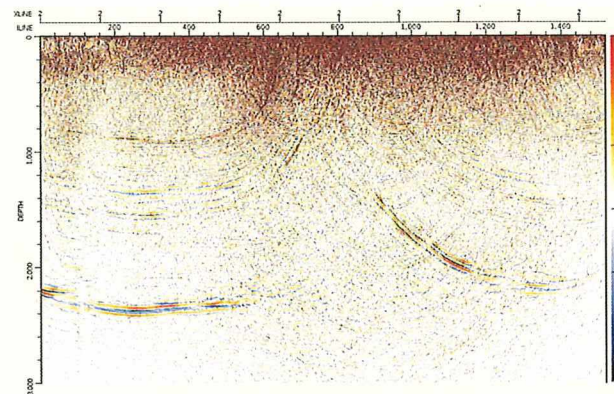
BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 95



(a) FVM



(b) QFVM

Abbildung 75: Q-Kompensation der XL 1641.

Common-Offset-Gather-Migration

Die Qualität des Migrationsgeschwindigkeitsmodells wird häufig durch die Verwendung von CIGs (Common-Image-Gather) überprüft. Zu diesem Zweck wurden alle drei Varianten von Modell 1 (isotrop, VTI, TTI) und das Modell 2 verwendet (Tabelle 9). Für jedes dieser Modelle wurde eine FVM für die 3D-prozessierten Daten durchgeführt (Tabelle 10). Damit stehen insgesamt vier Migrationsergebnisse zur Verfügung.

Zum Vergleich wurde sowohl der 2D-Schnitt des Migrationsvolumens entlang der Crossline XL 1641 als auch das CIG bei $x = 1750$ m dargestellt (Abbildungen 76 - 79). Das CIG befindet sich an einer Stelle, an der zahlreiche horizontale Reflektoren verlaufen. In den CIGs sind die amplitudenstärksten Bereiche markiert, darunter zwei im sedimentären Bereich und der Zechsteinreflektor.

Die beiden isotropen Modelle (Abbildung 76 und Abbildung 77) zeigen in den markierten Bereichen jeweils eine Krümmung, was ein Indikator dafür ist, dass das Migrationsgeschwindigkeitsmodell noch verbessert werden kann und eventuell Anisotropie berücksichtigt werden muss.

Im Vergleich dazu zeigen die anisotropen Modelle (Abbildung 78 und Abbildung 79) stärkere Amplituden, insbesondere für den Zechsteinreflektor. Allerdings ist weiterhin eine sogenannte „Hockeystick-Form“ der Reflektoren sichtbar, was ebenfalls auf ein inkorrektes Geschwindigkeitsfeld hindeutet. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das TTI-Geschwindigkeitsfeld das offenbar beste Migrationsgeschwindigkeitsmodell liefert, da die Reflektoren im CIG im Vergleich zu den anderen Modellen horizontaler verlaufen und damit konstruktiver aufgestapelt werden.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 96

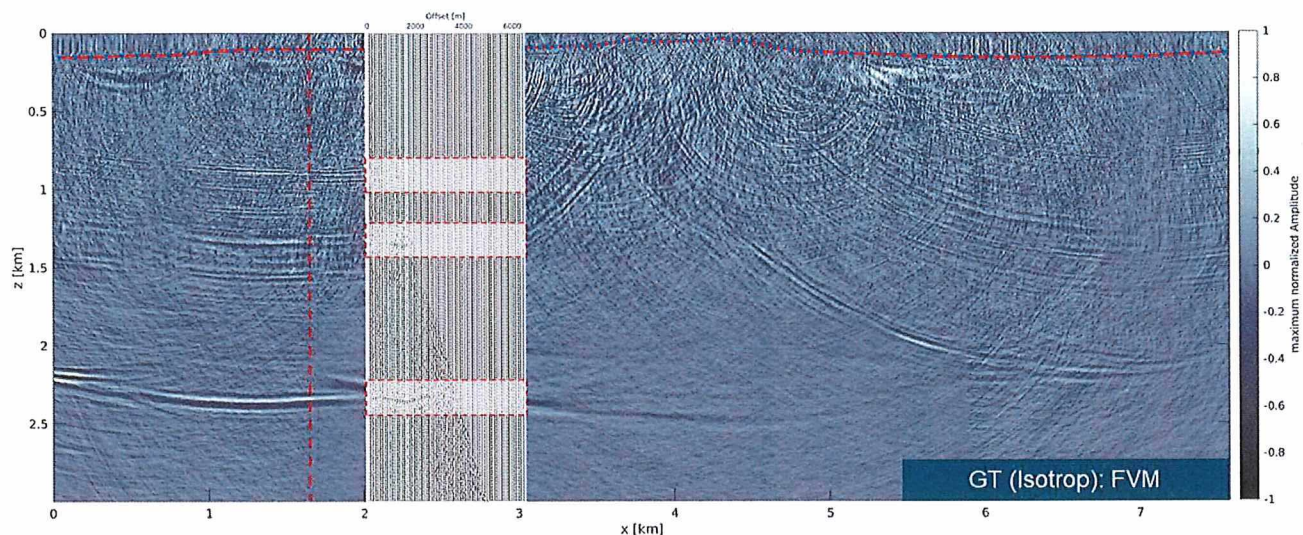


Abbildung 76: Ergebnis der FVM für isotropes Modell 1 und CIG bei x = 1750 m (rot gestrichelte Linie) (XL 1641). Blaues Dreieck: Empfänger, Roter Stern: Quellen.

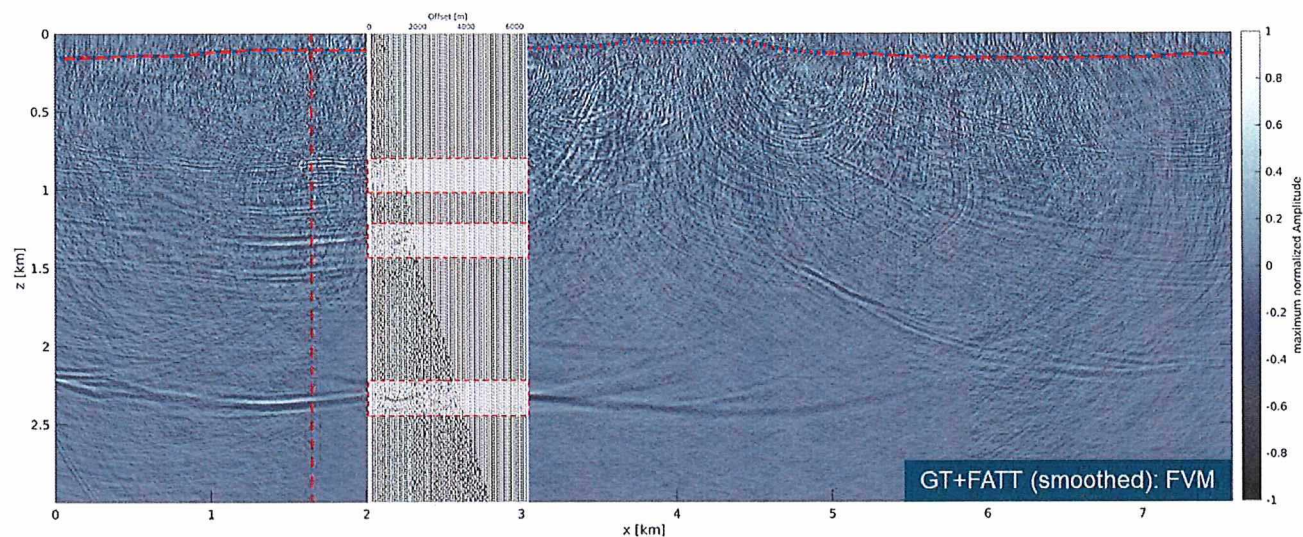


Abbildung 77: Ergebnis der FVM für isotropes Modell 2 und CIG bei x = 1750 m (rot gestrichelte Linie) (XL 1641). Blaues Dreieck: Empfänger, Roter Stern: Quellen.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 97

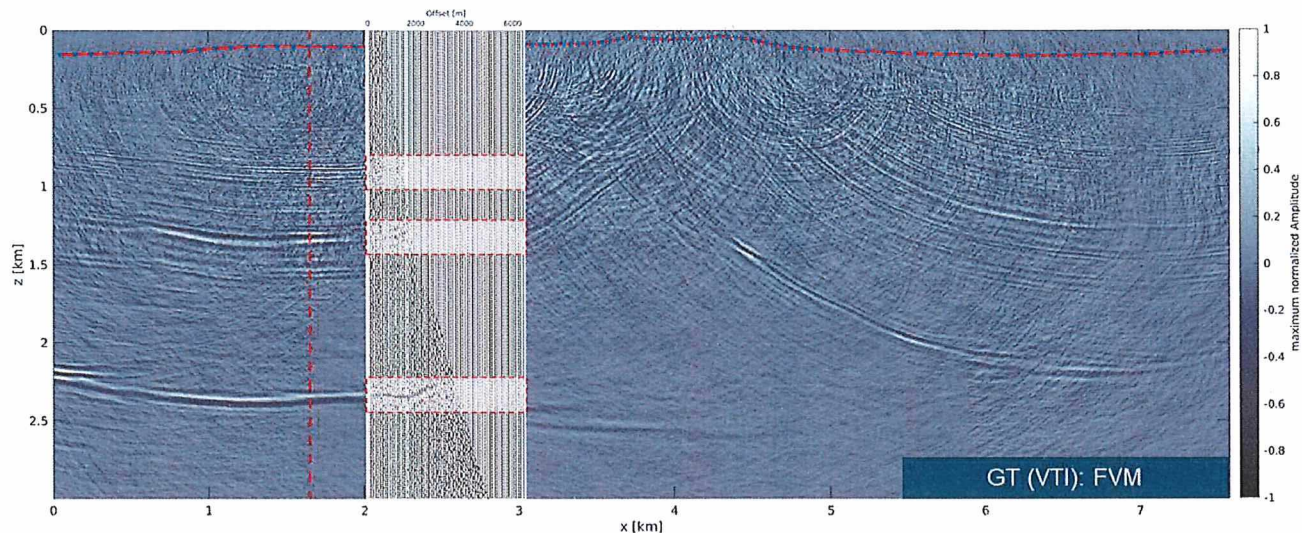


Abbildung 78: Ergebnis der FVM für VTI-Modell 1 und CIG bei $x = 1750$ m (rot gestrichelte Linie) (XL 1641). Blaues Dreieck: Empfänger, Roter Stern: Quellen.

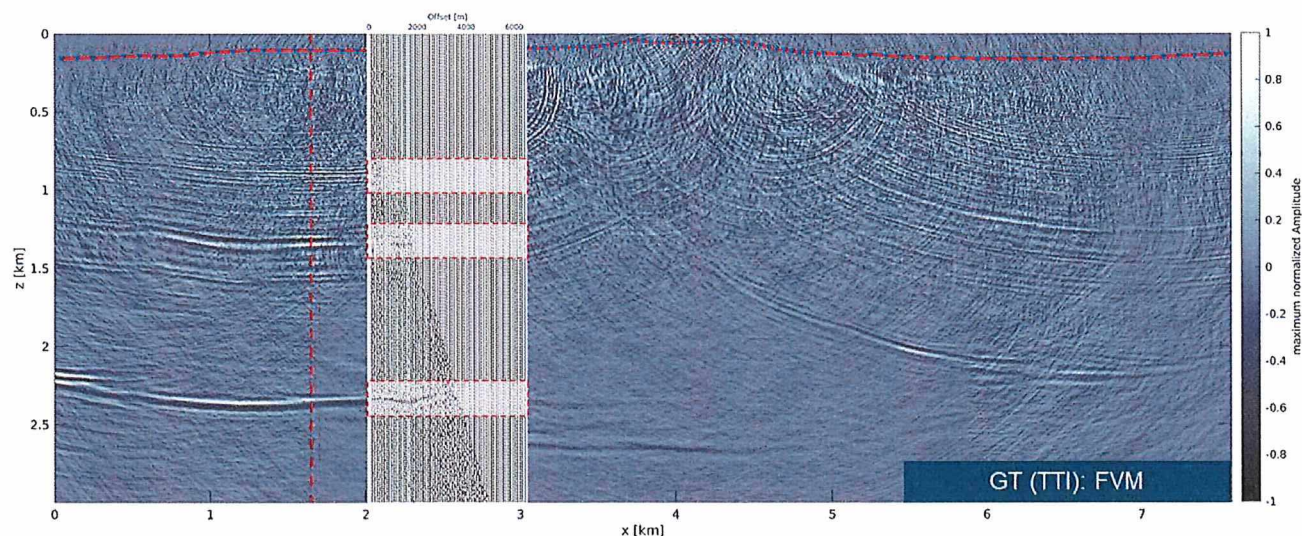


Abbildung 79: Ergebnis der FVM für TTI-Modell 1 und CIG bei $x = 1750$ m (rot gestrichelte Linie) (XL 1641). Blaues Dreieck: Empfänger, Roter Stern: Quellen.

XL 1540 - 1739

Die Erweiterung der Eingabedaten auf den Crossline-Bereich XL 1540 – 1739 führt zu einer Steigerung der Anzahl von Quellen und Empfängern und damit zu einer höheren Überdeckung der Untergundpunkte und einer Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses. Gleichzeitig erhöht sich jedoch der Rechenaufwand erheblich.

Die Erweiterung des Datenbereichs führt für alle durchgeführten Migrationen zu einer spürbaren Verbesserung der Abbildungsqualität (Tabelle 11). Um die Ergebnisse besser vergleichen zu können, wird jeweils der vertikale Tiefenschnitt durch das Migrationsvolumen an der Position XL 1641 dargestellt.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 98

Tabelle 11: Übersicht der Migrationsergebnisse für XL 1540 - 1739.

Verfahren	Richtungsabhängigkeit	Geschwindigkeitsmodell	Datenprozessierung
KPSDM	Isotrop	Modell 1	3D
KPSDM (COG)	Isotrop	Modell 1	3D
FVM (COG)	Isotrop	Modell 1	3D
KPSDM (COG)	VTI	Modell 1	3D
FVM (COG)	VTI	Modell 1	3D
KPSDM (COG)	TTI	Modell 1	3D
FVM (COG)	TTI	Modell 1	3D
KPSDM	Isotrop	Modell 2	3D
KPSDM (COG)	Isotrop	Modell 2	3D
FVM (COG)	Isotrop	Modell 2	3D
KPSDM (COG)	Isotrop	Modell 3	3D
FVM (COG)	Isotrop	Modell 3	3D
KPSDM (COG)	Isotrop	Modell 4	3D
FVM (COG)	Isotrop	Modell 4	3D
KPSDM (COG)	Isotrop	Modell 5	3D
FVM (COG)	Isotrop	Modell 5	3D

Geschwindigkeitsmodell: Isotrop

Der Vergleich der Migrationsergebnisse für die isotropen Modelle 1 (Abbildung 80) und 2 (Abbildung 81) zeigt eine deutliche Amplitudenzunahme der Reflektoren im Vergleich zur ausschließlichen Nutzung von XL 1641. Allerdings sind beide Migrationsergebnisse von nicht-reflektiver Energie (z. B. Tauchwellen, geführte Wellen) überlagert, die die Reflektoren teilweise überdecken.

Zur Entfernung dieser störenden Anteile wurde erneut die COG-Migration angewendet (Abbildung 82), wodurch ein Großteil des unerwünschten Signals eliminiert werden konnte. Im Anschluss erfolgte eine Postprozessierung der migrierten Daten. Durch die Kombination mehrerer Hochpassfilter, die auf unterschiedliche Bereiche des Abbildes angewandt wurden, konnten verbliebene tieffrequente Störsignalanteile weiter reduziert werden.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 99

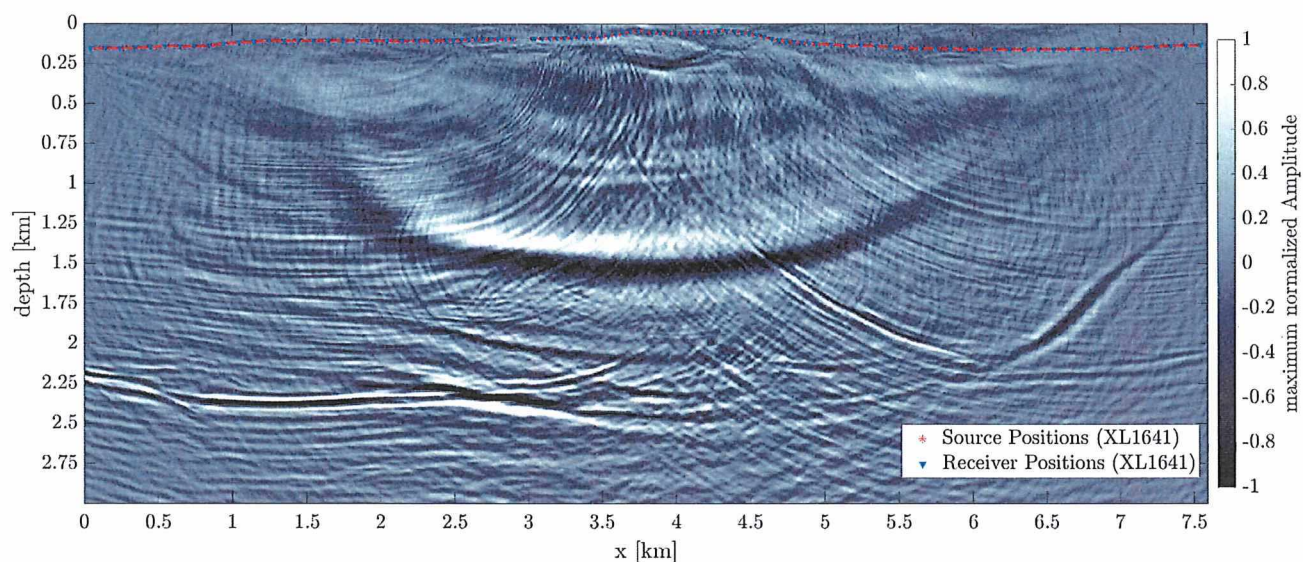


Abbildung 80: Ergebnis der KPSDM für isotropes Modell 1 (XL 1540 - 1739).

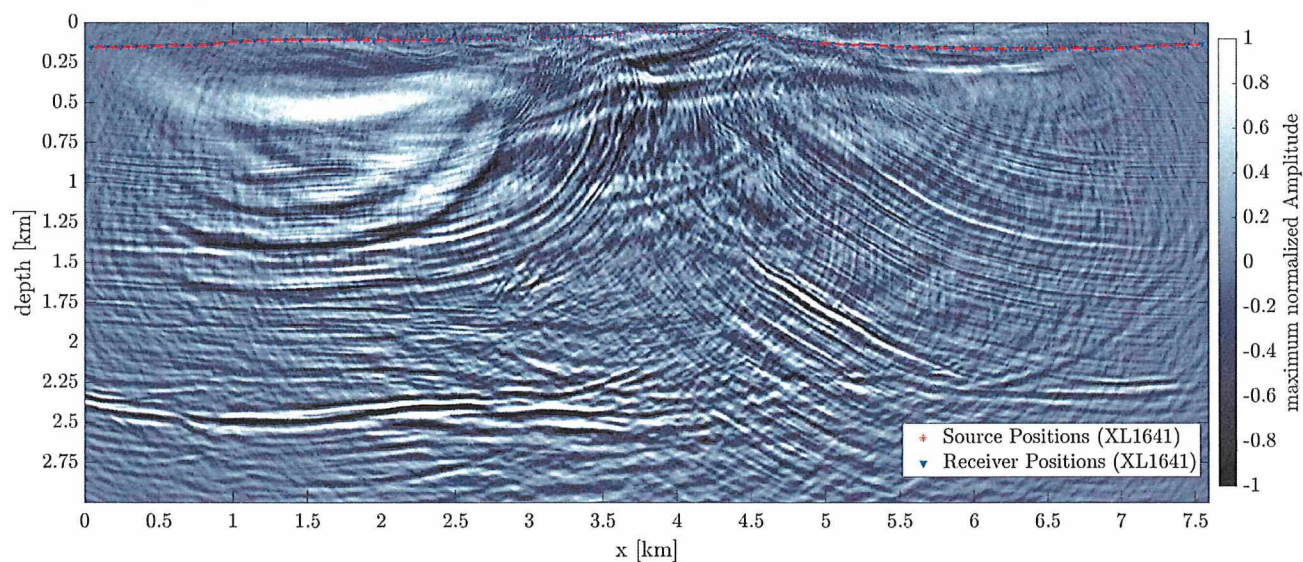


Abbildung 81: Ergebnis der KPSDM für Modell 2 (XL 1540 - 1739).

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 100

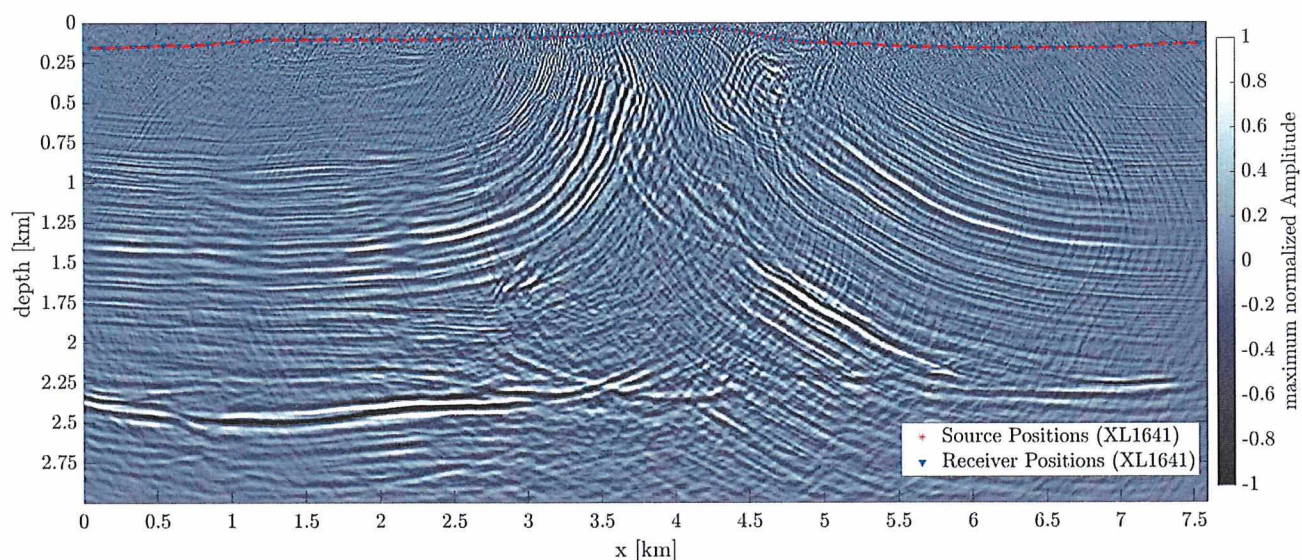


Abbildung 82: Ergebnis der KPSDM für Modell 2 mit CIG-Mute und Postprocessing (XL 1540 - 1739).

Nach den erfolgreichen Tests wurde die FVM für das isotrope Geschwindigkeitsmodell durchgeführt (Abbildung 83). Das Migrationsrauschen konnte signifikant verringert werden und die Reflektoren sind deutlich erkennbar. Die Vorteile der FVM gegenüber der KPSDM (Abbildung 82) für eine erfolgreiche Interpretation der Salzstruktur sind klar ersichtlich. Für die weiteren Ergebnisse werden daher ausschließlich die FVM-Abbildungen diskutiert.

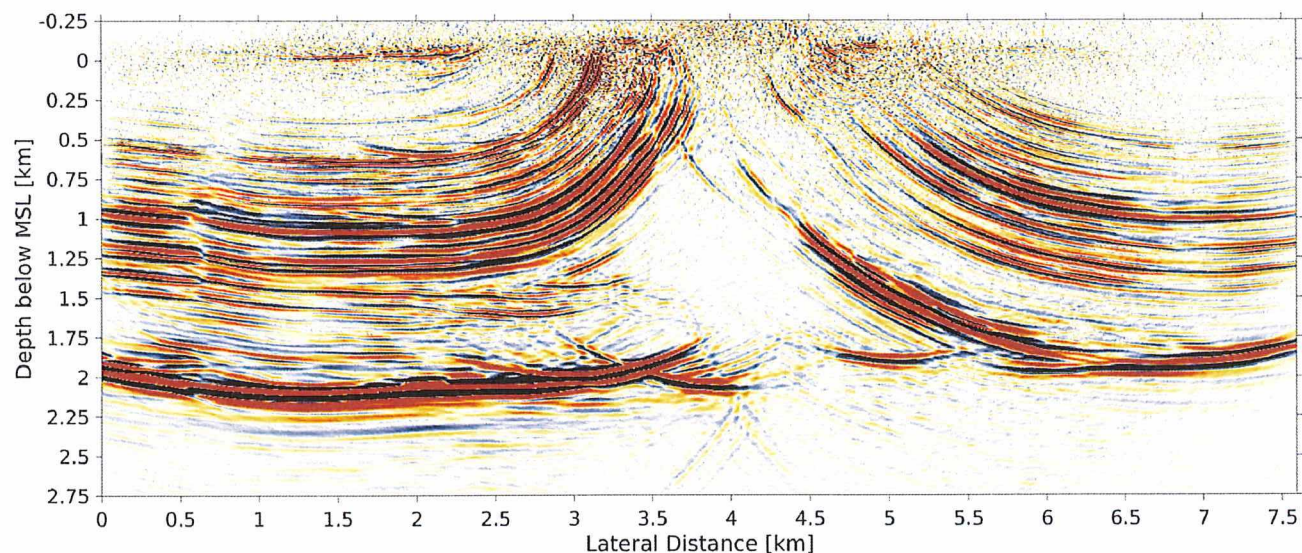


Abbildung 83: Ergebnis der FVM für isotropes Geofizyka Toruń-Modell mit CIG-Mute und Postprocessing (XL 1540 - 1739).

Geschwindigkeitsmodell: Anisotropie (VTI, TTI)

Analog zu den Tests mit der einzelnen Crossline (XL 1641) wurden erneut die anisotropen Geschwindigkeitsmodelle (VTI (Abbildung 84), TTI (Abbildung 85)) für die fokussierende Tiefenmigration verwendet. Der Einfluss zeigt sich beispielsweise im zentralen Bereich der Abbildung an den steil stehenden

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 101

Salzflanken. Diese verändern im Vergleich zum isotropen Ergebnis ihren Neigungswinkel. Im TTI-Ergebnis erkennt man, dass tiefer liegende Reflektoren in diesen Bereich flacher einfallen, während sich der Einfallswinkel oberflächennaher Reflektoren erhöht. Im Südwesten und Nordosten sind die anisotropen Geschwindigkeitsmodelle untereinander sehr ähnlich, da die sedimentären Ablagerungen in diesem Bereich horizontal geschichtet sind. Vor allem im Südwesten ist eine höhere Kohärenz des Schichtpaketes im Vergleich zum isotropen Ergebnis zu beobachten. Bemerkenswert ist außerdem, dass im oberflächennahen Bereich bei einer lateralen Distanz von ca. 1 - 2 km ein Reflektor abgebildet werden kann, der sich für den isotropen Fall nicht konstruktiv aufstapelt.

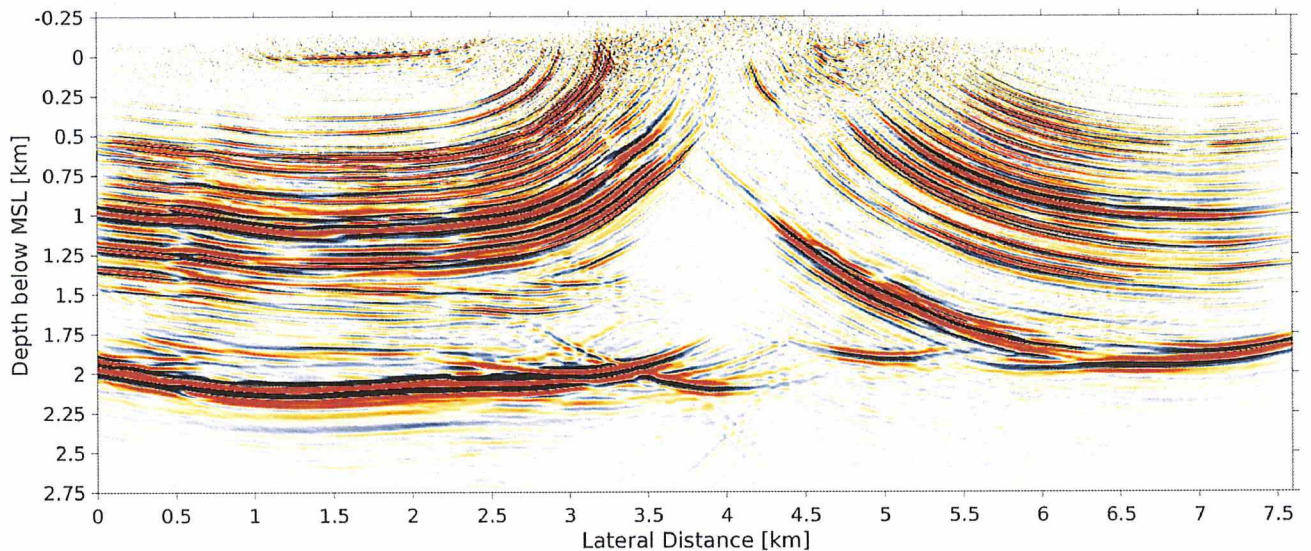


Abbildung 84: Ergebnis der FVM für anisotropes Geofizyka Toruń-Modell (VTI) mit CIG-Mute und Postprocessing (XL 1540 - 1739).

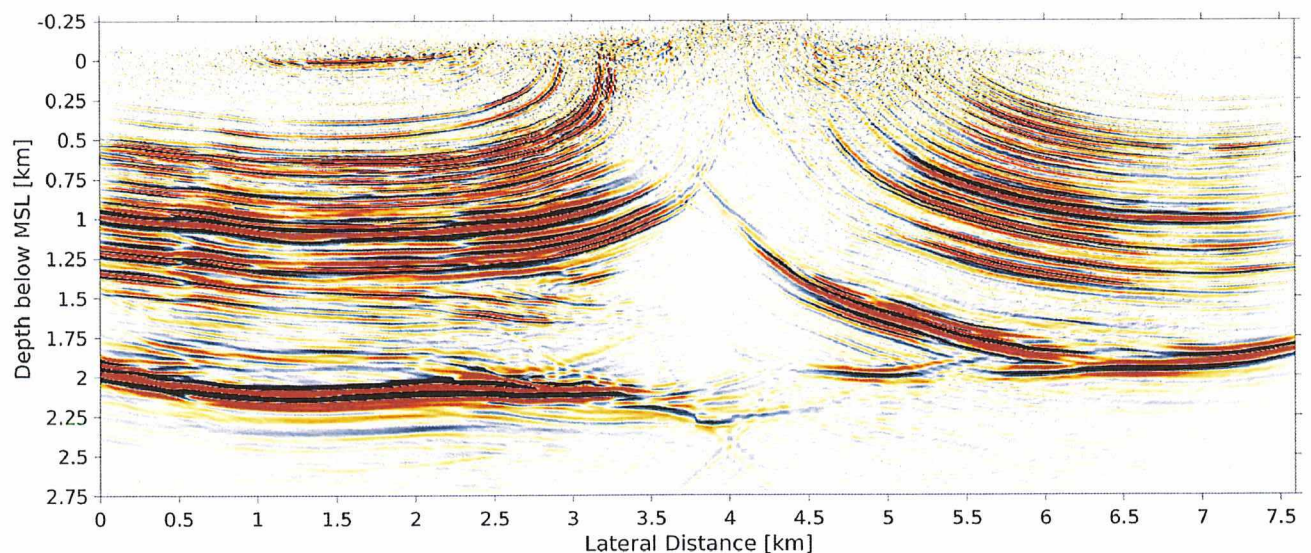


Abbildung 85: Ergebnis der FVM für anisotropes Geofizyka Toruń-Modell (TTI) mit CIG-Mute und Postprocessing (XL 1540 - 1739).

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 102

Geschwindigkeitsmodell: Ersteinsatzlaufzeittomographie

Weiterhin wurde Modell 2 für die Tiefenmigration genutzt. Die Ergebnisse der Kombination der Geschwindigkeitsmodelle von FATT und Geofizyka Toruń (GT) (Abbildung 86) sollte mit dem isotropen und unbearbeiteten GT-Modell verglichen werden (Abbildung 83). Der Hauptunterschied ist die Tiefenverschiebung durch die Hinzunahme des FATT Modells. Die höheren oberflächennahen Geschwindigkeiten führen zu einer vertikalen Verschiebung der Reflektoren zwischen 100 - 200 m in Abhängigkeit von der Position im Modell. Eine Verbesserung ist im Bereich der horizontal gelagerten Sedimente zu beobachten. Im Modell mit dem integrierten FATT-Modell sind diese nun nahezu perfekt horizontal ausgerichtet. Dieser Umstand deckt sich mit der geologischen Erwartung in diesem Bereich.

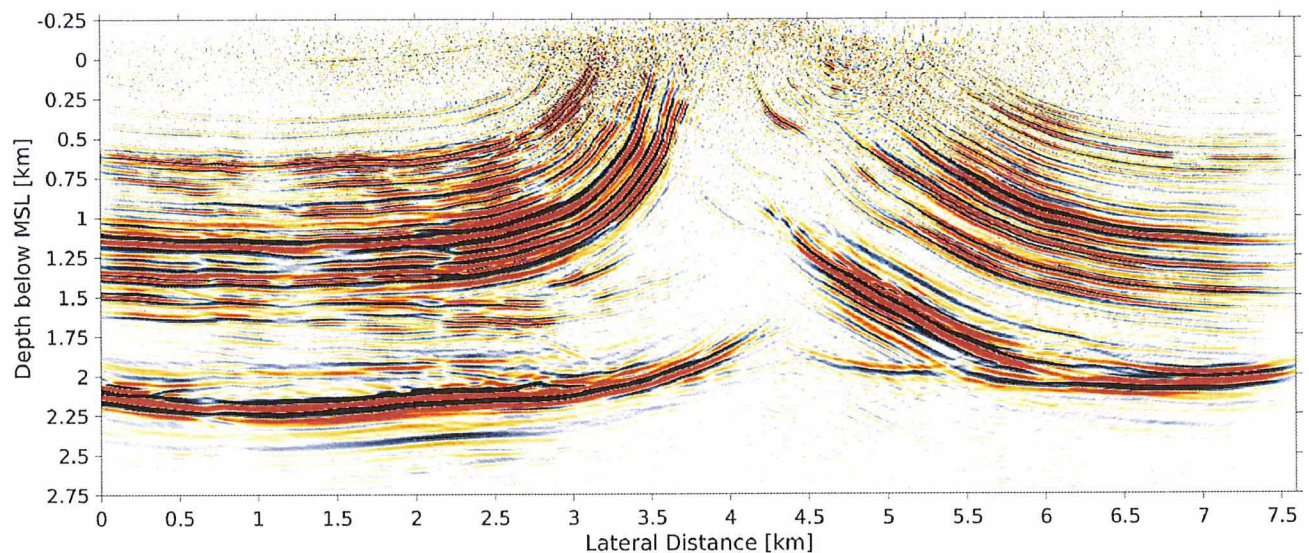


Abbildung 86: Ergebnis der FVM für isotropes Geofizyka Toruń-Modell + FATT mit CIG-Mute und Postprocessing (XL 1540 - 1739).

Geschwindigkeitsmodell: Full Waveform Inversion

Wie in Abschnitt 6.3 beschrieben, dient das FATT-Modell in geglätteter Variante als Startmodell für die FWI. Es wurden zwei FWI-Geschwindigkeitsmodelle durch das KIT bereitgestellt (6.3.2.4), die ebenfalls für die Tiefenmigration verwendet wurden. Aufgrund unterschiedlicher Strategien zur Verknüpfung der FWI-Modelle mit dem GT-Modell stehen drei Varianten zur Verfügung (Modell 3, 4, 5). Die beiden Verknüpfungen des FWI-Modells Version 1, dargestellt in Modell 3 (TUBAF) und Modell 4 (BGE), resultieren in nahezu identischen Ergebnissen, wie in den Abbildungen 87 und 88 zu sehen ist. Das war erwartbar, da die unterschiedlichen Herangehensweisen zur Erstellung des Geschwindigkeitsmodells sich ähneln. Größere Unterschiede bestehen zum finalen Ergebnis mit der Berücksichtigung des FWI-Modells Version 2 (Modell 5, Abbildung 89). Es sind Verbesserungen in der Abbildung von oberflächennahen Strukturen sichtbar. Beispielsweise weisen die obersten Sedimentschichten höhere Amplituden auf und es konnte eine kleinskalige Struktur im Bereich $x = 0,5 - 1,0$ km nahe der Oberfläche abgebildet werden. Weiterhin weist das Sedimentpaket im Nordosten wesentlich höhere Amplituden auf. Jedoch sind die steil stehenden Reflektoren an der Salzflanke in den Tiefenmigrationen mit dem ursprünglichen FWI-Ergebnis (Abbildung 87, 88) weiter bis zur Oberfläche verfolgbar. Es kann daher keine abschließende Bewertung der beiden FWI-Modelle vorgenommen werden, weil die Abbildungsergebnisse der fokussierenden Pre-Stack-Tiefenmigration zu ambivalent sind.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 103

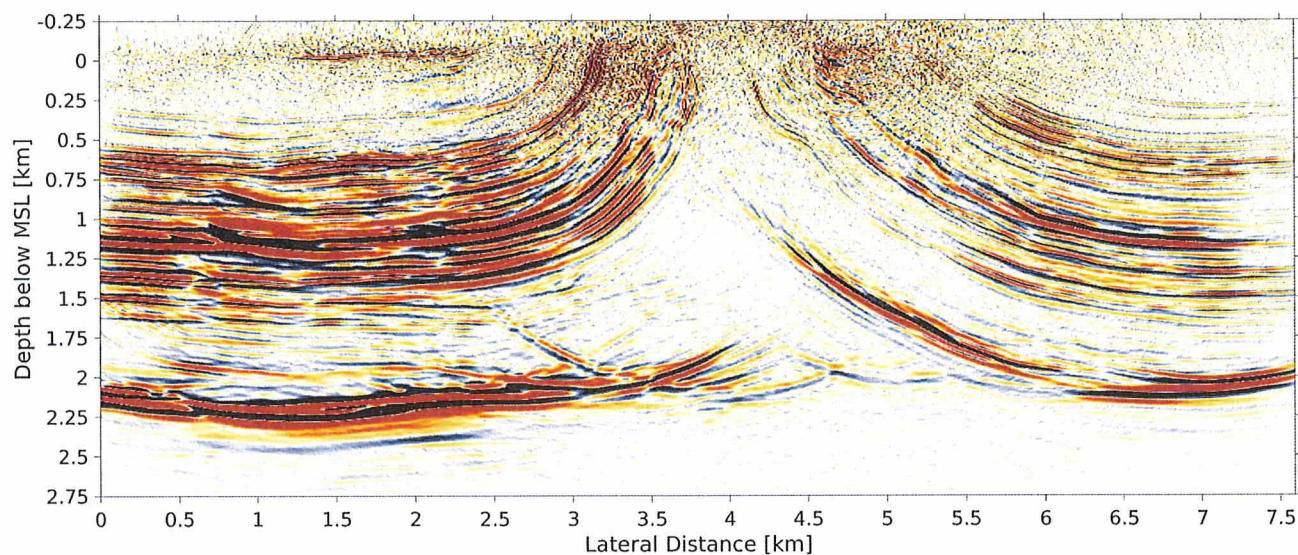


Abbildung 87: Ergebnis der FVM für FWI (Version 1, Modell 3) mit CIG-Mute und Postprocessing (XL 1540 - 1739).

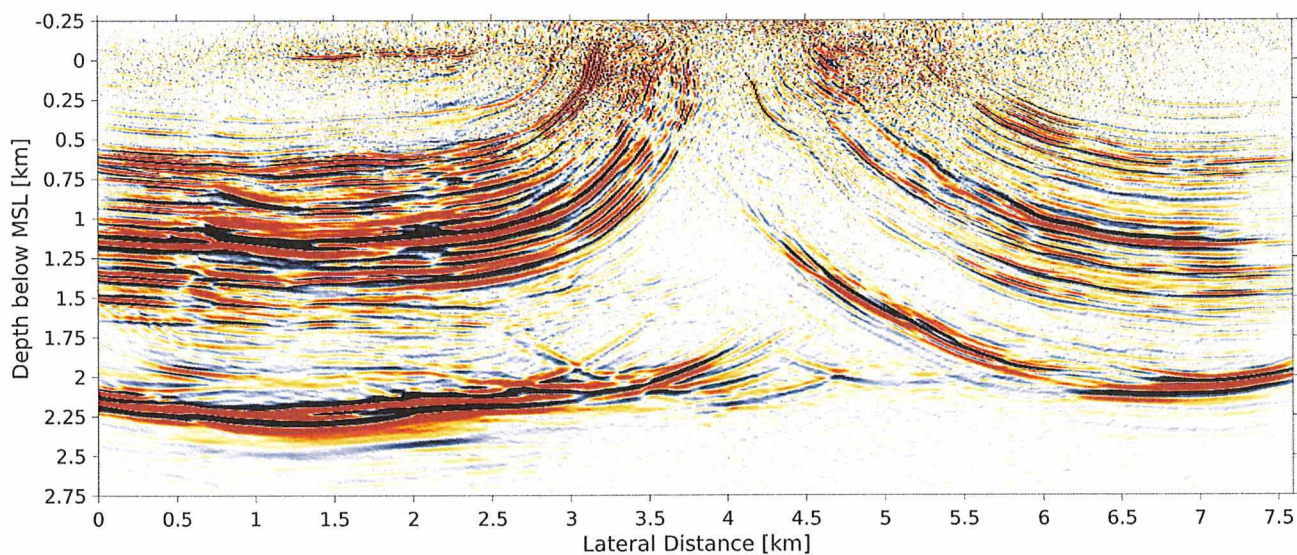


Abbildung 88: Ergebnis der FVM für FWI (Version 1, Modell 4) mit CIG-Mute und Postprocessing (XL 1540 - 1739).

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 104

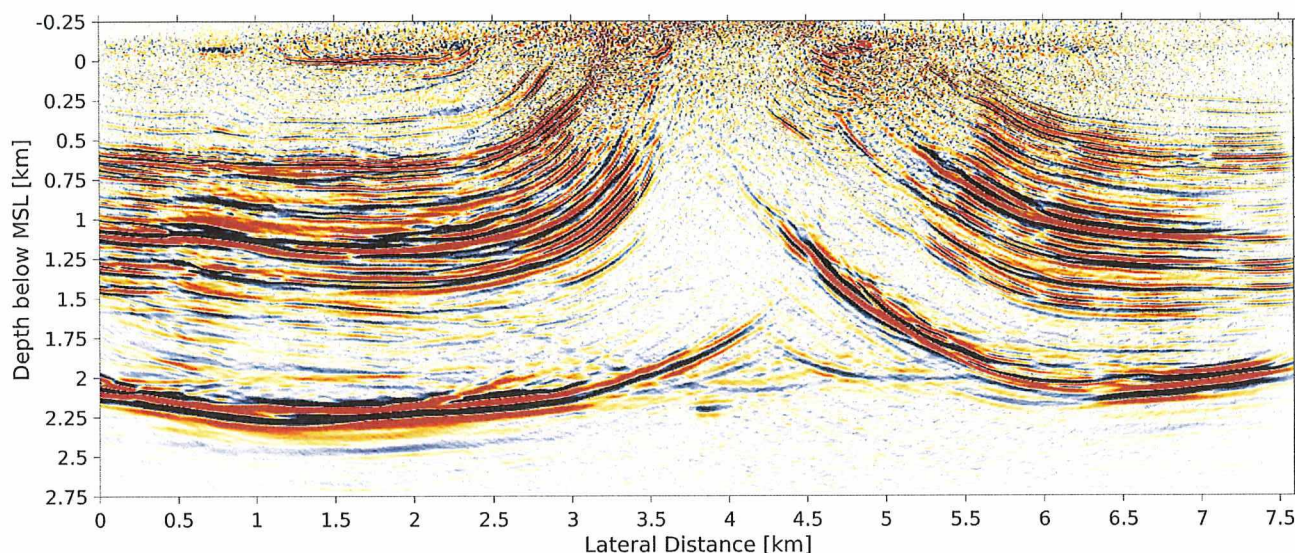


Abbildung 89: Ergebnis der FVM für FWI (Version 2, Modell 5) mit CIG-Mute und Postprocessing (XL 1540 - 1739).

Common-Offset-Gather-Migration

Common-Image-Gather (CIG) können genutzt werden, um die Eignung von Geschwindigkeitsmodellen für die Pre-Stack-Tiefenmigration zu beurteilen. Dies wird im Folgenden durchgeführt für drei Geschwindigkeitsmodelle, die bereits vorgestellt wurden, darunter das isotrope GT-Modell (Modell 1), das verknüpfte Modell mit dem FATT-Ergebnis (Modell 2) und zuletzt das FWI-Modell Version 1 mit der TUBAF-Verknüpfung (Modell 3). Die drei Modelle werden gewählt, da diese aufgrund der Isotropie und der verwendeten Verknüpfungsstrategie am besten für einen Vergleich geeignet sind. Für die zuvor präsentierten 2D-Schnitte wurden CIGs in einem Abstand von 5 m berechnet und im folgenden Vergleich daraus drei CIG-Positionen gewählt, die sich gleich verteilt im Modell befinden ($x = 1250$ m, 3750 m, 6250 m). Alle Ergebnisse stützen die Entscheidung der Nutzung eines CIG-Mute, da über alle Positionen hinweg Störanteile für höhere Offsets vorhanden sind (Abbildungen 90, 91, 92). Die CIG im Südwesten (Abbildung 90) und Nordosten der Sektion (Abbildung 92) ähneln sich erwartungsgemäß aufgrund der horizontal geschichteten Sedimente in den beiden Bereichen. Es lässt sich beobachten, dass durch die Hinzunahme von oberflächennahen Informationen im Geschwindigkeitsmodell die Reflektoren in den CIG sichtbar flacher werden. Weiterhin sind jedoch die Unterschiede zwischen GT+FATT und GT+FWI untereinander vergleichsweise gering. Die bereits erwähnten Unterschiede in den Reflektortiefen für die beiden verknüpften Modelle werden auch in dieser Betrachtung deutlich. Es kann diskutiert werden, ob die isotrope FATT/FWI die anisotropen Effekte des Untersuchungsgebietes durch zu hohe Geschwindigkeiten kompensiert. Diese These ist konsistent mit den höheren Geschwindigkeiten der beiden Modelle und den damit tieferliegenden Reflektoren. Die Situation im zentralen Bereich des Modells gestaltet sich hingegen anders (Abbildung 91). Hier sind insgesamt weniger Reflektoren zu beobachten, da sich diese CIG-Position im zentralen Bereich des Salzdomes befindet. Prominent sind die hochfrequenten Störanteile die sich über viele Tiefenbereiche und Offsets erstrecken. Deutlich amplitudenschwächer zeichnen sich für niedrige Tiefen und geringe Offsets einige Reflektoren ab. Diese können in Verbindung mit der Oberkante des Salzkörpers gebracht werden. Zudem ist in einem Tiefenbereich ab ca. 2000 m der Zechsteinreflektor erkennbar und über fast alle Offsets verfolgbar. Dabei wird deutlich, dass keines der genutzten Geschwindigkeitsmodelle in der Lage ist, diesen Zechsteinreflektor über den gesamten Offsetbereich hinweg horizontal darzustellen. Dadurch kommt es zu destruktiver Interferenz bei der Stapelung und der Reflektor kann unterhalb

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht

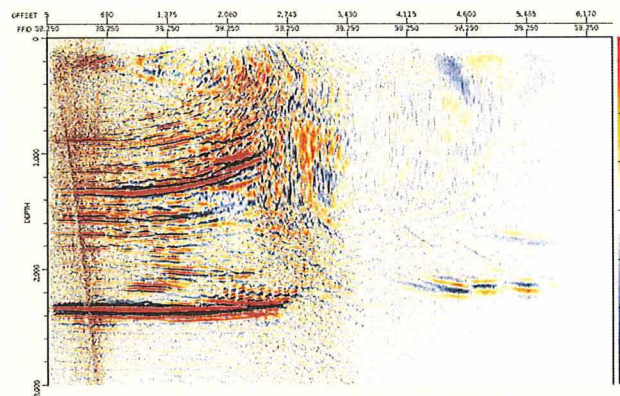


BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

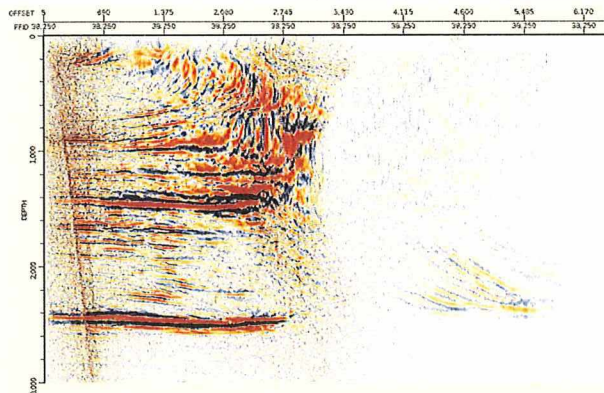
Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 105

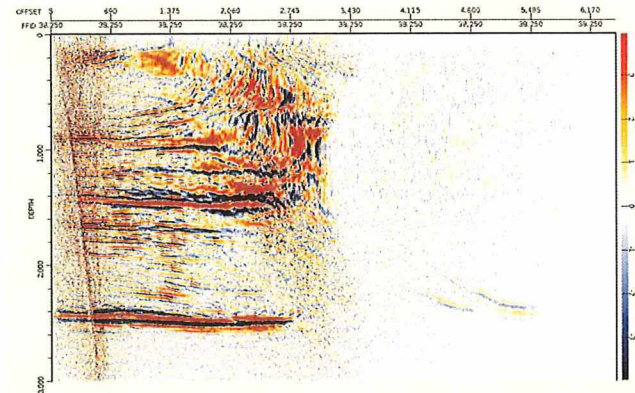
des Salzdomes nur schwach bzw. nicht korrekt abgebildet werden. Die Strahlwege von den Quell- und Empfängerpunkten zu den Imagepunkten dieses Zechsteinreflektors an dieser CIG-Position sind für große Offsets vergleichsweise lang und verlaufen am Rand bzw. um den Salzdom herum. Daher ist es extrem schwierig, das passende Geschwindigkeitsmodell für diesen Bereich zu bestimmen. Dies führt schließlich dazu, dass der Zechsteinreflektor in diesem Bereich nicht durchgängig in den Migrationsergebnissen verfolgbar ist.



(a) GT (Modell 1)



(b) GT+FATT (Modell 2)



(c) GT+FWI (Modell 3)

Abbildung 90: Common Image Gather x = 1250 m

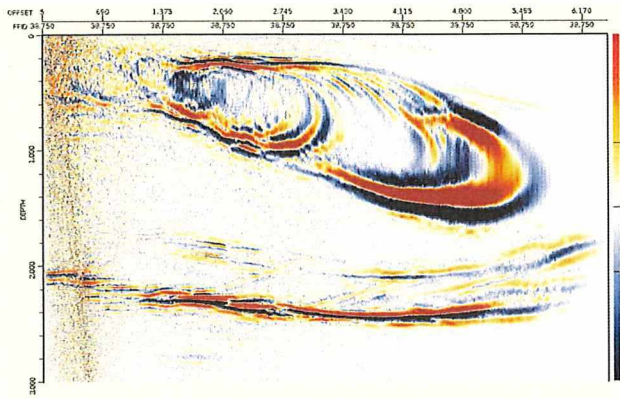
Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS -
Abschlussbericht



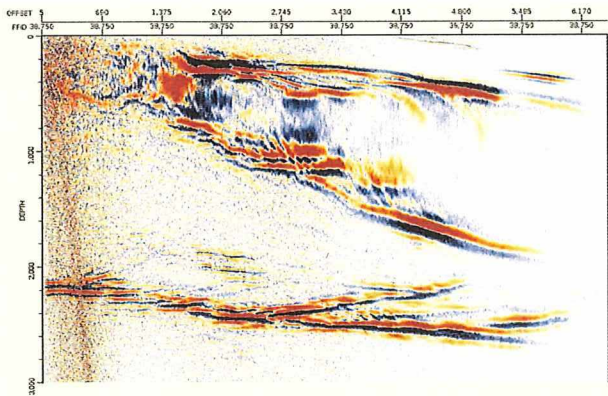
BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

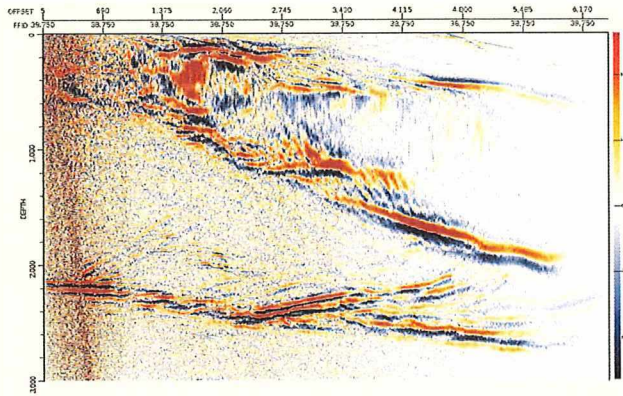
Blatt: 106



(a) GT (Modell 1)



(b) GT+FATT (Modell 2)



(c) GT+FWI (Modell 3)

Abbildung 91: Common Image Gather x = 3750 m

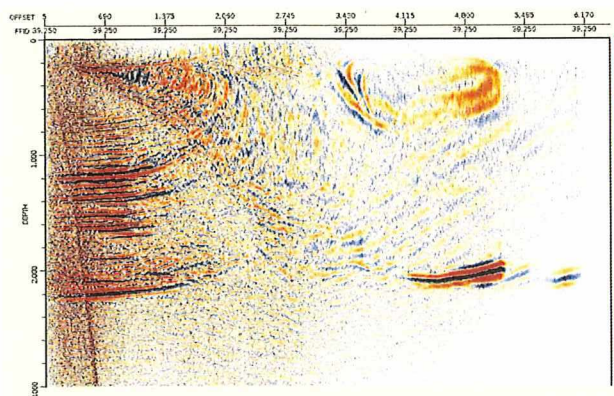
Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



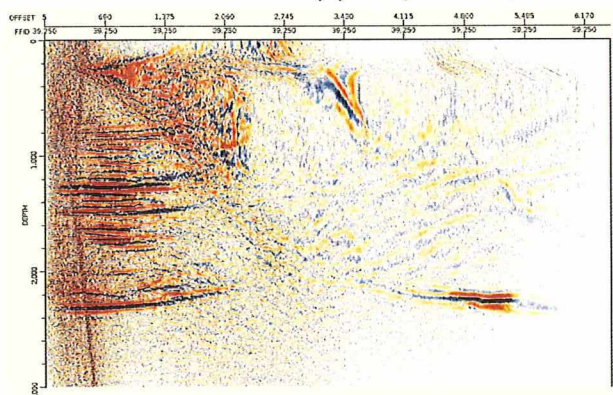
BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

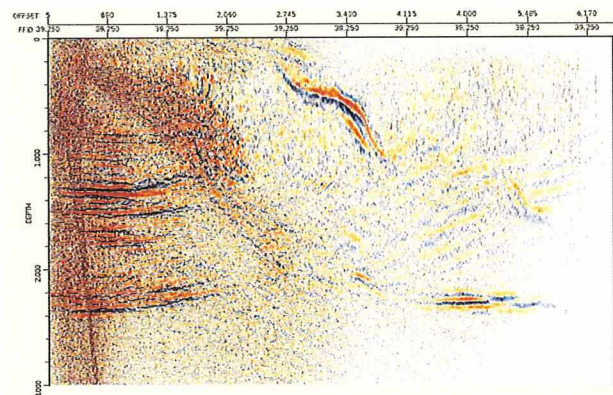
Blatt: 107



(a) GT (Modell 1)



(b) GT+FATT (Modell 2)



(c) GT+FWI (Modell 3)

Abbildung 92: Common Image Gather x = 6250 m

7.1.2 Unter-Tage-Stationen

Die an den Unter-Tage-Stationen aufgezeichneten Schüsse der 3D-Seismik wurden für ein zusätzliches Imaging aus dem Bergwerk heraus verwendet. Dafür wurden die Common-Shot-Gather (CSG) in Common-Receiver-Gather (CRG) umsortiert. Die Daten wurden in diesen CRGs prozessiert und mittels isotroper FVM bearbeitet. Die Abbildungen 93 und 94 zeigen zwei Schnitte durch das resultierende Migrationsvolumen in Inline- bzw. Crossline-Richtung. Als Geschwindigkeitsmodell für die Migration diente die vertikale Geschwindigkeit des anisotropen GT-Geschwindigkeitsmodells. Die beiden Schnitte zeigen ein detailliertes Bild der Reflektoren unterhalb der Salzstruktur, und zwar sowohl die Zechsteinbasis als auch direkt darüber weitere Reflektoren (schwarze Pfeile). Aufgrund der Akquisitionsgeometrie werden Reflektoren nur in diesem zentralen Bereich abgebildet. Die Reflektoren selbst zeigen deutlich mehr interne Strukturierung und Details als im Abbild der 3D-Oberflächenseismik. So können z.B. kleine Versätze in den Reflektoren beobachtet werden (gelbe gestrichelte Linienelemente), die sich zum Teil auch durch mehrere Reflektoren hinweg verfolgen lassen. Auch nahe der Oberfläche sind einige sehr steil stehende Reflektoren abgebildet, welche als die Sedimentschichten auf dem Salzrücken interpretiert werden können. Diese können hier im Fall der Unter-Tage-Stationen abgebildet werden, da diese Reflektoren "von unten" durch Tauchwellen beleuchtet werden. Insgesamt gesehen war die Hinzunahme der Unter-Tage-Stationen für die selektive Abbildung einiger Strukturen sehr hilfreich und lieferte durchaus einen signifikanten Wissenszuwachs insbesondere für den zentralen Bereich unterhalb und oberhalb der Salzstruktur.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 108

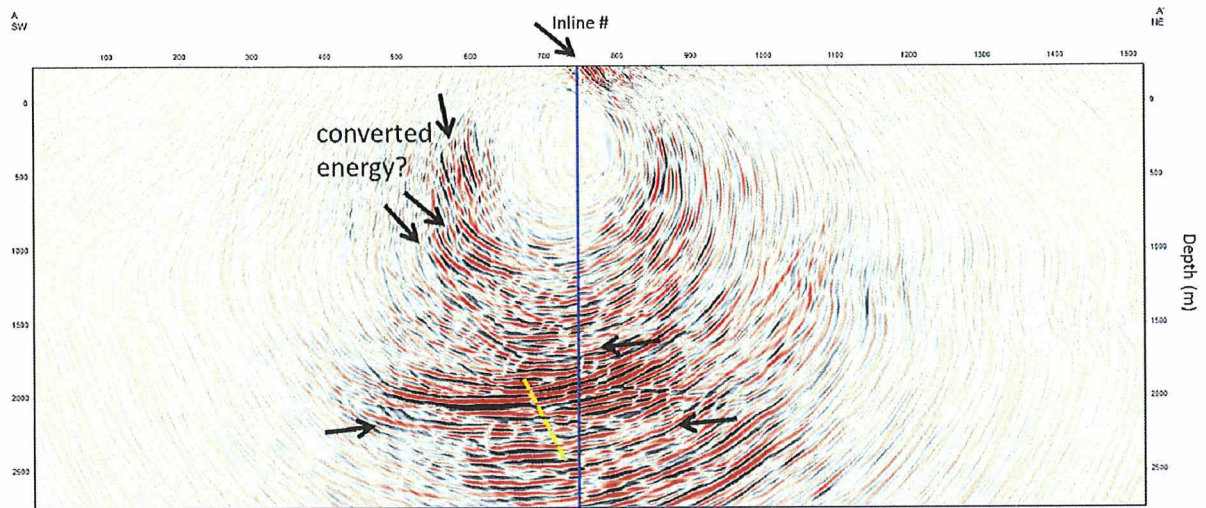


Abbildung 93: Schnitt durch das 3D-FVM-Volumen (Inline)

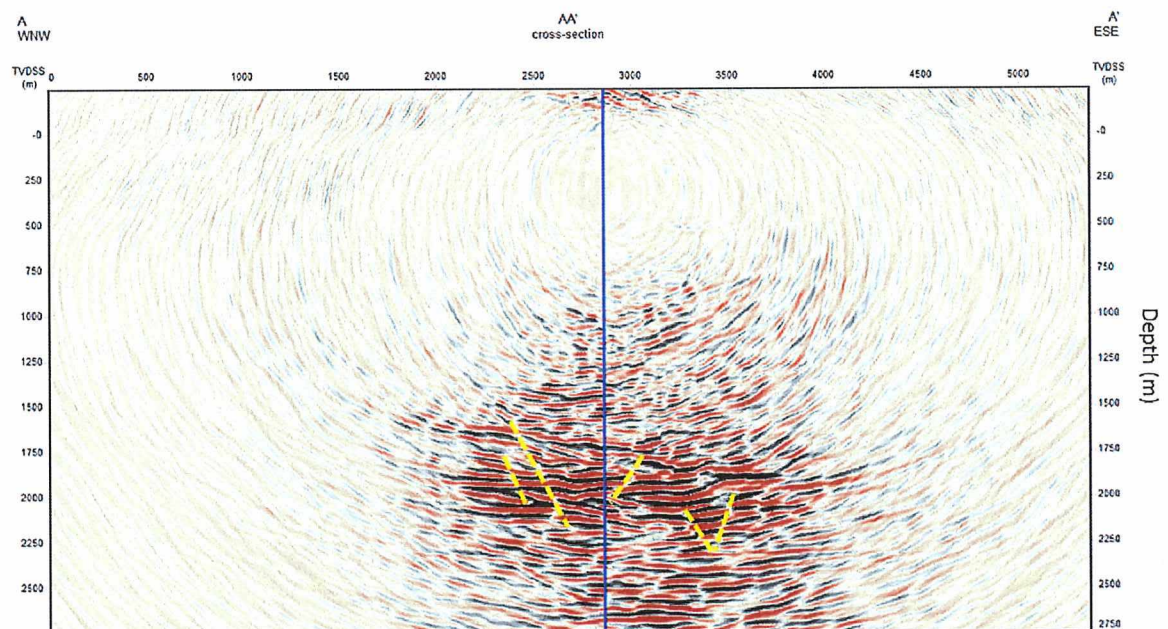


Abbildung 94: Schnitt durch das 3D-FVM-Volumen (Crossline)

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 109

8 Interpretation und Zusammenfassung

Die Arbeiten am KIT konzentrierten sich in der ersten Projekthälfte auf die im Antrag beschriebenen grundlegenden methodischen Weiterentwicklungen, die für die Multi-Parameter-FWI in viskoelastisch anisotropen Medien notwendig sind. Zunächst wurden die grundlegenden theoretischen Gleichungen zur Beschreibung der Wellenausbreitung in viskoelastischen anisotropen Medien neu formuliert, um Konsistenz mit den bisherigen Implementationen zu gewährleisten. Anschließend wurden die entsprechenden Differentialgleichungen in die Simulationssoftware SOFI2D implementiert. Mit dieser neuen Implementierung wurden u.a. synthetische 2D-Referenzdaten für das vorhandene Dämpfungs- und Anisotropiemodell der Asse entlang einer aus den 3D-Modellen extrahierten 2D-Linie erzeugt und der TUBAF zur Verfügung gestellt. Die mit diesen Modellen durchgeführten Simulationsstudien haben u.a. gezeigt, dass die für die Asse 3D angenommene relativ ausgeprägte seismische Anisotropie zu signifikanten Laufzeitveränderungen führen kann. Weiterhin wurde festgestellt, dass die seismische Signatur von den angenommenen Modellen für Fluidbewegungen sehr schwach und vermutlich in seismischen Daten nicht direkt erkennbar ist.

In der zweiten Projektphase konzentrierten sich die Arbeiten des KIT auf die Anwendung der 3D-akustischen FWI auf die 3D-Messdaten. Dafür wurde ein Gebiet von etwa 8 Quadratkilometern aus dem Gesamtgebiet von etwa 40 Quadratkilometern ausgewählt. Aus Effizienzgründen wurde die 3D-akustische FWI im Frequenzbereich durchgeführt und sich auf die Ersteinsätze in den seismischen Daten konzentriert, die in der akustischen Näherung modellierbar sind. Rekonstruktionstests anhand von synthetischen Modellen zeigten, dass für das ausgewählte Gebiet eine gute Tiefeneindringung von bis zu 1,5 Kilometern sowie eine gute vertikale und horizontale Auflösung theoretisch möglich sind. Die Anwendung der 3D-akustischen FWI auf die Messdaten zeigte jedoch vor allem im oberflächennahen Bereich Anomalien im Geschwindigkeitsmodell, die teilweise auch in den Modellen der Laufzeittomographie (FATT) erkennbar sind. Es bildeten sich aber auch kleinräumige Strukturen ab, die geologisch schwer zuzuordnen sind und bei denen es sich um Artefakte handeln könnte. Die systematische Analyse verschiedener 3D-Startmodelle ergab, dass das initiale Modell einen großen Einfluss auf das invertierte Geschwindigkeitsmodell hat und dabei Signale teilweise nicht korrekt angepasst werden (Cycle Skipping). Weitere Untersuchungen nach Projektabschluss sind erforderlich, um eine robustere Konvergenz sowie eine bessere Tiefeneindringung der 3D-akustischen FWI zu ermöglichen. Diese werden am KIT im Rahmen einer Dissertation durchgeführt, deren Fertigstellung für Ende 2026 geplant ist. Um die genannten Probleme zu beheben, sollen zunächst folgende Modifikationen am FWI-Workflow vorgenommen werden: a) Anwendung der FWI im Zeitbereich, b) Einbeziehung robusterer Misfitfunktionale und c) Verwendung der Hessematrix für die Tiefenverstärkung.

An der TU Bergakademie Freiberg wurde ein breites Spektrum an Arbeiten für das DOSIS-Projekt abgedeckt. Die erfolgten Arbeiten lassen sich grob in drei Kategorien gliedern: in die Weiterentwicklung der fokussierenden Pre-Stack-Tiefenmigration, in die Anwendung von konventionellen Verfahren (Reflexionstomographie und Ersteinsatzlaufzeitomographie) für die Ableitung von Geschwindigkeitsmodellen und in die Anwendung der Pre-Stack-Tiefenmigration unter Nutzung der beiden erstgenannten Punkte. Die Arbeiten erfolgten dabei zunächst an synthetischen Daten, wurden dann aber auf den Asse 3D-Datensatz inklusive der Unter-Tage-Stationen übertragen. Dadurch konnten zahlreiche Erkenntnisse über den Aufbau der Asse-Salzstruktur gewonnen werden.

Für die Weiterentwicklung der Pre-Stack-Tiefenmigration erfolgten zunächst Tests der bestehenden Algorithmen an einem synthetischen 2D-Modell. Weiterhin wurde ein Konzept für die Implementierung von Anisotropie und Dämpfung erarbeitet und in die Migrationssoftware implementiert. Zudem wurden die Software auf eine Common-Offset-Gather-Migration erweitert, was sich für die Bearbeitung des Asse 3D-Datensatzes und die Qualität der Migrationsergebnisse als sehr vorteilhaft herausgestellt hat.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 110

In der Reflexionstomographie erfolgte zunächst eine 2D-Reprozessierung des Datensatzes mit u.a. Nutzung von Tomo-Statik-Korrekturen. Die Reflexionstomographie wurde anschließend für den reprozessierten Datensatz mit unterschiedlichen Startmodellen durchgeführt. Dadurch wurde ein verbessertes Stapelergebnis im Vergleich zum Ausgangsdatsatz gewonnen und zeitgleich ein Geschwindigkeitsmodell für die Tiefenmigration erstellt.

Die Ersteinsatzlaufzeitomographie lieferte ein hochaufgelöstes 3D-Geschwindigkeitsmodell für den oberflächennahen Bereich der Asse. Diese hohe Auflösung ermöglichte eine detaillierte Interpretation bekannter geologischer Einheiten und den Abgleich mit Bohrloch- und LiDAR-Daten, welche eine hohe Übereinstimmung zeigten. Weiterhin wurde das abgeleitete 3D-Geschwindigkeitsmodell als Startmodell für die FWI und als Teil von Migrationsgeschwindigkeitsmodellen für die Pre-Stack-Tiefenmigration genutzt.

In der Anwendung der Pre-Stack-Tiefenmigration wurde sich auf unterschiedliche Teilbereiche des Gesamtdatensatzes fokussiert. Es wurden zahlreiche Migrationsergebnisse erstellt und miteinander verglichen. Dabei wurden die Eingangsdaten (2D- oder 3D-prozessiert), verschiedene Geschwindigkeitsmodelle (GT mit/ohne FWI/FATT), die Richtungsabhängigkeit der Wellenausbreitung (isotrop, anisotrop (VTI, TTI)) und die Dämpfung (mit/ohne Q-Kompensation) variiert. Die große Vielfalt an getesteten Modellen und Parametern ermöglichte eine gute Einschätzung des Einflusses der einzelnen Faktoren auf das Migrationsergebnis. Zunächst wurde ein 2D-Subdatensatz in Form einer einzelnen Crossline (XL 1641) verwendet, der anschließend unter Nutzung von HPC-Cluster-Ressourcen auf einen deutlich größeren Crossline-Bereich (XL 1540 - 1739) erweitert werden konnte. Außerdem wurden Unter-Tage-Stationen aus dem Bergwerk der Asse verwendet, die während der 3D-Seismik-Messung aufgezeichnet haben. Diese unkonventionelle Messgeometrie erlaubte einen zusätzlichen Erkenntnisgewinn über den inneren Aufbau des Salzstocks sowie die tieferen zentralen Bereiche direkt darunter, die nur mit den Empfängern an der Erdoberfläche nicht bzw. nur sehr schwierig abgebildet werden können.

Die Forschungsergebnisse der verschiedenen Teilaspekte des Projektes wurden im Laufe des Projektes auf zahlreichen nationalen und internationalen Konferenzen erfolgreich präsentiert.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 111
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	64213000				HF	PH	0002	00	

9 Konferenzbeiträge

Folgende Beiträge wurden von der TU Bergakademie Freiberg auf nationalen und internationalen Konferenzen vorgestellt oder waren zum Zeitpunkt der Erstellung des Abschlussberichtes bereits für das Tagungsprogramm bewilligt:

- 2023, Jahrestagung der DGG, Vortrag, „*Development of a high-resolution seismic imaging workflow in the frame of nuclear waste disposal*“
- 2023 EGU General Assembly, Poster, „*Development of an optimized, combined and high-resolution imaging method for the site investigation of radioactive repositories (DOSIS)*“
- 2023, Arbeitskreis Seismik, Vortrag, „*DOSIS Projektvorstellung*“
- 2024, Jahrestagung der DGG, Poster, „*3D High-Resolution Velocity Model Building for the Characterization of a Nuclear Waste Disposal Site (Asse, Lower Saxony)*“
- 2024, Jahrestagung der DGG, Vortrag, „*Advancing seismic imaging: Fresnel volume migration in anisotropic and anelastic media*“
- 2024, EGU General Assembly, Poster, „*Advancing seismic imaging: Fresnel volume migration in anisotropic and anelastic media*“
- 2024, EAGE Annual, Poster, „*Advancing seismic imaging: Fresnel volume migration in anisotropic and anelastic media*“
- 2024, EAGE Annual, Poster, „*3D High-Resolution Velocity Model Building for the Characterization of a Nuclear Waste Disposal Site (Asse, Lower Saxony)*“
- 2024, International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and their Margins, Poster, „*3D High-Resolution Velocity Model Building for the Characterization of a Nuclear Waste Disposal Site (Asse, Lower Saxony)*“
- 2024, International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and their Margins, Vortrag, „*Advancing seismic imaging: Fresnel volume migration in anisotropic and anelastic media*“
- 2024, AGU Annual, Poster, „*Advancing seismic imaging: Fresnel volume migration in anisotropic and anelastic media*“
- 2025, Jahrestagung der DGG, Poster, „*Anisotropic anelastic Fresnel-Volume-Migration of the Asse 3D seismic data set*“
- 2025, Jahrestagung der DGG, Poster, „*A 3D high-resolution velocity model of the Asse salt structure (Lower Saxony)*“
- 2025, Jahrestagung der DGG, Poster, „*Reflection seismic imaging at the Asse salt structure from in-mine seismic recordings of a 3D surface seismic survey*“
- 2025, Jahrestagung der DGG, Präsentation, „*Bearbeitung und Analyse der 3D-Seismik Daten im Bereich der Asse Salzstruktur (Niedersachsen)*“
- 2025, EGU General Assembly, Poster, „*Anisotropic Anelastic Fresnel-Volume-Migration of the Asse 3D Seismic Data Set*“
- 2025, EAGE Annual, Präsentation, „*Anisotropic Anelastic Fresnel-Volume-Migration of the Asse 3D Seismic Data Set*“

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 112

Folgende Beiträge wurden vom KIT auf nationalen Konferenzen vorgestellt:

- 2022, Deutsche Physikerinnentagung, Vortrag, „*Effects of seismic anisotropy and attenuation on first-arrival waveforms recorded at the Asse II nuclear repository*“
- 2024, Jahrestagung der DGG, Vortrag, „*On the assessment of fluid pathways along the southern flank of the Asse salt structure*“

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 113

10 Abschlussarbeiten & Referenzen

Bachelorarbeit, die an der TUBAF angefertigt wurde:

- 2022, [REDACTED], „Seismic imaging of the shallow subsurface above the Asse salt diapir with focus on static corrections“

Masterarbeiten, die am KIT angefertigt wurden:

- 2022, [REDACTED], „Effects of seismic anisotropy and attenuation on first-arrival waveforms recorded at the Asse II nuclear repository“
- 2024, [REDACTED], „Seismic signatures of fluid pathways along the southern flank of the Asse salt structure“
- 2024, [REDACTED], „2D acoustic full waveform inversion of the Asse II mine model“
- 2024, [REDACTED], „3D anisotropic finite-difference modelling on the standard staggered grid“

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 114
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	64213000				HF	PH	0002	00	

11 Literaturverzeichnis

- [1] Jerzy Trela u. a. „Quantum nodal system – Asse 3D survey success story“. In: *First Break* (2021).
- [2] Thomas Bohlen u. a. „Seismic characterization of waste disposals by full waveform inversion: possibilities and challenges“. In: *Mitteilungen/Sonderband DGG-Kolloquium Endlagergeophysik* (2020).
- [3] Thomas Bohlen u. a. „SOFI2D, seismic modeling with finite differences 2D-elastic and viscoelastic version, User's Guide“. In: *Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe* (2016).
- [4] Tong Bai und Ilya Tsvankin. „Time-domain finite-difference modeling for attenuative anisotropic media“. In: *Geophysics* 81.2 (2016), S. C69–C77. doi: 10.1190/GEO2015-0424.1.
- [5] Ju-Won Oh u. a. „Multistage elastic full-waveform inversion for tilted transverse isotropic media“. In: *Geophysical Journal International* 223.1 (2020), S. 57–76.
- [6] Ilya Tsvankin. *Seismic signatures and analysis of reflection data in anisotropic media*. Society of Exploration Geophysicists, 2012.
- [7] Woldemar Voigt. *Lehrbuch der Kristallphysik (mit Ausschluss der Kristalloptik)*. Bd. 34. BG Teubner, 1910.
- [8] Leon Thomsen. „Weak elastic anisotropy“. In: *Geophysics* 51.10 (1986), S. 1954–1966.
- [9] Walter L. Bond. „The mathematics of the physical properties of crystals“. In: *The Bell System Technical Journal* 22.1 (1943), S. 1–72.
- [10] José M. Carcione. *Wave Fields in Real Media: Wave propagation in anisotropic, anelastic, porous and Electromagnetic Media*. 3. Aufl. Elsevier, 2014.
- [11] Joakim O. Blanch, Johan O.A. Robertsson und William W. Symes. „Modeling of a constant Q: Methodology and algorithm for an efficient and optimally inexpensive viscoelastic technique“. In: *Geophysics* 60.1 (1995), S. 176–184. doi: 10.1190/1.1443744.
- [12] Jean Virieux. „P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method“. In: *Geophysics* 51.4 (1986), S. 889–901.
- [13] Alan R Levander. „Fourth-order finite-difference P-SV seismograms“. In: *Geophysics* 53.11 (1988), S. 1425–1436.
- [14] Bengt Fornberg. „The pseudospectral method: Accurate representation of interfaces in elastic wave calculations“. In: *Geophysics* 53.5 (1988), S. 625–637.
- [15] Helga Emmerich und Michael Korn. „Incorporation of attenuation into time-domain computations of seismic wave fields“. In: *Geophysics* 52.9 (1987), S. 1252–1264.
- [16] Johan OA Robertsson, Joakim O Blanch und William W Symes. „Viscoelastic finite-difference modeling“. In: *Geophysics* 59.9 (1994), S. 1444–1456.
- [17] Richard Courant, Kurt Friedrichs und Hans Lewy. „Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik“. In: *Mathematische annalen* 100.1 (1928), S. 32–74.
- [18] Simone Butzer. „3D elastic time-frequency full-waveform inversion“. Dissertation. Karlsruhe, Germany: Karlsruhe Institute of Technology, 2015.
- [19] Stefan Buske, Stine Gutjahr und Christof Sick. „Fresnel volume migration of single-component seismic data“. In: *Geophysics* 74 (2009), WCA47–WCA55. doi: 10.1190/1.3223187.
- [20] Felix Hlousek, Olaf Hellwig und Stefan Buske. „Improved structural characterization of the Earth's Crust at the German Continental Deep Drilling Site (KTB) using advanced seismic imaging techniques“. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (2015). doi: 10.1002/2015JB012330.

Forschungs- und Entwicklungsauftrag DOSIS - Abschlussbericht



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	64213000				HF	PH	0002	00

Blatt: 115

- [21] Felix Hlousek, Olaf Hellwig und Stefan Buske. „Three-dimensional focused seismic imaging for geothermal exploration in crystalline rock (Schneeberg, Germany)“. In: *Geophysical Prospecting* (2015). DOI: 10.1111/1365-2478.12239.
- [22] Pascal Podvin und Isabelle Lecomte. „Finite difference computation of traveltimes in very contrasted velocity models: a massively parallel approach and its associated tools“. In: *Geophysical Journal International* 105 (1991), S. 271–284.
- [23] Marko Riedel. „Efficient computation of seismic traveltimes in anisotropic media and the application in pre-stack depth migration“. Dissertation. Freiberg, Germany: TU Bergakademie Freiberg, 2016.
- [24] Peter Traynin, Jonathan Liu und J.M. Reilly. „Amplitude and bandwidth recovery beneath gas zones using Kirchhoff prestack depth Q-migration“. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts* 27.1 (2008), S. 3713. DOI: 10.1190/1.3059363.
- [25] Yi Xie u. a. „3D prestack depth migration with compensation for frequency dependent absorption and dispersion“. In: *ASEG Extended Abstracts*. 2010, S. 1–4. DOI: 10.1081/22020586.2010.12041885.
- [26] Keiiti Aki und Paul G. Richards. *Quantitative Seismology*. 2. Aufl. Mill Valley, California: New York University Science Books, 2009.
- [27] Cinna Lomnitz. „Creep Measurements in Igneous Rocks“. In: *The Journal of Geology* 64.5 (1956), S. 473–479.
- [28] Ari Ben-Menahem und Sarva Jit Singh. *Seismic Waves and Sources*. Springer-Verlag New York, Inc., 1981, S. 875.
- [29] Henk Keers, Don W. Vasco und Lane R. Johnson. „Viscoacoustic crosswell imaging using asymptotic waveforms“. In: *Geophysics* 66 (2001), S. 861–870. DOI: 10.1190/1.1444975.
- [30] William A. Schneider. „Integral Formulation for Migration in Two and Three Dimensions“. In: *Geophysics* 43.1 (1978), S. 49–76. DOI: 10.1190/1.1440828.
- [31] Weiyi Zhang u. a. „The Study and Application of the Kirchhoff Q PSDM Technology“. In: *International Petroleum Technology Conference (IPTC)*. 2019.
- [32] Olaf Hellwig. „Seismic exploration ahead of boreholes using borehole-guided waves: a feasibility study“. Diss. Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2017.
- [33] Thomas Bohlen. „Parallel 3-D viscoelastic finite difference seismic modelling“. In: *Computers & Geosciences* 28.8 (2002), S. 887–899. ISSN: 0098-3004. DOI: 10.1016/S0098-3004(02)00006-7.
- [34] J. Zhang und M.N. Toksöz. „Nonlinear refraction traveltime tomography“. In: *Geophysics* 63 (1998), S. 1726–1737.
- [35] X. Zhu, D.P. Sixta und B.G. Angstman. „Tomostatics: turning-ray tomography + static corrections“. In: *The Leading Edge* 11 (1992), S. 15–23.
- [36] Abdullatif Al-Shuhail, Wail A. Mousa und Tariq Alkhalifah. „KFUPM-KAUST Red Sea model: Digital viscoelastic depth model and synthetic seismic data set“. In: *The Leading Edge* 36.6 (2017), S. 507–511.