Entwicklung, Harmonisierung und Validierung geologischer 3D-Modelle im Grenzbereich Brandenburg/Mecklenburg-Vorpommern und Polen im Rahmen des europäischen Forschungsnetzwerkes GeoERA

Development, harmonizing and validation of geological 3D models in the border region of Brandenburg/Mecklenburg-Western Pomerania and Poland in the European Research Framework of GeoERA

Christoph Jahnke, Karsten Obst, Thomas Höding, Ewa Szynkaruk, Zbigniew Małolepszy, Tomasz Żuk, Emilio L. Pueyo, Conxi Ayala

1 Der GeoERA-Projektverbund, eine Forschungsinitiative der Geologischen Dienste Europas

Das Forschungsnetzwerk der Geologischen Dienste Europas "GeoERA – Establishing the European Geological Surveys Research Area to deliver a Geological Service for Europe" wurde von der Europäischen Kommission im Rahmen des Förderprogrammes Horizont 2020 von 2018 bis 2021 gefördert. 48 nationale und regionale Geologische Dienste aus 32 europäischen Ländern arbeiteten zusammen mit dem übergeordneten Ziel der Initiierung geologischer Servicestrukturen in Europa für eine leistungsfähige, nachhaltige Nutzung und für die Entwicklung eines integrierten Managements des geologischen Untergrundes. Themenbereiche waren insbesondere:

- die Harmonisierung und Standardisierung geologischer Daten, Informationen und Methoden in Europa und Entwicklung von entsprechenden Workflows,
- die Förderung des Daten- und Methodenaustausches und die Entwicklung von gesamteuropäischen Dateninfrastrukturen/Informationssystemen.

Die Arbeiten erfolgten in 15 internationalen Forschungsund Kooperationsprojekten zu den Themenfeldern Geo-Energie, Grundwasser, Rohstoffe und Informationssysteme.

Ein in mehreren Projekten relevantes Thema waren dabei 3D-Informationen und geologische 3D-Modelle, die z. Z. in verschiedenen Regionen Europas mit unterschiedlichen Zielstellungen bereits vorliegen oder entwickelt werden (z. B. zur Bewirtschaftung von Grundwasserressourcen und geothermischen Ressourcen, für Untergrundspeicherung oder zur Analyse und Beurteilung konventioneller und unkonventioneller Kohlenwasserstoffsysteme). 3D-Modelle sind eine Möglichkeit, in Erweiterung zu den klassischen geologischen 2D-Darstellungen (Karten, Profilschnitte, 2D-GIS-Systeme) eine Vielzahl geologischer Informationen (von geologischen/ geophysikalischen Primärdaten bis zu komplexen Strukturinterpretationen) in 3D (oder 4D in dynamischen Modellen mit zusätzlich zeitlicher Dimension) zu visualisieren, zu analysieren und zu interpretieren. Neben den Zielstellungen der Modelle sind auch die Modellierungskonzepte in den europäischen Ländern dabei sehr unterschiedlich, was auf andere Datengrundlagen und Interpretationsansätze sowie verschiedene Softwarelösungen zurückzuführen ist. An internationalen Grenzen traten und treten aus diesen Gründen häufig Diskrepanzen und Unstetigkeiten zwischen den vorhandenen Modellen bzw. modellierten Strukturen auf.

Im Projekt 3DGEO-EU "3D Geomodeling for Europe" innerhalb des GeoERA-Verbundes erfolgte beispielhaft eine Erarbeitung, Harmonisierung und Dokumentation von grenzüberschreitenden 3D-Untergrundmodellen in vier Modellregionen:

- 1. onshore Grenzregion Niederlande Deutschland (Niedersachsen),
- 2. onshore Grenzregion Polen Deutschland (Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern),
- 3. offshore Grenzregion Niederlande Deutschland Dänemark in der Nordsee (Bereich "Entenschnabel"),
- 4. Grenzregion Spanien Frankreich in den westlichen Pyrenäen.

Die ersten drei Regionen befinden sich im Mitteleuropäischen Beckensystem und weisen spezifische geologische Situationen und unterschiedliche Erkundungsgrade auf. Stratigraphisch reichen die Modelle vom Perm bis ins Mesozoikum. Die vierte Modellregion befindet sich im alpidischen Faltengebirgsgürtel in einem anderen geologischen Umfeld.

In weiteren, methodisch ausgerichteten Arbeitspaketen des Projektes wurden spezielle Aspekte der geologischen 3D-Modellierung bearbeitet und dokumentiert:

- Unsicherheiten in geologischen Modellen, deren Ursachen, Charakterisierung und Visualisierung,
- Modellierung und Charakterisierung von Störungen,
- Methoden einer optimierten geophysikalischen Untergrundrekonstruktion durch Anwendung verschiedener geophysikalischer Verfahren.

Kooperationspartner waren die Geologischen Dienste und geowissenschaftliche Institutionen der beteiligten Länder bzw. Bundesländer sowie eine Reihe von assoziierten Organisationen.

Die Arbeiten in der deutsch-polnischen Grenzregion erfolgten in Kooperation der folgenden Partner: Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR), Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG), Polish Geological Institute – National Research Institute (PGI-NRI) sowie Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

Die Ergebnisse des Projektes 3DGEO-EU sind auf den GeoERA-Webseiten abrufbar (https://geoera.eu/ projects/3dgeo-eu, Rubrik "Deliverables"). Auch die Ergebnisse der anderen GeoERA-Projekte und die Projektdokumente des Verbundes können unter https://geoera.eu eingesehen und abgerufen werden.

2 Deutsch-polnische Kooperationen auf geologischem und geophysikalischem Gebiet

2.1 Kooperation bis 1990

Kooperationen zur Erkundung des tieferen geologischen Untergrundes zwischen Polen und Deutschland bzw. Kooperationen zur Interpretation der gewonnenen Daten erfolgten ab den 1970er Jahren vor allem in Zusammenhang mit der Rohstoffexploration beider Länder im grenznahen Gebiet. Insbesondere in der geophysikalischen Erkundung wurde bis 1990 z. T. sehr intensiv kooperiert:

Seismik

Basierend auf den Arbeiten der staatlichen Institutionen VEB Geophysik Leipzig in der DDR und dem Biuro Geologiczne Geonafta Warszawa auf polnischer Seite wurden harmonisierte grenzüberschreitende Karten der Tiefenlage ausgewählter seismischer Reflektoren (Zechstein und Untere Trias, Maßstab 1:100.000) in einem etwa 70 km breiten Grenzkorridor von Usedom im Norden bis ins südliche Brandenburg (Region Forst) erarbeitet (Geophysik Leipzig & Biuro Geologiczne Geonafta Warszawa 1978, 1980). Auf ostdeutscher Seite schlossen sich die Arbeiten eng an das Regionale Kartenwerk Reflexionsseismik (VEB Geophysik, Gruppe Regionales Kartenwerk Reflexionsseismik 1965–1991; Überblick in REINHARDT 1993 und RAPPSILBER et al. 2019) an. Grenzüberschreitende seismische Messungen wurden nicht durchgeführt; seismische Profile endeten grundsätzlich einige 100 m bis wenige Kilometer vor der Grenze. Die umfangreiche seismische Erkundung nach 1980 (Explorationsziele waren vor allem Rotliegendes und Basaler Zechstein), die zu einem deutlichen Erkenntniszuwachs auch im Mesozoikum führten, wurden im Festlandsbereich nicht mehr gemeinsam abgestimmt bzw. wenn doch, ist das nicht mehr dokumentiert. Dagegen wurden 1976 bis 1988 offshore im Rahmen der Kooperation "Petrobaltic"

zwischen der ehemaligen DDR, UdSSR und Polen umfangreiche gemeinsame seismische und gravimetrische Untersuchungen im Ostseegebiet durchgeführt, die jedoch nicht Gegenstand der Arbeiten im 3DGEO-EU-Projekt waren. Eine letzte Zusammenfassung von Tiefen- und Mächtigkeitsinformationen im onshore Grenzgebiet erfolgte (ohne nähere Quellenangaben) in CONRAD et al. (1991) (Tiefenlinien Basis Oberkreide und Top Zechstein, diverse Mächtigkeitskarten, Maßstab 1:200.000), die sich auf ostdeutscher Seite wiederum an das Geophysikalische Kartenwerk Reflexionsseismik anschlossen, auf polnischer Seite jedoch z. T. sehr unvollständig waren. Nach 1991 wurde auf deutscher Seite die Explorationstätigkeit stark reduziert, auf polnischer Seite wurden die Erkundungen jedoch weitergeführt und regional noch intensiviert (z. B. Raum Gorzów, Myślibórz mit einer Reihe von 3D-Surveys, s. Abschnitt 4.1, Abb. 2).

Gravimetrie und Magnetik

Die Zusammenarbeit im Bereich der gravimetrischen und magnetischen Vermessung begann ebenfalls in den 1970er Jahren durch die Institutionen VEB Geophysik Leipzig und Biuro Geologiczne Geonafta Warszawa. Hier erfolgten auch gemeinsame Messkampagnen zur Untersuchung der Felddifferenzen und die Einrichtung von Messpunkten an Grenzübergängen. Auch wurden die Arbeiten in den 1980er Jahren fortgesetzt und aktualisierte Daten beider Seiten kontinuierlich eingearbeitet. Ergebnisse waren harmonisierte grenzüberschreitende Karten der Bouguer-Anomalie in einem etwa 70 km breiten Grenzkorridor analog zur Seismik in den Maßstäben 1:100.000 und 1:200.000 (JAMROZIK et al. 1978, 1984, 1987, CONRAD et al. 1991). Die geomagnetischen Aufnahmen im Grenzgebiet waren bis 1991 noch unvollständig. Beide Seiten nutzten unterschiedliche geomagnetische Bezugssysteme, Normalfelder und Epochen, was einen erhöhten Abstimmungsaufwand erforderte. Die 1991 abgeschlossene Ergebniskarte der Magnetfeldanomalien im Grenzkorridor reichten deshalb nur von Usedom im Norden bis etwa Frankfurt/Oder im Süden (CONRAD et al. 1991, Maßstab 1:200.000). Die systematischen gravimetrischen und geomagnetischen Erkundungsarbeiten wurden in Ostdeutschland nach 1990/91 nicht fortgesetzt. Auf polnischer Seite wurden die Arbeiten analog zur Seismik weitergeführt.

2.2 Kooperation nach 1990

Nach 1990 arbeiteten die geologischen Institutionen Polens und Deutschlands in einigen internationalen Projekten zusammen z. B. MELA ("Morphotectonic Map of the European Lowland Area" 2004-2008) und insbesondere SPBA "Southern Permian Basin Atlas" (Doornenbal & Stevenson 2010, https://www.nlog.nl/southern-permian-basin-atlas). Im SPBA-Projekt erfolgte für das Mitteleuropäische Permbecken eine paneuropäische Aggregierung und Korrelation der stratigraphischen Informationen und die Ableitung großskaliger harmonisierter Kartenwerke der Tiefenlage und Mächtigkeit der stratigraphischen Systeme und der regionalen Störungssysteme auf Beckenskala (Maßstab ≈1:3.000.000). Eine Vertiefung der Ergebnisse des SPBA erfolgte im deutsch-polnischen Projekt GeoPolD (Partner: BGR (Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe), LBGR (Landesamt für Bergbau Geologie und Rohstoffe Brandenburg), LUNG (Landesamt für Umwelt Natur und Geologie Mecklenburg-Vorpommern), PGI-NRI (Polish Geological Institute - National Research Institute), Universitäten und Industriepartner; 2010–2017). In Phase I erfolgte eine stratigraphische Korrelation wichtiger Speicher- und Barrierekomplexe vom Rotliegenden bis zur Oberkreide in der Grenzregion und die Erstellung von stratigraphischen Korrelationsprofilen anhand von ausgewählten Bohrungen (KUHLMANN et al. 2012, KUHLMANN 2014). In Phase II wurden für den Unteren Jura detaillierte Faziesanalysen und sequenzstratigraphische Gliederungen durchgeführt sowie grenzüberschreitende Fazieskarten für ausgewählte Regressionssequenzen erstellt (ZIMMERMANN 2016).

Verstärkte bilaterale Kooperationen zwischen dem LBGR und PGI-NRI erfolgten ab etwa 2002 und führten u. a. zur Veröffentlichung einer Reihe von gemeinsamen geologischen Karten im deutsch-polnischen Grenzbereich mit dem Schwerpunkt oberflächennahe Geologie, jedoch auch unter Einschluss umfangreicher Darstellungen der tiefengeologischen Verhältnisse beiderseits der Grenze (z. B. LBGR 2007, LBGR 2019).

3 Entwicklung geologischer 3D-Modelle in Deutschland und Polen

In den Geologischen Diensten Deutschlands und Polens begannen im letzten Jahrzehnt Arbeiten zum Aufbau von geologischen 3D-Modellen in unterschiedlichen Skalen (Abb. 1).

In Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern wurden bei den Geologischen Diensten landesweite Modelle entwickelt:

- "Brandenburg 3D" (LBGR 2013): Modell der wichtigsten mesozoischen und permischen seismischen Reflektoren und Störungssysteme auf der Landesfläche von Brandenburg vom Oberen Perm bis Basis Känozoikum (https://geo.brandenburg.de/Brandenburg_3D/client/ portal/index.html, s. Schilling et al. 2015).
- "TUNB Tiefer Untergrund des Norddeutschen Beckens" (2014–2020): Modell des Norddeutschen Beckens. Stratigraphische Grenzflächen im Ober-Perm, Mesozoikum und Känozoikum auf dem Gebiet der norddeutschen Bundesländer und der Nordsee. Kooperation der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe mit den Geologischen Diensten der Bundesländer Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt. Teilprojekt 3 Mecklenburg-Vorpommern: OBST et. al 2021, Teilprojekt 4 Brandenburg: JAHNKE et al. 2021, die Modelle sind einsehbar unter https://gst.bgr.de)

Alle Modelle wurden in der Software SKUA-GOCAD (ASPENtech) als Tiefenmodelle auf der Basis von Bohrungen und tiefenmigrierter Seismik entwickelt. In Ostdeutschland beruhen sie überwiegend auf dem Kenntnisstand bis etwa 1990. Neuinterpretationen von Seismik erfolgten i. d. R. nicht, nur vereinzelt konnten Aktualisierungen vorgenommen werden.

In Polen erfolgte die Modellierung auf der Basis geotektonischer Großstrukturen, die schrittweise in einem landesweiten Modell zusammengeführt wurden (JAROSIŃSKI et al. 2014). Im deutsch-polnischen Grenzgebiet betrifft dies:

• Modelle Gorzów Block und Szczecin Through: stratigraphische Grenzflächen und Störungssysteme im Perm, Mesozoikum und Känozoikum

Die Modelle wurden auf polnischer Seite in den Programmsystemen Petrel (Schlumberger) und SKUA-GOCAD (ASPENtech) entwickelt. Die Modellentwicklung erfolgte unter Berücksichtigung des aktuellen Explorationsstandes und schließt eine Harmonisierung und teilweise Neuinterpretation von Seismik ein.



- Abb. 1:Geologische 3D-Modelle im deutsch-polnischen
Grenzgebiet: Deutsche Landesmodelle
Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern.
Modelle der tektonischen Großstrukturen
Gorzów Block und Szczecin Trough in Polen.
Schraffierte Fläche: Modellgebiet 3DGEO-EU,
Workpackage 2
- Fig. 1: Geological 3D models in the Polish-German border area. German models of Brandenburg and Mecklenburg-Western Pomerania. Models of the tectonic structures Gorzów Block und Szczecin Trough in Poland. Model area of 3DGEO-EU Work Package 2

Das Ziel der Kooperation im GeoERA-Verbund bestand darin, diese Modelle, die zur Projektlaufzeit teilweise noch in der Entwicklung waren, in einem Gebiet von ca. 70 x 210 km zu harmonisieren und zusammenzuführen (Abb. 1).

4 Datengrundlagen und Datenharmonisierung

4.1 Stratigraphische und seismostratigraphische Korrelation

Datengrundlage geologischer 3D-Modelle sind i. d. R. primär Bohrungsbefunde und Seismik und daraus interpretierte und interpolierte Daten wie geologische Karten und Profilschnitte. Die Datenbasis im Grenzgebiet Brandenburg /Mecklenburg-Vorpommern und Polen ist in Abb. 2 zusammengefasst. Die Seismik ist nach den Messjahren differenziert:

- bis 1970 Analog-Seismik (heute nur noch eingeschränkt nutzbar, bei allen Institutionen bisher nicht vollständig erfasst und in Abb. 2 nur auszugsweise dargestellt)
- ab 1970/71 bis 1990 Digitalseismik
- nach 1990 moderne Digitalseismik und 3D-Seismik.

Ersichtlich ist eine deutliche Zunahme der Messdichte und ein entsprechender Informationsgewinn in der Grenzregion nach 1980. Die bis 1980 erarbeiteten Karten sind deshalb nicht mehr auf aktuellem Stand (vgl. Abschnitt 2.1). Sichtbar wird aber auch die nach wie vor sehr geringe Informationsdichte in einigen Regionen ohne Explorationsinteressen (Region Szczecin im Norden und Region Chojna in der Mitte des Modellgebietes).

Ein direkter Austausch von Primärdaten zwischen LBGR/ LUNG und PGI-NRI war im Rahmen des GeoERA-Forschungsverbundes aufgrund rechtlicher Einschränkungen leider nur in geringem Umfang möglich. Für die Datenharmonisierung mussten deshalb überwiegend anonymisierte Daten (Daten ohne Metadaten, ohne Lageangaben) und interpretierte Daten (Modelle, Kartenwerke usw.) verwendet werden.

Eine Zusammenstellung und Korrelation der lithostratigraphischen Gliederungen der Regionen auf Beckenskala erfolgte im Rahmen des Projektes SPBA "Southern Permian Basin Atlas" (DOORNENBAL & STEVENSON 2010) und vertieft für das deutsch-polnische Grenzgebiet im Geo-PolD-Projekt (KUHLMANN 2014, ZIMMERMANN 2016). Im Zechstein und in der Trias sind die lithostratigraphischen



Modellgebiet
Bohrungen Prätertiär
C
2D-Seismik
bis 1970
1970-1980
1980-1990
nach 1990
3D-Seismik

nach 1990

Abb. 2: Tiefbohrungen und Seismik im Grenzgebiet Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Polen

Fig. 2:

Deep boreholes and seismic investigations in the border region Brandenburg, Mecklenburg-Western Pomerania and Poland

Einheiten und entsprechenden Gliederungen im Norddeutschen Becken und im Polnischen Trog identisch mit lediglich einigen abweichenden regionalen Formationsbezeichnungen (siehe DOORNENBAL & STEVENSON 2010: Chapter 8 und 9; KUHLMANN 2014: Abb. 10, 11). Ab dem Oberen Keuper, im Differenzierungsstadium des Mitteleuropäischen Beckensystems, entstanden stärker lokal geprägte Ablagerungsräume, die durch unterschiedliche Senkungstendenzen, unterschiedliche Sedimentationsraten und fazielle Entwicklungen gekennzeichnet sind. Die lithostratigraphischen Einheiten sind deshalb räumlich und zeitlich kleinteiliger und differenzierter (s. DOORNENBAL & STEVENSON 2010, Chapter 10 und 11; KUHLMANN 2014: Abb. 12, 13), die stratigraphischen Horizontkorrelationen sind jedoch im deutsch-polnischen Grenzgebiet i. d. R. relativ problemlos korrelierbar.

Die bis 1980 erstellten harmonisierten Isolinienkarten des deutsch-polnischen Grenzgebietes basierten auf einer relativ geringen Messdichte (s. Abb. 2) und der Mess- und Prozessierungstechnik der 1960er und 1970er Jahre und umfassten nur wenige Reflektoren von der Basis des Werra-Anhydrits bis zum Oberen Buntsandstein (Reflektor Top Salinarröt). Insbesondere die Intra-Zechstein-Reflektoren waren mit der Seismik der 1960er und 1970er Jahre nur z. T. fassbar und in Tiefenlage und Struktur mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Die spätere Seismik wurde nicht mehr abgeglichen und eingearbeitet.

Es erfolgte deshalb im Rahmen des GeoERA-Projektes in einem ersten Schritt eine gemeinsame seismostratigraphische Korrelation von Profilen zur Prüfung der grundsätzlichen Interpretation auf beiden Seiten (Abb. 3 und Tab. 1).



- Abb. 3: Korrelation von seismischen Zeitschnitten (vertikale Zeitachse in Millisekunden) im deutsch-polnischen Grenzbereich mit der jeweiligen Reflektorinterpretation. Links: Prozessiertes Profil der DDR-Seismik aus den 1980er Jahren. Rechts: prozessiertes Profil auf polnischer Seite aus den 2000er Jahren
- Fig. 3: Correlation of seismic time sections (vertical axes in milliseconds) close to the German and Polish border with reflector picking. Left: Processed seismic line of Eastern Germany from the 1980s. Right: processed seismic line from the Polish side after 2000

Kurzbezeichnung der Reflektoren					
Östliches Brandenburg / Mecklenburg-Vorpommern	Westliches Polen (Gorzów Block)	Stratigraphische Position			
T1		Transgressionsfläche Känozoikum			
B1	base of Turonian	Grenzbereich Turon-Cenoman			
B2/T2		Basis Cenoman/Transgressionsfläche Mittelalb bis Cenoman			
Т3	base of K1	Transgressionsfläche Unterkreide (Hauterive bis Unteralb), Basis Kreide			
	base of J3	Basis Jura			
L4	base of J1	Basis Lias			
К1		Basis Rhätkeuper			
К2	Tk	Top Oberer Gispkeuper			
К3		Basis Schilfsandstein / Top Unterer Gipskeuper			
M1		Top Kalkstein Oberer Muschelkalk			
M2'	Tm	Top Mittlerer Muschelkalk (top high velocity layer)			
M3		Basis Muschelkalk			
S1	Tp2	Top Salinarröt			
S2		Basis Salinarröt			
X1	Zstr	Top Zechsteinsalinar			
X2	Z3	Top Hauptanhydrit (Leine-Formation)			
Z1	Z2	Top Basalanhydrit (Staßfurt-Formation)			
Z2	Na1	Top Werra-Steinsalz			
Z3'	Z1	Basis Werra-Steinsalz / Top Unterer Werra-Anhydrit			
Z3	Zsp	Basis Werra-Anhydrit			
R6 / R7	P1	Basis sedimentäres Rotliegend (Oberrotliegend I, Oberrotliegend II)			

 Tab. 1: Wichtige seismische Reflektoren in der deutsch-polnischen Grenzregion. Stratigraphsiche Zuordnung und Reflektorbezeichnung auf deutscher Seite folgt der Zusammenstellung von Göthel (2016).
 Tab. 1: Major seismic reflectors in the Polish-German border region, stratigraphic position based on Göthel (2016).

Es lagen zwar keine grenzüberschreitenden Messungen vor, aber es gibt z. T. Profile gleicher Ausrichtung, die sich in ihrem Verlauf über die Grenze hinweg fortsetzen lassen und Lücken von nur wenigen Kilometern aufweisen (im südlichen Bereich des Modellgebietes). Abb. 3 zeigt beispielhaft Zeitsektionen von zwei SSW-NNE streichenden Profilen im östlichen Brandenburg und im Gorzów Block auf polnischer Seite mit einer Lücke im Grenzbereich von etwa 2 km. Die Profile zeigen flachlagernde, ungestörte Strukturen von der Basis Zechstein bis zur Basis Oberkreide, die sich über die Grenze korrelieren lassen. Die Profile weisen einen unterschiedlichen Bearbeitungsstand (Brandenburg 1980er Jahre, Polen nach 2000) und eine unterschiedliche Auflösung auf, sind aber hinsichtlich der Interpretation der wesentlichen Reflektoren weitgehend identisch. Abweichungen ergeben sich z. T. in der konkreten Phasenzuordnung einzelner Reflektoren (z. B.

Reflektoren K2 – Tk oder X1 – Zstr, s. Tab. 1). Eine ähnliche grundsätzliche Übereinstimmung ließ sich in allen untersuchten grenznahen Profilen feststellen. Eine Zusammenstellung und Korrelation der wichtigsten, im östlichen Deutschland und westlichen Polen identifizierten seismischen Reflektoren gibt Tab. 1.

Auch eine Prüfung der seismischen Geschwindigkeiten aus Bohrlochmessungen und Geschwindigkeitsmodellen im Grenzgebiet erbrachte ebenfalls eine grundsätzliche Übereinstimmung.

Im Ergebnis lässt sich feststellen, dass die seismischen Daten zumindest ab Einführung der Digitalseismik trotz des unterschiedlichen Alters und der unterschiedlichen Prozessierungsqualität in ihren Ergebnissen vergleichbar sind und keine grenzüberschreitende Neuinterpretation und -prozessierung erforderlich ist. Die aus Bohrungsdaten und Seismik auf beiden Seiten der Grenze (bei hinreichender Messdichte) abgeleiteten Strukturen im Oberperm und Mesozoikum sind vergleichbar und lassen sich aneinander anschließen. Bereits in CONRAD et al. (1991, S. 21) wurde konstatiert: "Infolge der langjährigen Erdöl-Erdgas-Explorationstätigkeit im Zechstein und Rotliegenden, die in hinreichender Dichte im gesamten Untersuchungsgebiet erfolgte, ist ein relativ hoher und zumal gesicherter Kenntnisstand über das oberpermisch-mesozoische Deckgebirge vorhanden." Es ist jedoch einschränkend festzustellen, dass bis heute größere Datenlücken im Grenzgebiet existieren (s. Abb. 2), in denen kaum Tiefbohrungen und nur lückenhafte und wenig dokumentierte Altseismik vorliegen.

4.2 Gravimetrie

Für die weitere Modellentwicklung, insbesondere zum Schließen von Datenlücken in der Seismik und bei der Bohrungsverteilung aber auch für die Modellvalidierung wurden gravimetrische Daten herangezogen. Diese liegen in der gesamten Region in hoher Dichte vor und wurden bereits in den 1980er Jahren harmonisiert (JAMROZIK et al. 1978, 1984, 1987, CONRAD et al. 1991). Für den überwiegenden Teil des Untersuchungsgebietes sind Daten in einer mittleren Messdichte von 250–500 m Punktabstand verfügbar (Abb. 4 "semi-detailed surveys"). Auf deutscher Seite lagen diese Daten beim LBGR und LUNG nur analog in Form der originalen Messprotokolle vor und konnten im Rahmen des Projektes teilweise digitalisiert werden (ca. 25.000 Messpunkte). In den übrigen Bereichen wurden die bereits digital vorliegenden regionalen Daten verwendet (Messpunktabstand 1200–1500 m – Abb. 4: "regional surveys"). Auf polnischer Seite liegen alle Daten digital in einer zentralen Datenbank beim PGI-NRI vor. Offshore-Daten (Ostsee, Oderhaff) wurden nicht einbezogen.

Die gravimetrischen Daten wurden nach aktuellem Stand neu prozessiert. Einheitlich wurden Schweresystem ISGN71, Ellipsoid GRS80/WGS84, Höhenbezug NN (Amsterdam), Reduktionsniveau 0 mNN und eine Normalschwere nach MORITZ (2000) verwendet. Freiluftkorrektur, Bouguer-Reduktion und Terrain-Korrektur wurden aufgrund der Datenlage auf beiden Seiten methodisch unterschiedlich durchgeführt (siehe AYALA et al. 2021). Auf deutscher Seite erfolgte die Terrain-Korrektur unter Nutzung der regionalen Daten von SKIBA et al. 2010. Als Reduktionsdichte für die Bouguer-Reduktion und Terrain-Korrektur wurde einheitlich 2 g/cm³ verwendet. Eine Überprüfung der resultierenden Abweichungen der Bouguer-Anomalie an konkreten Messpunkten erbrachte





Abb. 4: Verteilung (links) und Dichte (rechts) der genutzten gravimetrischen Messpunkte

Fig. 4: Distribution (left) and density (right) of the used gravimetrical stations Werte von < 0,1 mGal, was in Anbetracht der beobachtbaren Wertebereiche vernachlässigbar ist. Die harmonisierte Karte der Bouguer-Anomalie (s. Abb. 5) wurde nach Ost und West über das Grenzgebiet und Modellgebiet ausgedehnt, um einen Anschluss an die großräumigen Strukturen zu gewährleisten.

In der Bouguer-Anomalie spiegeln sich eine Vielzahl von Strukturen wider, von oberflächennahen pleistozänen Rinnensystemen über mesozoische Beckenfüllungen, permische Salzstrukturen und deren Randsenken bis zu tiefen großräumigen Krustentrukturen. Eine nähere Charakterisierung der Bouguer-Anomalien in Relation zum geologischen Modell und dessen Strukturen erfolgte in der Modellvalidierung (s. Abschnitt 5.3).

5 Modellharmonisierung und -validierung

5.1 Geologisches Modell

Das geologische Modell auf Basis der Bohrungen und der interpretierten Seismik wurde in drei Einzelmodellen der Partner LBGR, LUNG und PGI entwickelt. Die Harmonisierung erfolgte über einen gegenseitigen Austausch der Teilmodelle. Dieses Verfahren war aufgrund der rechtlichen Einschränkungen beim Austausch der Primärdaten erforderlich, aber aufgrund der guten Korrelierbarkeit der Primärdaten (Bohrungen und Seismik) möglich. In Bereichen mit guter Datenbelegung schlossen sich die Einzelmodelle problemlos aneinander an. In den Bereichen mit geringer Datenbelegung (siehe Datenlücken in Abb. 2) ergaben sich bei den Einzelmodellen auf deutscher und polnischer Seite größere Abweichungen. Hier wurde ein pragmatischer Lösungsweg gewählt, bei dem die Modelle mit jeweils besserer Datenbelegung in den Modellierungsprozess der anderen Seite einbezogen und so in den Da-





Bouguer-Anomalie. Blauer Rahmen: Modell-Gebiet

Fig. 5:

Final harmonized cross-border map of Bouguer anomaly. Blue frame: area of the 3D-model tenlücken extrapoliert wurde (Abb. 6). Eine Verifizierung dieser Extrapolationen erfolgte in einem weiteren Schritt unter Einbeziehung gravimetrischer Daten.

Das harmonisierte geologische 3D-Modell umfasst die folgenden Horizonte:

- Basis Quartär
- Basis Tertiär
- Basis Oberkreide
- Basis Jura
- Basis Keuper
- Basis Muschelkalk
- Basis Buntsandstein
- Top Basaler Zechstein (Top Basalanhydrit der Staßfurtserie)
- Basis Zechstein

Die Einzelmodelle weisen auf deutscher und polnischer Seite weitere Differenzierungen auf (auf deutscher Seite ist das Mesozoikum stärker differenziert, auf polnischer Seite der Zechstein). Es wurden jedoch nur diese Horizonte harmonisiert.

Die Modellierung erfolgte beim LBGR und LUNG mit SKUA-GOCAD und beim PGI-NRI mit Petrel und SKUA-GOCAD. Das finale Modell wurde in SKUA-GOCAD erstellt. Die mittlere räumliche Auflösung beträgt etwa 500 m. Einen Eindruck von den Horizontflächen des harmonisierten Gesamtmodells geben Abb. 7 und Abb. 8. Die Darstellungen erfolgten in 10facher Überhöhung. Zur besseren Übersicht sind Störungen in Abb. 7 und Abb. 8 nicht dargestellt, sondern werden separat in Abb. 9 gezeigt.

Die Basis des Modells bildet die Basis des Zechsteins (Abb. 7, oben links). Die farbliche Codierung zeigt die Tiefenlage in einem Bereich von > 4.500 m unter NHN im Nordosten (dem Nordrand des Polnischen Troges) bis ca. 2.500 m unter NHN an den nördlichen und südlichen Beckenrändern. Die Begrenzung des Beckens im Modellgebiet ist am Nordrand sehr steil und im Süden deutlich flacher. Der Top des Basalen Zechstein (Abb. 7, oben rechts: Top Basalanhydrit der Staßfurt-Serie) folgt im Norden dem Beckenrand mit einem steilen Übergang vom Plattformhang zur Plattform. Im Süden zeigen sich die auffälligen Mächtigkeitsanomalien der anhydritisch-karbonatischen Off-Platform-Heigths im relativ flach ansteigenden unteren Plattformhang. Der obere Plattformhang und die eigentliche Plattform liegen bereits südlich des Modellgebietes.

Abb. 7 (unten links) zeigt die Oberfläche des Zechsteinsalzes bzw. die Basis des Buntsandsteins. Die farblich codierte Salzmächtigkeit von < 100 m bis > 2.000 m verdeutlicht die Salzdynamik. Prägnante Strukturen sind insbesondere der Goleniów-Diapir im Nordosten auf polnischer Seite und das im Südwesten auf Brandenburger Seite angeschnit-



Abb. 6: Zusammenführung der Modelle Brandenburgs und des Gorzów Blocks im Bereich von Datenlücken am Beispiel der Oberfläche Zechsteinsalz. Links: Einzelmodelle mit großen Abweichungen an der Grenze aufgrund geringer Datendichte auf polnischer Seite. Rechts: Zusammengeführte und harmonisierte Modelle nach Neuinterpretation auf polnischer Seite unter Verwendung des Brandenburger Modells

Fig. 6: Joining of the Brandenburg model and of the model Gorzów block in areas with low data density (by example top of Zechstein salt). Left: separate datasets with large deviations at the border because of reduced data on the Polish side. Right: joined and harmonized models with re-interpretation at the Polish side by using the dataset of Brandenburg

Basis Zechstein (mit Tiefenlage)



Oberfläche Zechsteinsalz (mit Mächtigkeit)





Basis Lias





Abb. 7: Horizontflächen Zechsteinbasis bis Basis Lias des geologischen 3D-Modells im deutschpolnischen Grenzgebiet. (Überhöhung 10fach)

Fig. 7:

Horizons base of Zechstein to base of Lias of the harmonized 3D-model of the Polish-German border region (vertical exaggeration 1:10)

tene Salzkissen Rüdersdorf. Im übrigen Modellgebiet sind eine Reihe weiterer Salzkissen und entsprechende Mulden mit Salzabwanderung ausgebildet. Auffällig ist die im Gegensatz dazu sehr ruhige Zechsteinoberfläche im Bereich des Gorzów Blockes im Südosten des Modells. Im Südwesten ist die Zechsteinoberfläche dagegen intensiv durch Störungssysteme beeinflusst (Buckower Störungszone, Guben-Fürstenwalder Störungszone, siehe Abb. 9). Die Morphologie der Zechsteinoberfläche und die Störungsaktivität prägen auch die hangenden Horizonte, sie klingt jedoch langsam ab (Abb. 7 unten: Basis Lias und Abb. 8: transgressive Horizonte: Basis Oberkreide und Basis Tertiär). Die hier nicht dargestellte Quartärbasis schließt das Modell ab. Im Norden, im Bereich der Inseln Usedom und Wolin, ist das Tertiär flächenhaft durch Quartär erodiert, in den übrigen Modellregionen durchschneiden zahlreiche pleistozäne Rinnen die Tertiärbasis bis hinein ins Mesozoikum.

Das Störungsinventar ist in Abb. 9 zum einen in perspektivischer 3D-Ansicht (zusammen mit der Basis Zechstein) und als 2D-Karte (mit zusätzlichen topographischen Elementen und der Datenbasis) dargestellt. Es umfasst Störungen, die nur an der Zechsteinbasis auftreten mit in der Re-

Basis Oberkreide



Basis Tertiär



Abb. 8: Horizontflächen Basis Oberkreide und Basis Tertiär des geologischen 3D-Modells im deutschpolnischen Grenzgebiet (Überhöhung 10fach)

Fig. 8: Horizons base of Upper Cretaceous and base of Tertiary of the harmonized 3D-model of the Polish-German border region (vertical exaggeration 1:10)

gel geringen vertikalen Versätzen von einigen 10er Metern, und Störungen/Störungszonen, die von der Zechsteinbasis bis ins Mesozoikum und z. T. bis in das Tertiär reichen. Diese können bei einer Kopplung mit Salztektonik im Mesozoikum z. T. Vertikalversätze von > 1.000 m aufweisen. Lokale Störungen im Top von einigen Salzstrukturen (Scheitelstörungen) sind in diesem regionalen Modell nur vereinzelt einbezogen.

Die Hauptstreichrichtungen der Störungen sind im Norden des Modells NNW/NW-SSE/SE, auf polnischer Seite z. T. auch N-S. Im Süden dominieren die Richtungen NW-SE (Guben-Fürstenwalder Störungszone) und NNE-SSW (Buckower Störungszone). Es wurden keine grenzüberschreitenden Störungen detektiert und modelliert, was folgende Gründe haben kann:

- Ein Problem ist die Orientierung der Störungen in Beziehung zur Ausdehnung der seismischen Exploration und Ausrichtung der Messprofile. Die Störungen/Störungssysteme verlaufen im Grenzgebiet z. T. parallel bis subparallel zur Grenze oder vermutlich auch direkt an der Grenze (s. Abb. 9, Buckower Störungszone; Region Oderhaff, Usedom/Wolin) und sind ohne grenzüberschreitende Seismik kaum detektierbar. Die deutschpolnische Grenze verläuft in der Mitte und im Süden des Modellgebietes entlang der Oder, die genau wie die Störungen abwechselnd den Streichrichtungen NW-SE, NE-SW folgt. Der Verlauf der Oder scheint hier zumindest teilweise tektonisch kontrolliert:
 - im mittleren Teil des Modells verläuft die Oder entlang der Verlängerung der Buckower Störungszone (Streichrichtung NE-SW, postulierte Buckow-Oderhaff-Störungszone z. B. STACKEBRANDT & BEER 2010),

- südlich davon verläuft die Oder NW-SE (parallel zur Guben-Fürstenwalder Störungszone) und weiter südlich wieder NE-SW (parallel Buckower Störungszone), um dann wiederum auf NW-SE umzuschwenken.
- 2. Limitierend ist zusätzlich die z. T. geringe Datendichte entlang der Grenze (s. Abb. 2 und Abb. 9):
 - in einigen Regionen erfolgte bisher keine Exploration bzw. es liegt nur Altseismik der 1960er Jahre vor,
 - grenzüberschreitende Seismik fehlt völlig. Grenznahe Profile enden einige 100 m bis mehrere km vor der Grenze und liefern zudem an den Rändern aufgrund verringerter Überdeckung nur noch eingeschränkte Information. Selbst in gut untersuchten Regionen beiderseits der Grenze gibt es deshalb einen grenzparallelen Korridor von einigen km Breite mit fehlender oder zumindest stark reduzierter seismischer Information. Die Horizonte können in wenig gestörten Gebieten über solche Entfernungen extrapoliert werden, aber für einen Störungsnachweis und eine Störungskartierung ist eine höhere Informationsdichte erforderlich.

5.2 Petrophysikalisches Modell – Gesteinsdichte

Zur Nutzung der gravimetrischen Daten (Abschnitt 4.2) in einer gravimetrischen Modellierung zur Prüfung und Spezifizierung des geologischen Modells sind zusätzlich Angaben zur Dichte der Horizonte erforderlich. Zur Gesteinsdichte liegen in beiden Ländern umfangreiche Daten vor, die jedoch nach unterschiedlichen Methoden ermittelt wurden.



Abb. 9: Harmonisiertes Störungsmodell mit Störungen an der Basis Zechstein und im Hangenden des Zechsteinsalzes in der polnisch-deutschen Grenzregion. Links: 3D-Ansicht mit den modellierten Störungsflächen und der Basis des Zechsteinsalzes. Die deutsch-polnische Grenze bzw. der Verlauf der Oder ist durch eine Linie und transparente rosa Fläche markiert. Rechts: 2D-Ansicht mit vertikalen Störungsspuren (braun), Datenbasis 2D-Seismik (hellgrau) und Tiefbohrungen (grau)

Fig. 9: Harmonized fault model showing sub-salt faults and supra-salt faults in the Polish-German border region. Left: 3D-view of the modelled fault planes and the base of Zechstein horizon. The German-Polish border and the river course of the Oder is marked as a transparent pink plane. Right: 2D-vertical view with fault traces (brown), 2D-seismic lines (light grey) and deep wells (gray dots)

Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern:

- Gesteinsdichte aus Kernmaterial von Bohrungen,
- daraus abgeleitet Mittelwerte und empirische Dichte-Teufen-Beziehungen für lithostratigraphische Einheiten (KOPF 1967, KÖHLER & EICHNER 1973).

Polen:

- Gesteinsdichte aus Kernmaterial von Bohrungen,
- Kontinuierliche RHOB-logs (γγ) aus Bohrungen.

Ein Vergleich der Dichten der lithostratigraphischen Einheiten bzw. Modellschichten ergab eine systematische Diskrepanz zwischen den Formationsmittelwerten aus Kerndaten und aus RHOB-logs ($\gamma\gamma$)-logs (insbesondere im Mesozoikum). Die anhand von Kernmaterial abgeschätzten mittleren Formationsdichten sind höher, als die auf der Basis kontinuierlicher RHOB-logs ermittelten Werte. Diese Diskrepanz nimmt aufgrund zunehmender Kompaktion des Gesteins mit zunehmender Dichte und Teufe tendenziell ab. Sie ist von Kreide bis Keuper in geringen Teufen (Dichten überwiegend < 2,4 g/cm³) besonders ausgeprägt

und verschwindet im Muschelkalk und Buntsandstein zunehmend (Dichten > 2,4 g/cm³). Im Zechstein tritt der Effekt kaum auf. Als Ursache wird vermutet, dass bei Kernbeprobungen eine Selektion der besonders stabilen, kompakten Bereiche der Formation (mit erhöhter Dichte) erfolgte und instabile, gering kompaktierte Bereiche mit geringer Dichte nur untergeordnet beprobt wurden (z. B. aufgrund von Kernverlust oder nachträglichem Kernzerfall) und damit unterrepräsentiert sind. Bei kontinuierlichen RHOB-logs wird dagegen die gesamte Abfolge, inklusive der geringer kompaktierten und ggf. instabileren Formationsbereiche erfasst. Es wurde im Projekt entschieden, die Werte der RHOB-logs als repräsentativ anzusehen und die aus Kerndaten ermittelten Werte in Ostdeutschland an diese über aktualisierte Dichte-Teufen-Beziehungen anzupassen. Die bisher ermittelten Dichte-Teufen-Beziehungen für den Ostteil des Norddeutschen Beckens von KOPF (1967) und KÖHLER & EICHNER (1973) sind deshalb überarbeitungsbedürftig.



Abb. 10: Dichtemodell der deutsch-polnischen Grenzregion: Dichte der Modellschichten Kreide bis Basaler Zechstein Fig. 10: Density model of the German-Polish border region: densities for the model layers Cretaceous to Basal Zechstein

Das Dichtemodell zeigen die Abb. 10, Abb. 11 sowie Tab. 2. Die Dichteverteilungen ließen sich überwiegend grenzübergreifend harmonisieren. In den mesozoischen Horizonten folgt die regionale Verteilung der Dichte in den lithostratigraphischen Einheiten im Allgemeinen der Teufe der Formationen, da mit größerer Tiefe eine zunehmende Kompaktion des Gesteins durch die zunehmende Auflast erfolgt. Im Zechstein ist die mittlere Dichte des Zechsteinsalzes oberhalb des Basalen Zechsteins vom Diapirismus abhängig. Im Bereich von Salzakkumulation verringert sich die Gesamtdichte durch die Anreicherung von leichtem NaCl (Dichte $\approx 2,2$ g/cm³) und die relative Abreicherung von schwerem Anhydrit (Dichte $\approx 2,9-3$ g/cm³) und Karbonat (Dichte Dolomit $\approx 2,8$ g/cm³, Dichte Calcit $\approx 2,7$ g/ cm³). In Salzabwanderungsgebieten ist die Tendenz entsprechend entgegengesetzt (s. Abb. 10, Zechsteinsalz). Im Basalen Zechstein ist die Gesamtdichte abhängig von den Anteilen an Anhydrit, Dolomit/Calcit, Halit und der Poro-



Abb. 11: Histogramme der Dichteverteilung in den Modellschichten Känozoikum bis Basaler Zechstein Fig. 11: Histograms of the density distribution for the model layers Cenozoic to Basal Zechstein

Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ) der Dichte in den Modellhorizonten									
Density [g/cm ³]	Känozoikum	Kreide	Jura	Keuper	Muscl kal	nel- k	Buntsand- stein	Zechstein Salz	Basaler Zechstein
μ	2.00	2.24	2.21	2.30	2.5	6	2.59	2.24	2.76
σ	0.050	0.060	0.055	0.076	0.05	9	0.029	0.086	0.088
Markante Dichteveränderungen an lithostratigraphischen Grenzen									
Stratigraphische Grenze		Dichte Differenz [g/cm ³]	Dichte Differenz [%]	Seismischer Reflektor (deutsche bzw. polnische Bezeichnung,			eichnung,	
					5.	au. 1)			
Känozoikum – Kreide		≈ + 0,24	+ 10%		T1 / -				
Keuper – Muschelkalk		≈ + 0,25	+11%		M2' / Tm				
Buntsandstein – Zechstein-Salz		≈ - 0,35	-13%		X1 / Zstr		X1 / Zstr		
Zechstein Salz – Basaler Zechstein		≈ + 0,5	+23%		Z1 / Z2				

Tab. 2:Oben: Statistische Kennwerte der Dichteverteilung in den Modellschichten. Unten: Markante
Dichteveränderungen im Modell mit damit verbundenen seismischen Reflektoren

Tab. 2: Top: statistical characteristics of the density in the model layers (mean μ and standard deviation σ). Bottom: prominent changes of the density in the stratigraphic succession an related seismic reflectors

sität und Porenraumfüllung. In der mittleren und südlichen Modellregion zeigten sich für den Basalen Zechstein einige Abweichungen auf deutscher und polnischer Seite im grenznahen Bereich, die durch die in Bohrergebnissen lokal sehr unterschiedlichen Anteile des Werra-Steinsalzes verursacht werden. Aufgrund der geringen Informationsdichte ließen sich diese nicht abschließend angleichen.

In der Abfolge treten lithologisch bedingt einige markante Dichtesprünge an stratigraphischen Grenzen auf (Abb. 11, Tab. 2, unten), die zusammen mit den sich hier ebenfalls stark ändernden Kompressionsmodulen ausgeprägte seismische Reflexionen bewirken (Tab. 2, unten).

Für das nicht im geologischen Modell enthaltene Prä-Zechstein wurden vereinfachte Annahmen nach lithologisch-petrologischen Kriterien und Modellvorstellungen (KATZUNG et. al. 2004, GRAD et al. 2009, FRANKE et al. 2015) getroffen:

Tiefe unterhalb der Basis Zechstein [km]	Lithologie	Mittlere Dichte [g/cm ³]
6	Paläozoische Sedimente und Vulkanite (sauer)	2.65
15	Proterozoische Kruste (überwiegend saure Vulkanite und Granite)	2.7
≈ 30	Proterozoische Kruste (Granite/Diorite)	2.85

Tab. 3:Modellstruktur der Prä-Zechstein-AbfolgeTab. 3:Model structure of the Pre-Zechstein succession

5.3 Modellvalidierung und Ansätze zur Optimierung

Das Horizontmodell (Abschnitt 5.1), das Dichtemodell (Abschnitt 5.2) und die Bouguer-Anomalie (Abschnitt 4.2) wurden beim Spanischen Kooperationspartner Instituto Geológico y Minero de España (IGME) in der Software Oasis Montaj (SEEQUENT) für gravimetrische Modellierungen zusammengeführt. In einem ersten Schritt erfolgten Spektralanalysen des gravimetrischen Signals der Bouguer-Karte zur Abschätzung der wirksamen Tiefen. Es zeigte sich, dass sich die wirksamen Strukturen im Wesentlichen in Tiefen bis etwa 20 km befinden.

Anschließend erfolgten Forward-Modellierungen, in denen das aus geologischem Modell und Dichte-Modell resultierende gravimetrische Signal berechnet und mit dem gemessenen Signal verglichen wurde. Das Ergebnis zeigt Abb. 12 (links). Es ergeben sich z. T. große Abweichungen von > 10 mGal und < 10 mGal, die auf verschiedene Ursachen zurückführbar sind:

- 1. mögliche Fehler im geologische Modell oder/und Dichtemodell,
- 2. wirksame Strukturen, die nicht im geologischen Modell und Dichtemodell enthalten sind – hier insbesondere Strukturen aus dem Präzechstein, das im Modell sehr vereinfacht und räumlich homogen angenommen wurde (vgl. Tab. 3).

In den positiven Anomalien ist das gemessene Bouguer-Signal größer als das Signal aus dem Modell, d. h. die Modellmasse ist in diesen Regionen zu gering, in den negativen Anomalien ist das gemessene Bouguer-Signal kleiner und die Modellmasse entsprechend zu hoch.

Ein Indiz für Modellfehler ist, wenn Anomalien der gravimetrischen Forward-Modellierung räumlich mit Strukturen des Modells zusammenfallen. Das trifft insbesondere auf die zwei markantesten, stark positiven Anomalien nahe der polnisch-vorpommerschen Grenze im nördlichen Modellgebiet zu (Abb. 12 links). Die Abweichungen zwischen Modell und Messwerten sind > 12 mGal, d. h. aufgrund der positiven Abweichung liegt hier eine zu geringe Modellmasse vor. Die Anomalien entsprechen Salzrandsenken im Grenzgebiet, die hinsichtlich Geometrie und/ oder Dichte bisher nicht adäquat modelliert sind (zum Vergleich Abb. 12 rechts, Tiefenlage der Zechsteinoberfläche und Datenbasis Seismik sowie Tiefbohrungen). Diese zwei auffälligen Anomalien fallen zudem in ein Gebiet sehr geringer Erkundungsdichte, in dem auf polnischer Seite nur wenige Profile mit Altseismik aus den 1960er Jahren und sehr wenige Alt-Bohrungen existieren. In der zweiten Region mit größeren Datenlücken auf polnischer Seite im mittleren Modellteil (Region s. Chojna, Abschnitt 4.1) wird das gravimetrische Signal besser wiedergegeben. Die Abweichungen in der Bouguer-Schwere sind im Allgemeinen < 8 mGal und sind vermutlich vor allem durch Strukturen im Präzechstein bedingt. Hier ist die Salzdynamik gering ausgeprägt und das Mesozoikum ist überwiegend flach horizontal lagernd. Die in dieser Region bei der Horizontmodellierung erfolgten Extrapolationen (s. Abschnitt 5.1, Abb. 6) geben die Verhältnisse offensichtlich relativ gut wieder.

Ein Indiz für zusätzliche wirksame Strukturen sind Anomalien in der Forward-Modellierung, die nicht mit Modellstrukturen zusammenfallen. Hier zeichnen sich insbesondere im Süden des Modells großräumige Strukturen ab, die in ihrem Streichen parallel zu den in Abschnitt 5.1 diskutierten Störungsrichtungen verlaufen und möglicherweise mit tiefen Krustenstrukturen zusammenhängen.

Ein weiterer Schritt gravimetrischer Modellierungen sind Inversionen, bei denen für einzelne Modelllayer die Tiefe, die Mächtigkeit und/oder die Dichte numerisch variiert werden, um eine verbesserte Anpassung des Modellsignals an die gemessenen Bouguer-Werte zu erreichen. Durch Inversionen der Dichteverteilungen der Präzechstein-Schichten (die mit homogener Dichte und Mächtigkeit angenommen wurden, s. Tab. 3) und der Dichte und Tiefenlage des Zechsteinsalzes wurde untersucht, inwiefern Präzechstein-Strukturen das gravimetrische Signal beeinflussen und wie Modifikationen insbesondere der Dichte des Zechsteinsalzes das Ergebnis verbessern können.

In Abb. 13 (links) ist als Ergebnis einer Inversion die modellierte Dichte im Paläozoikum dargestellt. Die Mächtigkeiten der Schichten sind konstant gehalten (s. Tab. 3). Die modellierte Dichteverteilung im Proterozoikum ist ähnlich bei etwas erhöhten Werten. Die ermittelten Dichten liegen in plausiblen Wertespannen, sind jedoch in diesem Stadium der Modellentwicklung nicht als mineralogisch/petrophysikalische Interpretation anzusehen, sondern als Ergebnis eines mathematischen Optimierungsprozesses, der durch schrittweise Variation einzelner Parameter erfolgt. Ähnliche bis identische Effekte auf die Bouguer-Anomalie können auch mit räumlich variierenden Mächtigkeiten der Modellschichten bei modifizierten Dichten bewirkt werden. Die markanten Abweichungen aus der Forward-Modellierung (Abb. 12, links), die vermutlich aus Modellungenauigkeiten im Mesozoikum stammen, pausen sich in der Inversion auf das Paläozoikum durch und führen zu zwei Dichteanomalien in dieser Region, die jedoch wenig realistisch für das Paläozoikum/Proterozoikum sind. Sie könnten ggf. durch Intrusionskörper bedingt sein, für die es jedoch z. B. in magnetischen Messungen keine Hinweise gibt. In gewissen Grenzen interpretierbar sind die großräumigen Dichtekontraste, die in ihren Ausrichtungen NW-SE und NNE-SSW den wesentlichen tektonischen Richtungen und im mittleren und südlichen Modellteil dem Verlauf der Oder folgen. Es ist zu vermuten, dass entlang dieser Dichtekontraste tiefere tektonische Strukturen verlaufen, so etwa Blöcke unterschiedlicher Dichte und Mächtigkeit in Teufen > 10 km.

Die Abweichung des modellierten Bouguer-Signals von der gemessenen Bouguer-Anomalie nach Inversion der Dichte im Paläozoikum/Proterozoikum zeigt Abb. 13 (rechts). Die Abweichungen im Vergleich zur Forward-Modellierung (Abb. 12, links) sind deutlich geringer (> -6 bis -6 mGal) und kleinräumiger aufgrund der durch die Modellschichten Paläozoikum/Proterozoikum hervorgerufenen großräumigen Signale. Die Abweichungen lassen



Abb. 12: Links: Abweichungen der Bouguer-Anomalie der Forward-Modellierung in mGal (Differenz zwischen beobachteter und berechneter Bouguer-Anomalie). Rechts: Tiefenlage der Zechsteinoberfläche und Datenbasis Seismik und Tiefbohrungen

Fig. 12: Left: Misfits of the Bouguer-Anomaly from the Forward Modelling in mGal (difference between observed and calculated anomaly). Right: depth of the Top of Zechstein salt and database seismics and deep boreholes

sich jetzt genauer auf Strukturen beziehen, deren Modellierung in Geometrie oder/und Dichte bisher Ungenauigkeiten aufweist.

Im Weiteren wurden Inversionen von Tiefenlage, Mächtigkeit und Dichte des Zechsteinsalzes durchgeführt, um die Auswirkungen der Variation dieser Parameter auf das gravimetrische Signal zu untersuchen. Aufgrund des großen Gesamtvolumens des Zechsteinsalzes im Modell und seiner großen Mächtigkeitsunterschiede (s. Abb. 12) haben relativ geringe Änderungen der Dichte (\pm 0,08 g/cm³) und der Mächtigkeit (\pm 200 m) bereits deutliche Auswirkungen auf das gravimetrische Signal (AYALA et al. 2021). Insbesondere die Unsicherheit der statistisch ermittelten Dichten der Modellschichten liegen lokal durchaus in dieser Spannweite (und darüber), sodass eine Präzisierung der Dichteverteilung im Zechsteinsalz zu einer deutlich verbesserten Modellanpassung führen kann.

Die Validierung des geologischen/petrophysikalischen Modells durch eine gravimetrische Modellierung gibt also konkrete Hinweise auf Ungenauigkeiten und erlaubt es, Fehlerbereiche räumlich einzugrenzen. Für eine weitere Optimierung ist eine Überarbeitung des geologischen 3D-Modells und des Dichtemodells erforderlich. Diese erfolgt derzeit bei PGI-NRI im nördlichen Modellteil Szczecin Trough, insbesondere durch Aufarbeitung und Neuinterpretation von analoger Altseismik. Auch liegen eine Reihe von Informationen zu Strukturen und zur Petrophysik im Rotliegenden vor, die zukünftig eine direkte Modellierung tieferer Modellschichten ermöglichen. Im Anschluss können optimierte gravimetrische Modellierungen eine bessere Anpassung des Modells und ein deutlicheres Bild der tiefen tektonischen Strukturen liefern.

6 Zusammenfassung/Summary

Im Rahmen des europäischen Forschungsnetzwerkes Geo-ERA "Establishing the European Geological Surveys Research Area to deliver a Geological Service for Europe" erfolgte die Entwicklung und Harmonisierung von geologischen 3D-Modellen des Zechsteins und des mesozoischkänozoischen Deckgebirges im deutsch-polnischen Grenz-



Abb. 13: Links: Modellierte Dichteverteilung [g/cm³] im Modelllayer Paläozoikum (bei konstant angenommener Mächtigkeit von 6 km) nach Inversion von Paläzoikum und Proterozoikum. Rechts: Abweichungen der Bouguer-Anomalie nach Inversion von Pläozoikum und Proterozoikum in mGal (Differenz zwischen beobachteter und berechneter Bouguer-Anomalie)

Fig. 13: Left: Modelled density distribution [g/cm³] in the Paleozoic layer (with a constant thickness of 6 km) after inversion of Paleozoic and Proterozoic. Right: Misfits (in mGal) from the inversion of Paleozoic and Proterozoic densities (difference between observed and calculated anomaly) gebiet und eine grenzüberschreitende Bestandsaufnahme der geologischen und geophysikalischen Datengrundlagen zur Tiefengeologie. Eine Korrelation und Harmonisierung der Basisdaten, die in einer Reihe von Kooperationen in der Vergangenheit ab den 1970er Jahren immer wieder erfolgte, war weitgehend problemlos möglich. Allerdings bestehen größere Datenlücken im deutsch-polnischen Grenzgebiet in Seismik und Bohrerkundung. Dagegen liegen gravimetrische Daten flächendeckend und in hoher Dichte vor. Die in einem ersten Schritt bei den Kooperationspartnern LBGR, LUNG und PGI-NRI einzeln entwickelten Modelle ließen sich abschließend weitgehend widerspruchsfrei in einem gemeinsamen grenzüberschreitenden Modell zusammenführen. In den bestehenden Datenlücken erfolgten Extrapolationen. Das harmonisierte Gesamtmodell gibt ein grenzüberschreitendes Bild der Tiefenlage und Mächtigkeit wichtiger lithostratigraphischer Horizonte, der Salzstrukturen und des regionalen Störungsinventars. Aus petrophysikalischen und bohrlochphysikalischen Daten erfolgte zudem die Erarbeitung eines Dichtemodells der Modellhorizonte. Eine Validierung des Modells über eine gravimetrische Modellierung und deren Vergleich zu gravimetrischen Messdaten erbrachte neben der Ausweisung von bisher unplausiblen Bereichen im geologischen Modell, die noch der Überarbeitung bedürfen, auch Anhaltspunkte für tiefe krustale Strukturen. Weiterführende Informationen zum Projekt, den Ergebnissen und Schlussfolgerungen finden sich in JAHNKE et al. (2021a, b, c) und AYALA et al. (2021).

In the framework of GeoERA "Establishing the European Geological Surveys Research Area to deliver a Geological Service for Europe" harmonized 3D models of Upper Permian, Meozoic and Cenozoic strata were developed in the German-Polish border region including a cross-border evaluation of existing geological and geophysical data. The harmonization of the primary geological/geophysical data was possible, even the available data at the partner institutions have very different age and processing state from analog vintage data from the 1960s to modern digital data. However larger data gaps exist in seismics and well exploration in regions of minor economic interest. These gaps could be closed with gravimetrical data, that exist in the whole area with high spatial density. In a first step the partner institutions LBGR, LUNG and PGI developed own models using additional data and information from the partners. Finally, all pre-adjusted models were joined in one joint modelling workflow to one harmonized and seamless model of the German-Polish border zone. This model gives an overview of depth and thicknesses of the major stratigraphic units, salt structures and fault network. In addition, a density model for the horizons was developed based on petrophysical and wireline data. A verification of the models using gravimetrical modelling in comparison to measured Bouguer data could identify some still implausible areas, where the model should be reworked, and in addition indications regarding deep structures in the Upper crust. Further information about the project, the workflows,

results and lessons learned can be found in JAHNKE et al. (2021a, b, c) and AYALA et al. (2021).

7 Danksagung/Acknowledgement

Das Projekt "3DGEO-EU 3D Geomodelling for Europe" als Teil des GeoERA-Netzwerkes wurde gefördert durch die Europäische Union im Horizont 2020 Forschungsund Innovationsprogramm unter der Fördervereinbarung Nr. 731166 (Grant Agreement Number 731166)

The project "3DGEO-EU 3D Geomodelling for Europe" as a part of the GeoERA-framework has received funding by the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement number 731166



Literatur

- AYALA, C., JAHNKE, C., OBST, K., MUSIATEWICZ, M., ROSOWIECKA. R. & E. PUEYO (2021): Deliverable 6.3 3DGEOEU, Harmonization procedure in the Polish-German border using gravimetric data. Report zum Arbeitspaket 6.3 des Projektes 3DGEO-EU (abrufbar unter: https://geoera.eu/projects/3dgeo-eu: deliverable D6.3, Harmonization procedure with GravMag in POL-GER border)
- CONRAD, W., GEILING, P., HÄNIG, D., TOMASCHEWSKI, S., JAMROZIK, J., NOWICKA, A. & I. ZAMEJSKI (1991): Komplexbericht Ahlbeck - Zary. Gemeinsame Interpretation der gravimetrischen und magnetischen Meßergebnisse im Grenzbereich Polen/Deutschland. Leipzig, Warszawa: Geophysik GmbH Leipzig & Biuro Geologiczne Geonafta Warszawa (unveröff.)
- DOORNENBAL, H. & A. STEVENSON (Eds.) (2010): Petroleum geological atlas of the southern Permian Basin area. – Houten: EAGE Publications (abrufbar unter https://www. nlog.nl/southern-permian-basin-atlas)
- FRANKE, D., HOFFMANN, N. & J. KOPP (2015): Strukturgeologische Entwicklung. Krustenbau und kristallines Fundament. – In: STACKEBRANDT, W. & D. FRANKE (Hrsg.): Geologie von Brandenburg. – S. 439–448, Schweizerbart, Stuttgart
- GÖTHEL, M. (2016): Lithologische Interpretation und stratigraphisches Niveau der reflexionsseismischen Horizonte im Untergrund Brandenburgs einschließlich Berlins. – Brandenburgische Geowiss. Beitr. 23 (2016), S. 85–90, Cottbus

GRAD, M., TIIRA, T. & ESC Working Group (2009): The Moho depth map of the European Plate. – Geophys. J. Int. 176:279–292. doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03919.x

- JAHNKE, C., SCHILLING, M., SIMON, A. & T. HÖDING (2021): Potenziale des unterirdischen Speicher- und Wirtschaftsraumes im Norddeutschen Becken (TUNB-Projekt). Teilprojekt 4 Brandenburg 2014–2020. – Abschlussbericht, Archiv des LBGR (unveröff.)
- JAHNKE, C., OBST, K., MAŁOLEPSZY, Z., MUSIATEWICZ, M., ROSOWIECKA, O., SZYNKARUK, E. & T. ŻUK (2021a): Deliverable 2.2, Documentation of harmonization methods, workflows and results. – 3DGEO-EU, GEOERA 3DGEO-EU, 3D Geomodelling for Europe, project number GeoE.171.005 (abrufbar unter: https://geoera.eu/ projects/3dgeo-eu: deliverable D2.2, Documentation of harmonization methods, workflows and results)
- JAHNKE, C., OBST, K., SZYNKARUK, E., MAŁOLEPSZY, Z. & T. ŻUK (2021b): Deliverable 2.3, Improved and harmonized geological 3D model at the Polish-German border region for the pilot areas. 3DGEO-EU, GEOE-RA 3DGEO-EU, 3D Geomodelling for Europe, project number GeoE.171.005 (abrufbar unter: https://geoera.eu/ projects/3dgeo-eu: deliverable D2.3, Final joint model with supporting documents)
- JAHNKE, C., OBST, K. & SZYNKARUK, E. & T. ŻUK (2021c): Deliverable 2.4, Final report including best practices/ lessons learned/recommendations. 3DGEO-EU, GEOE-RA 3DGEO-EU, 3D Geomodelling for Europe, project number GeoE.171.005 (abrufbar unter: https://geoera.eu/ projects/3dgeo-eu: deliverable D2.4, Final Report Including Lessons Learned)
- JAMROZIK, J., A. SIPINSKA, W. CONRAD & D. HÄNIG (1978): Gemeinsame Interpretation der gravimetrischen Meßergebnisse im Grenzbereich VR Polen/DDR Szczecin-Stargard-Sulecin-Frankfurt/O.-Königs Wusterhausen-Strasburg. – Warszawa, Leipzig: ZOG GN Geonafta Warszawa & VEB Geophysik Leipzig (unveröff.)
- JAMROZIK, J., A. SIPINSKA, I. ZAMEJSKI, W. CONRAD, D. HÄNIG, S. TOMASCHEWSKI, und W. SCHIMANSKI (1984): Gemeinsame Interpretation der gravimetrischen Meßergebnisse im Grenzbereich VR Polen/DDR Frankfurt/O-Zary. – Warszawa, Leipzig: Biuro Geologiczne Geonafta Warszawa & VEB Geophysik Leipzig (unveröff.)
- JAMROZIK, J., A. SIPINSKA, I. ZAMEJSKI, W. CONRAD, D. HÄ-NIG, S. TOMASCHEWSKI, und W. SCHIMANSKI (1987): Gemeinsame Interpretation der gravimetrischen Meßergebnisse im Grenzbereich VR Polen/DDR Usedom-Szczecin. – Warszawa, Leipzig: Biuro Geologiczne Geonafta Warszawa & VEB Geophysik Leipzig (unveröff.)

- JAROSIŃSKI, Z., PAPIERNIK, B. & E. SZYNKARUK (2014): Koncepcja rozwoju cyfrowego modelowania budowy geologicznej Polski. Przegląd Geologiczny [A strategy to advance 3D geological modelling of the territory of Poland]. – Przegląd Geologiczny 62 (12), S. 801–805
- KATZUNG, G., FELDRAPPE, H. & K. OBST (2004): Präquartärer Untergrund. Vorpaläozoikum. – In: KATZUNG, G. (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern, S. 40– 98, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- KOPF, M. (1967): Der Dichteansatz f
 ür das Norddeutsch-Polnische Becken unter besonderer Ber
 ücksichtigung des vertikalen Dichtegradienten. – Geologie 16 (2), S. 181–199
- Köhler, R. & M. EICHNER (1973): Regionaler Dichteansatz für den Nordteil der DDR. – Gutachten VEB Geophysik Leipzig (unveröff.)
- KUHLMANN, G., BECKER, A., FELDMANN-OLSZEWSKA, A., HÖDING, T., MÜLLER, C., OBST, K. & G. PIENKOWSKI (2012): Transnational transects between Germany and Poland – Characterization of Jurassic reservoir and seal formations from borehole correlation connecting the eastern North German Basin and western Polish Trough. – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft 80, S. 508
- KUHLMANN, G. (2014): Geopold Grenzüberschreitende Geologie zwischen Polen und Deutschland (Projektphase I) (Transborder Geology between Poland and Germany).
 – Abschlussbericht Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (unveröff.)
- LBGR (Hrsg.) (2007): Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:50.000, L Blatt 3752 Frankfurt (Oder)/ Slubice. – 139 S., 1 Anlage, Cottbus
- LBGR (Hrsg.) (2019): Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:50.000, Blätter L3350 Bad Freienwalde (Oder), L3352 Letschin/Mieszkowice. – 142 Seiten, 2 Anlagen, Cottbus
- MORITZ H. (2000): Geodetic Reference System 1980. Journal of Geodesy, 74, S. 128–133. https://doi.org/10.1007/ s001900050278
- OBST, K., BRANDES, J., MATTING, S., WOJATSCHKE, J. & A. DEUTSCHMANN (2021): Potenziale des unterirdischen Speicher- und Wirtschaftsraumes im Norddeutschen Bekken (TUNB-Projekt). Teilprojekt 3 Mecklenburg-Vorpommern 2014–2020. – Abschlussbericht LUNG Mecklenburg-Vorpommern (unveröff.)
- REINHARDT, H.G. (1993): Structure of Northeast Germany: regional depth and thickness maps of Permian to Tertiary intervals compiled from seismic reflection data. – In: Special Publication of the European Association of Petroleum Geoscientists. Generation, accumulation and production of Europe's hydrocarbons III. – S. 155–165, Springer, Berlin, Heidelberg

- RAPPSILBER, I., GÖTHEL, M., KÖHLER, E., KÜSTERMANN, W., LANGE, W.G., MALZ, A., OBST, K. & A. SIMON (2019): Dr. Hans-Günter Reinhardt (14.5.1929 – 28.5.2018) – Seine Arbeiten im VEB Geophysik Leipzig als Grundlage moderner Untergrundmodelle der nordostdeutschen Bundesländer. – Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 170 (1), S. 27–45
- SCHILLING, M., SIMON, A., JAHNKE, C. & T. HÖDING (2015): Brandenburg 3D – GIS goes underground, a geological 3D model for the public. – In: SCHAEBEN, H.; DELGADO, R.T.; VAN DEN BOOGAART, K.G.; VAN DEN BOOGAART, R. (Eds.) (2015): Proceedings of the 17 th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences (IAMG), p. 118–125, Freiberg
- SKIBA, P., GABRIEL, G., SCHEIBE, R. & O. SEIDEMANN (2010): "Schwerekarte der Bundesrepublik Deutschland 1: 1.000.000". – Hannover: Leibnitz-Institut für Angewandte Geophysik, 2010. https://www.leibniz-liag.de/en/ research/methods/gravimetry-magnetics/bouguer-anomalies.html
- STACKEBRANDT, W. & H. BEER (2010): Strukturgeologische Übersicht. In STACKEBRANDT, W. & V. MANHENKE (Hrsg.): Atlas zur Geologie von Brandenburg, 4. Aufl., 80–81. – Cottbus: LBGR Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg, 2010
- VEB Geophysik, Gruppe Regionales Kartenwerk Reflexionsseismik (1965–1991): Tiefenlinien Reflexionsseismischer Horizonte auf dem Gebiet der DDR. – Karten 1:100.000, 1:200.000, 1:500.000. – Leipzig (unveröff.)
- VEB Geophysik Leipzig, Abteilung Seismik (1978): Reflexionsseismik Anschluß VR Polen – Tiefenlinienkarten der Horizonte S1 (Anhydrite im Unteren Röt), X1/X2 (Oberfläche Zechstein bzw. Oberfläche Hauptanhydrit der Leineserie), Z1 (etwa Unterkante Staßfurtsteinsalz), Maßstab 1:100 000. – Leipzig (unveröff.)
- VEB Geophysik Leipzig, Abteilung Seismik (1980): Reflexionsseismik "Anschluß VR Polen" Tiefenlinienkarten der Horizonte S1 (Anhydrite im Unteren Röt), X1/X2 (Oberfläche Zechstein bzw. Oberfläche Hauptanhydrit der Leineserie), Z1 (Oberfläche Basalanhydrit der Staßfurtserie), Z3 (Zechsteinbasis), Maßstab 1:100.000. Leipzig. (unveröff.)
- ZIMMERMANN, J. (2016): GeoPolD II Transborder Geology between Poland and Germany (Grenzüberschreitende Geologie zwischen Polen Und Deutschland). – Final Report. Freiberg/Berlin: Technische Universität Bergakademie Freiberg/Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (unveröff.)

Anschriften der Autoren

Christoph Jahnke & Karsten Obst Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (LUNG) Goldberger Straße 12b 18273 Güstrow Email: Christoph.Jahnke@lung.mv-regierung.de

Thomas Höding Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR) Inselstraße 26 03046 Cottbus

Ewa Szynkaruk, Zbigniew Małolepszy & Tomasz Żuk Polish Geological Institute – National Research Institute (PGI-NRI) 4, Rakowiecka Street 00-975 Warsaw

Emilio L. Pueyo & Conxi Ayala CN Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC) C/ Manuel Lasala 44, 9°B 50006 Zaragoza