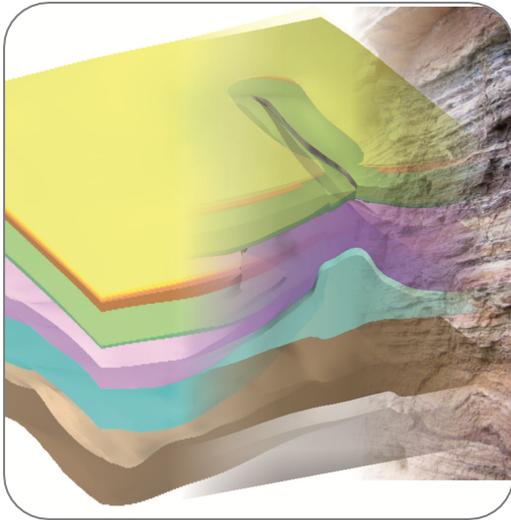


GSN – Generalisiertes, erweiteretes Strukturmodell des zentralen deutschen Nordsee-Sektors

Konzept zur Erstellung einer konsistenten Datengrundlage für weiterführende Modellierungen im Bereich des zentralen deutschen Nordsee-Sektors

2. überarbeitete Auflage



**Dirk Kaufmann, Sabine Heim,
Fabian Jähne, Stephan Steuer,
Anke Bebiolka, Marco Wolf
und Gesa Kuhlmann**

März 2014

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Dirk Kaufmann, Sabine Heim, Fabian Jähne, Stephan Steuer, Anke Bebiolka, Marco Wolf und Gesa Kuhlmann
Titel:	GSN – Generalisiertes, erweitertes Strukturmodell des deutschen Nordsee-Sektors
Stichwörter:	3D-Modell, Strukturmodell, deutscher Nordsee-Sektor, Nutzungspotenziale, GOCAD

Das vorliegende generalisierte, erweiterte Strukturmodell des deutschen Nordsee-Sektors (GSN) umfasst die wichtigsten Basishorizonte vom Namur (Karbon) bis zur Mittel-Miozän-Diskordanz. Es beinhaltet u. a. ein vereinfachtes Strukturmodell der zentralen deutschen Nordsee.

Das GSN-Modell bildet die Basis für weitergehende Modellierungen im Projekt „Geopotenzial Deutsche Nordsee“ (GPDN).

Basierend auf dem „Geotektonischen Atlas von Niedersachsen und dem deutschen Nordsee-Sektor als geologisches 3D-Modell“ (GTA 3D) (Bombien et al. 2012), dem „Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area“ (SPBA) (Doornenbal & Stevenson 2010) und unter Zuhilfenahme weiterer Literaturdaten (Röhling 1988, Brückner-Röhling 1999, Krull 2005) wurde eine Datengrundlage für weiterführende Modellierungen im Bereich der zentralen deutschen Nordsee erstellt. Die aus der verwendeten Literatur übernommenen Flächen wurden generalisiert und auftretende Inkonsistenzen (z.B. Horizontüberschneidungen) entfernt. Im Zuge der Generalisierung wurden beispielsweise die Flanken von Salzstöcken als vertikale Flächen modelliert und Störungen nach definierten Kriterien (Vertikalversatz > 100m; laterale Ausdehnung > 5 km) in das Modell aufgenommen.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Einbindung ins Gesamtprojekt GPDN	1
1.2 Zielsetzung des generalisierten Strukturmodells (GSN)	1
1.3 Lage des Arbeitsgebietes	2
2. Datengrundlage und Anforderungen	3
2.1 Datengrundlage für das Perm bzw. Prä-Perm.....	4
2.2 Datengrundlage für spätpaläozoische bis känozoische Horizonte.....	5
2.3 Notwendigkeit der Generalisierung	6
2.3.1 Generalisierung der Störungsinformationen.....	6
2.3.2 Generalisierung der Salzstrukturen.....	6
2.3.3. Bearbeitung von Überschneidungen der Horizontflächen	7
3. Methodik und Konzepte	8
3.1 Geologisches Grundkonzept.....	8
3.1.1 Das Liegend-Zechstein-Stockwerk	9
3.1.2 Das Zechstein.....	11
3.1.3 Das Hangend-Zechstein-Stockwerk.....	11
3.2 Modelltechnisches Konzept	13
3.2.1 Anpassung der Daten an die Modellgrenzen und Neutriangulierung der Horizonte	13
3.2.2 Modellierung und Generalisierung von Störungen	15
3.2.3 Einbau des Störungsmodells in die modellierten Horizontflächen	19
3.2.4 Vereinfachung der Geometrie der Salzstrukturen	19
3.2.5 Behebung von geometrischen und geologischen Inkonsistenzen	20
4. Ergebnisse und Diskussion	22
4.1 Modellierung der Horizontflächen	22
4.1.1 Modellierung der Karbon-Horizonte	23
4.1.2 Modellierung der Rotliegend-Horizonte.....	23
4.1.3 Modellierung der Horizonte des Buntsandstein und Muschelkalk	24
4.2 Modellierung von geotektonischen Strukturen	24
4.3 Mögliche Weiterverarbeitung der Daten aus GSN.....	25
5. Fazit	26
6. Literaturverzeichnis	27
7. Abkürzungsverzeichnis	28
8. Abbildungsverzeichnis	29
9. Tabellenverzeichnis	31

1. Einleitung

1.1 Einbindung ins Gesamtprojekt GPDN

Im Bereich des deutschen Nordsee-Sektors findet sich im Untergrund ein vielfältiges geologisches Potenzial. Von besonderem Interesse sind dabei vor allem Energierohstoffe (Öl, Gas), Speichermöglichkeiten (für z. B. erneuerbare Energien) sowie mineralische Rohstoffe (Sand, Kies) am Meeresboden. Der Nutzung dieser Ressourcen im Wirtschaftsraum Deutsche Nordsee stehen der Bedarf als Naherholungs- oder Naturschutzgebiet (Wattenmeer), als Schifffahrtsweg oder auch die Ausweisung von Baugrundflächen für Windkraftanlagen gegenüber.

Um die geologischen Aspekte dieser scheinbaren Nutzungskonkurrenz zu verdeutlichen und die Bewertung von Geopotenzialen in diesem vielfältig genutzten Wirtschafts- und Naturraum zu unterstützen, wurde die Geologie des gesamten deutschen Nordsee-Sektors vom Meeresgrund bis in mehrere Kilometer Tiefe erfasst (s. www.gpdn.de). Im Projekt GPDN (Geopotenzial Deutsche Nordsee) wurden dazu umfassende Informationen zu geowissenschaftlichen Fragestellungen in mehreren Teilprojekten erarbeitet. Diese Geo-Basisinformationen liefern eine Vorstellung über den geologischen Untergrund des gesamten deutschen Nordsee-Sektors. Die im Projekt gewonnenen Daten bilden so eine wichtige Grundlage für umwelttechnische und wirtschaftliche Entscheidungen.

GPDN ist ein Gemeinschaftsprojekt der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), des niedersächsischen Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) und des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH). Die Laufzeit des Projektes war vom 1. August 2008 bis zum 31. Dezember 2013 und wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, das niedersächsische Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr, sowie durch Industriemittel finanziert.

1.2 Zielsetzung des generalisierten Strukturmodells (GSN)

Im Rahmen verschiedener Teilprojekte von GPDN sollten unterschiedliche Modelle entwickelt werden. Die unerlässliche Grundlage dafür war die Erstellung eines räumlich harmonisierten und topologisch bereinigten, geologischen Modells für den zentralen deutschen Nordsee-Sektor (GSN, **Abbildung 1**).

So war z. B. für die Erstellung eines dreidimensionalen, dynamischen Kohlenwasserstoffmodells ein konsistentes, lückenloses Basismodell erforderlich, das umfassende Informationen zu geologischen bzw. tektonischen Strukturen, insbesondere der sedimentären Abfolge der paläozoischen bis quartären Horizonte, der Salzstrukturen, der Haupt-Störungssysteme, zu möglichen Speichergesteinen (Oberrotliegend, Mittlerer Buntsandstein und Dogger) und Erdöl/Erdgas-Muttergesteinshorizonten (Karbon und Unterjura) beinhaltet. Dieses Basismodell ist auch Grundlage für die Untersuchung der Speicherpotenziale für Fluide im tieferen Untergrund der Deutschen Nordsee – analog zu Reinhold & Müller (2011) (siehe GPDN Bericht: „Speicherpotenziale im zentralen deutschen Nordsee-Sektor“).

Einen wichtigen Abschnitt für Speichermöglichkeiten im deutschen Nordseeraum bilden die Speicher- und Barrierhorizonte des Buntsandstein. Daher wurde auf Basis des GSN ein dreidimensionales lithologisches und fazielles Modell der Verbreitung der Speicher- und Barrieregesteine erstellt (siehe GPDN Bericht „3D-Lithofaziesmodell des Buntsandstein in der zentralen deutschen Nordsee“).

1.3 Lage des Arbeitsgebietes

Das Arbeitsgebiet liegt in der deutschen Nordsee und umfasst eine Fläche von ca. 36.500 km² (**Abbildung 1**). Es wird geographisch durch die Grenze des deutschen Hoheitsgebietes mit Dänemark im Norden und den Niederlanden im Südwesten, im Osten durch den nordfriesischen, im Süden durch den ostfriesischen Küstenverlauf und tektonisch im Nordwesten durch die Hauptstörung des Zentral-Graben (Nordschillgrund-Störung) begrenzt (Kockel 1995). Da das nordwestlich davon liegende Gebiet des sogenannten „Entenschnabels“ in den vorangegangenen Tiefenkartenwerken der Region (Kockel 1995, Baldschuh et al. 2001) und darauf aufbauenden 3D-Umsetzungen (GTA 3D, Bombien et al. 2012), sowie im Kartenwerk von Röhling (1988) nicht berücksichtigt worden ist, fehlte für diesen Bereich die entsprechende Datengrundlage bei der Erstellung des GSN. Daher wurde der Entenschnabel in das hier beschriebene Modell nicht mit einbezogen. Weitere Kartenwerke, welche die Ablagerungen des Perm und des Karbon beschreiben (Brückner-Röhling et al. 1994, Krull 2005), decken diesen Bereich ebenfalls nicht ab.

Entsprechende Arbeiten im Gebiet des Entenschnabels wurden in einem weiteren Teilprojekt des GPDN-Projektes erarbeitet (Interpretation Entenschnabel, www.gpdn.de)

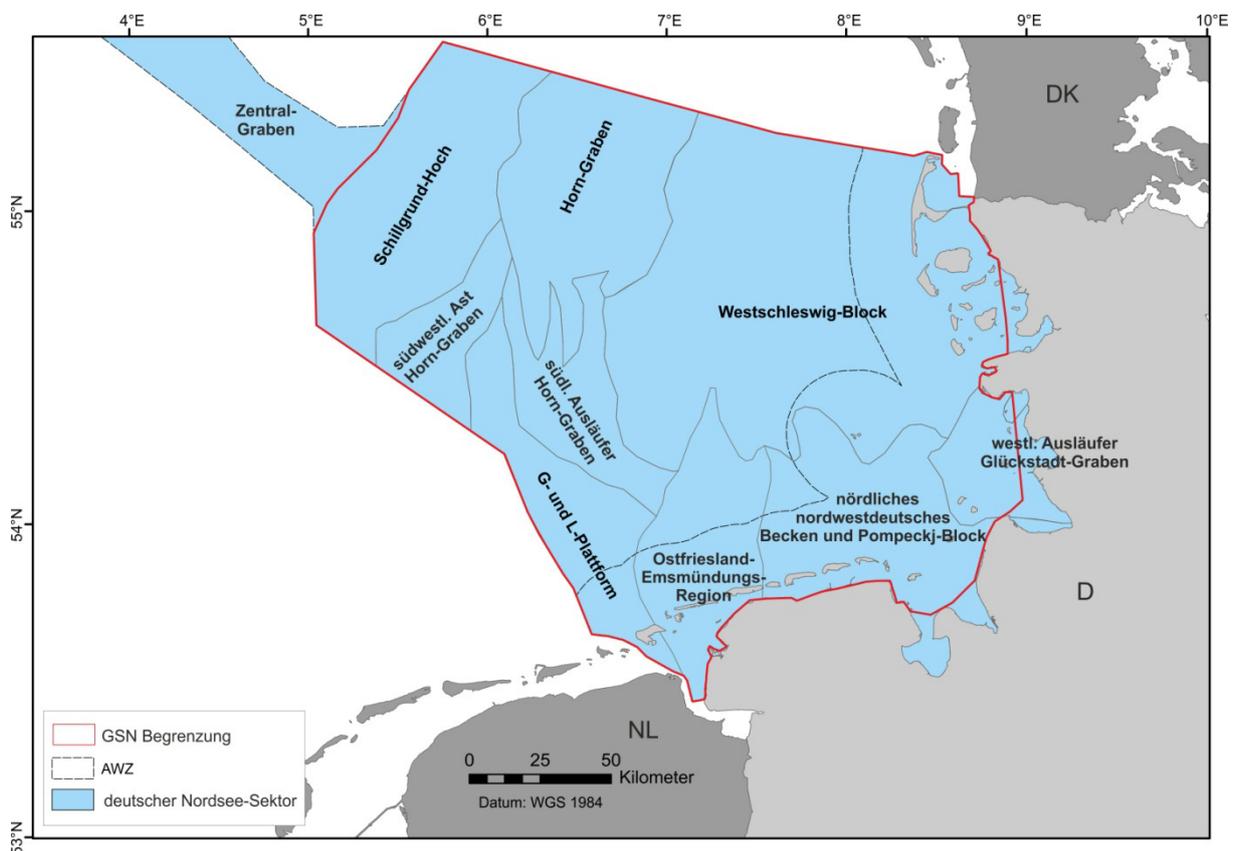


Abbildung 1: Übersicht über das Modellgebiet im deutschen Nordsee-Sektor (rot umrandet). Die Grenzen der strukturellen Einheiten im Arbeitsgebiet sind dargestellt.

2. Datengrundlage und Anforderungen

Als Grundlage für das Modell wurden Flächeninformationen vom Karbon bis zur Basis Neogen in Form von Karten (digital und analog), Bohrungsinformationen und geophysikalischen Daten (Seismik und Logdaten) zusammengestellt und ausgewertet. Für die Erstellung von Karten zur Tiefenlage und Mächtigkeit einzelner Horizonte und Formationen wurden Informationen aus der Literatur und bestehenden 3D-Modellen, insbesondere aus Bombien et al. (2012), Brückner-Röhling et al. (1994), Doornenbal & Stevenson (2010), Krull (2005) sowie Röhling (1988) berücksichtigt (**Tabelle 1**). Die Aufnahme und Bearbeitung der verwendeten Bohrungsdatensätze ist in Arfai et al. (2011) beschrieben.

Tabelle 1: Für das Modell verwendete Daten- und Literaturquellen

Epoche	Krull 2005	Brückner-Röhling et al. 1994	Doornenbal & Stevenson 2010	Bombien et al. 2012	Röhling 1988
Pliozän				Tiefenlage Basis Reinbeck (03 tmiR-q)	
Miozän				Tiefenlage Basis Unteres Miozän (04 tmiu)	
Oligozän				Tiefenlage Basis Oligozän (05 tolm+tolo)	
Eozän				Tiefenlage Basis Mittlere Eozän (06 teom+tolu)	
Paläozän				Tiefenlage Basis Oberpaläozän und Unteres Eozän (07 tpao+teou)	
Oberkreide				Tiefenlage Basis Oberkreide (08 kro)	
Unterkreide				Tiefenlage Basis Unterkreide (09 kru)	
Oberjura				Tiefenlage Basis Oberjura und Wealden (10 jo+wd)	
Mitteljura				Tiefenlage Basis Mitteljura (Aalenium bis Callovium, 11 jutco+jmcl)	
Unterjura				Tiefenlage Basis Unterjura (Hetangium bis Toarcium, 12 juhe+jutcu)	
Obertrias (Keuper)				Tiefenlage Basis Keuper (13 k)	
Mitteltrias (Muschelkalk)				Tiefenlage Basis Oberer Buntsandstein und Muschelkalk (14 so+m)	
Untertrias (Buntsandstein)					Mächtigkeitkarte Solling (Mittlerer Buntsandstein)
					Mächtigkeitkarte Mittlerer Buntsandstein (ohne Solling)
					Mächtigkeitkarte Unterer Buntsandstein
				Tiefenlage Basis Unterer und Mittlerer Buntsandstein (15 su+sm)	
Oberperm (Zechstein)				Tiefenlage Top Zechstein	
				Tiefenlage Basis Zechstein (16 z)	
Unterperm (Rotliegend)			Tiefenlage Basis sedimentäres Rotliegend		
		Mächtigkeitkarte vulkanisches Rotliegend (Auton)			
Oberkarbon		Tiefenlage Top Präperm			
		Mächtigkeitkarte Stefan			
		Mächtigkeitkarte Westfal C			
	Mächtigkeitkarte Namur				

Für die Validierung der Modelldaten konnten im Rahmen des GPDN-Projektes etwa 60 Tiefbohrungen aus dem Bereich der zentralen deutschen Nordsee für die Bearbeitung genutzt werden. Mit zunehmender Tiefenlage der zu modellierenden Horizonte stehen weniger Bohrdaten zur Verfügung. So erreichen oder durchteufen beispielsweise nur 18

Bohrungen das Karbon. Die vulkanoklastischen Ablagerungen des Unterrotliegend sind nur in zehn Bohrungen beschrieben. Dagegen ist sedimentäres Oberrotliegend in 30 Bohrungen vorhanden.

2.1 Datengrundlage für das Perm bzw. Prä-Perm

Für die Horizonte des Oberrotliegend und des Prä-Perm (Karbon) war es notwendig, zusätzlich zu den Daten aus Bohrberichten, Literaturdaten zu recherchieren und mit vorhandenen Informationen zu verknüpfen. So wurden für die Erstellung der Tiefenkarte des Oberkarbon (Stufen Stefan und Westfal) Verbreitungs- und (Rest)- Mächtigkeitskarten aus Brückner-Röhling et al. (1994) verwendet. Die Tiefenlage der Basis Namur wurde im GSN in Anlehnung an Mächtigkeitskarten aus Krull (2005) erstellt (**Abbildung 2**). Diese zeigen für den Bereich der südlichen Nordsee, im Abgleich mit Daten aus Bohrungen und den generellen Verteilungstrends, eine plausible Verteilung.

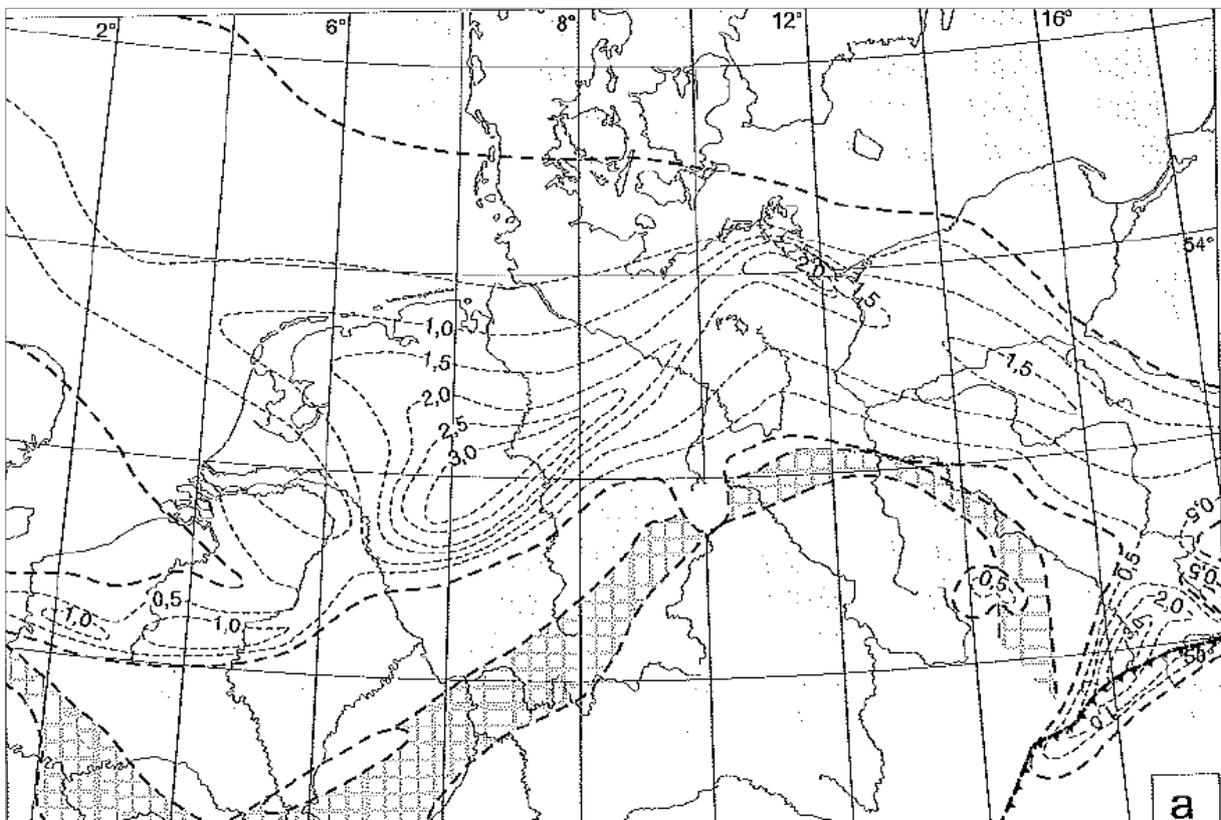


Abbildung 2: Mächtigkeitsverteilung des Namur nach Krull (2005).

Für die Abfolge des Oberkarbon im deutschen Nordseeraum beruhen die Flächendaten der Literatur fast ausschließlich auf kleinmaßstäblichen Korrelationen und Interpolationen zwischen spärlich verteilten Bohrungen und wenigen seismischen Linien. Elf Bohrungen im Arbeitsgebiet erreichen das Westfal C. Die Auflösung der reflexionsseismischen 2D-Daten lässt bei den meist hohen Versenkungstiefen und aufgrund komplexer Strukturen im Hangenden vermuten, dass von Brückner-Röhling et al. (1994) nur grobe seismische Interpretationen dieser Einheiten vorgenommen wurden. Brückner-Röhling et al. (1994) haben im Rahmen einer Kohlenwasserstoff-Potenzialanalyse im Prä-Westfal des nordwestdeutschen Beckens, Karten der Restmächtigkeiten des Westfal C, des Stefan, des vulkanischen Rotliegend und der Tiefenlage des Top Prä-Perm erarbeitet. Diese Karten im

Maßstab 1:500.000 sowie der dazugehörige Bericht wurden genutzt, um die Horizontflächen des Stefan und Westfal zu modellieren.

Für das sedimentäre Rotliegend sind dagegen die Horizonte aus dem Petroleum Atlas of the Southern Permian Basin Area (SPBA, Doornenbal & Stevenson 2010) für das Modell genutzt worden.

2.2 Datengrundlage für spätpaläozoische bis känozoische Horizonte

Für die weiteren Horizonte (Basis Oberperm bis Basis Pliozän) wurden die Horizonte des Geotektonischen Atlas verwendet (**Tabelle 1**). Der Geotektonische Atlas der zentralen deutschen Nordsee (GTA, Baldschuh et al. 2001) wurde durch das Niedersächsische Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie in ein räumliches Strukturmodell überführt. Dabei wurden die ursprünglichen Daten, die hauptsächlich aus geologischen Schnitten und Tiefenlinienkarten bestehen, möglichst detailgetreu abgebildet (GTA 3D, Bombien et al. 2012). Durch diesen Ansatz wurden geologische und geometrische Inkonsistenzen im GTA 3D sichtbar (**Abbildung 3**). Mögliche Unstimmigkeiten im GTA wurden durch die Umsetzung in ein räumliches Modell (GTA 3D) deutlich und erlauben es, Reinterpretationen zielgerichteter durchzuführen. Das GTA 3D-Modell umfasst Informationen vom Perm (Basis Zechstein) bis zur Mittel-Miozän-Diskordanz (Basis Neogen). Die Daten liegen als Basisflächen der entsprechenden Horizonte, jeweils pro TK 100 Kartenblatt, als GOCAD-ASCII-Dateien (.ts) vor. Störungsinformationen sind in den Flächen als Flächenbegrenzung mit einem vertikalen Versatz umgesetzt worden (s. **Abbildung 3**).

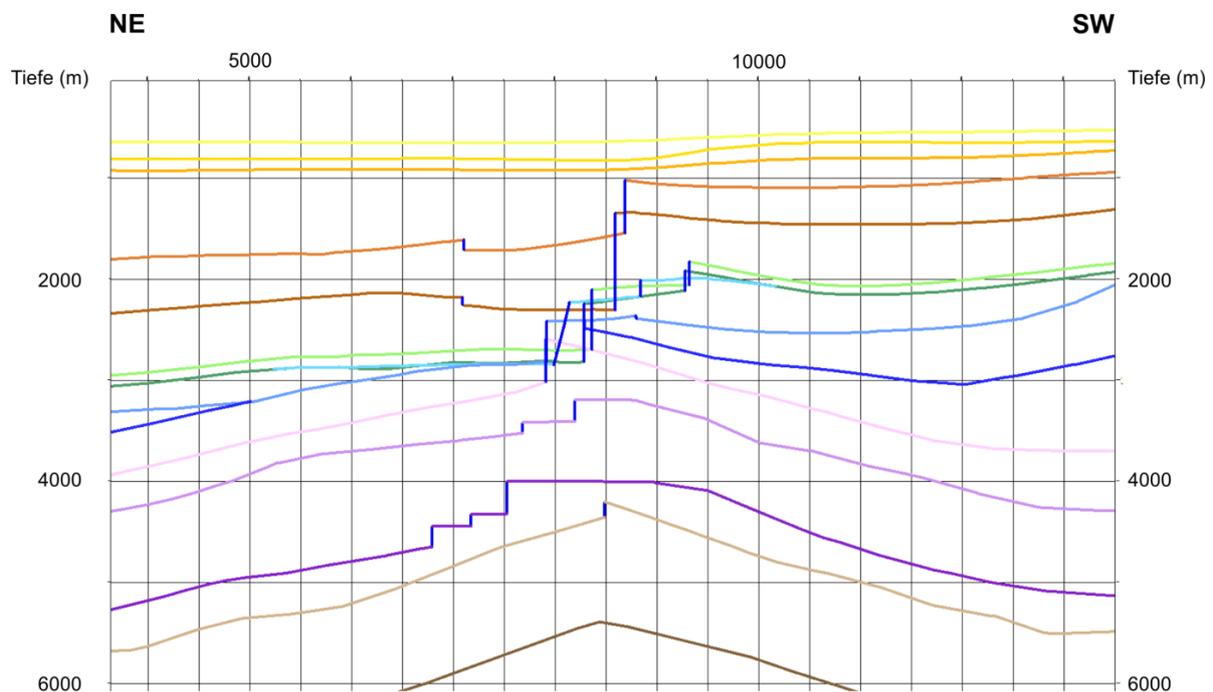


Abbildung 3: NE-SW-Profilanschnitt aus dem Modell des GTA 3D. Blau: Senkrecht modellierten Störungsflächen. Weitere farbliche Linien markieren den Verlauf der Horizontflächen (Bombien et al. 2012).

Der GTA wurde ursprünglich im Maßstab 1:100.000 kompiliert und in 1:300.000 publiziert. Dieser Maßstab geht unverändert in den GTA 3D ein. Um die Schichten des Buntsandstein im erforderlichen Maße für die Lithofaziesmodellierung anzupassen und zu unterteilen, sind die Horizonte des Unteren, Mittleren und Oberen Buntsandstein nach einer Digitalisierung aus den Mächtigkeitkarten nach Röhling (1988) in das GSN-Modell integriert worden.

In weiteren GPDN-Teilprojekten erhobene und kompilierte Daten wurden zusammen mit reflexionsseismischen Profilen zur Validierung des Modells genutzt. Eine Beschreibung der Aufarbeitung und Interpretation von Seismik- und Bohrungsdaten und ein umfassender Überblick über die Datenbasis im Nordseeraum wird im Projektzwischenbericht (Arfai et al. 2011) gegeben.

2.3 Notwendigkeit der Generalisierung

Die Generalisierung dient einerseits dazu, Inkonsistenzen bei der Kompilierung verschiedener Daten und Kartenwerke zu beseitigen, andererseits muss aufgrund von eingeschränkter Rechenkapazität (Prozessorgeschwindigkeit und Größe des Arbeitsspeichers z. B. bei Dateigrößen im Bereich von mehreren Gigabyte) eine Reduzierung der Datenmenge erfolgen.

Bei der Verwendung und dem Zusammenführen von mehreren Kartenwerken aus verschiedenen Datenquellen kommt es, aufgrund der unterschiedlichen Entstehungsgeschichten der jeweiligen Werke, zu geometrischen sowie geologischen Inkonsistenzen zwischen den Kartenwerken. Diese Inkonsistenzen werden sowohl durch die unterschiedlichen Bearbeiter, Datengrundlagen und Ziele der Kartenwerke als auch durch die unterschiedlichen Auflösungen und angewandten Methoden zur Extra- und Interpolation hervorgerufen.

Bei der Erstellung des GSN wurden diese Inkonsistenzen durch den Transfer bzw. der Interpolation von 2D-Daten und die Zusammenführung von Kartenwerken aus unterschiedlichen Maßstäben (zwischen 1:100.000 und 1:1.000.000) in ein dreidimensionales Modell deutlich sichtbar.

Zur Verwendung des Modells als Grundlage für eine Speicherpotenzialanalyse oder zur Modellierung der Kohlenwasserstoffgenese waren daher die folgenden Arbeitsschritte der Generalisierung und Fehlerbehebung erforderlich:

- Vorlagengetreue Vereinheitlichung der Daten,
- Verringerung der Störungsinformationen,
- Vereinfachung der geotektonischen Strukturen (z. B. Störungen),
- Vereinfachung der Geometrie der Salzkörper (überschneidungsfreie Formen).

2.3.1 Generalisierung der Störungsinformationen

In einem ersten Schritt wurde die Anzahl der dargestellten Störungsinformationen verringert und vereinheitlicht, ohne den großstrukturellen Kontext, wie beispielsweise den Bewegungssinn, zu verändern. Da andere Programme (Petrel, Petromod,...), mit denen weiterführende Modellierungen auf Basis des GSN (GOCAD) durchgeführt werden sollten, teilweise keine Überschiebungen bzw. multiplen z-Werte (Tiefenwerte) verarbeiten können, wurde eine vereinfachte Darstellung für Überschiebungen als saigerer Störungsverlauf gewählt (s. **Abbildung 4**).

2.3.2 Generalisierung der Salzstrukturen

Die Salzstrukturen im mesozoischen bis känozoischen Deckgebirge wurden für das GSN-Modell in Anlehnung an das bestehende GTA 3D-Modell von Bombien et al. (2012) stark vereinfacht. Dies wurde aufgrund der für die Petroleum-System- sowie die Lithofaziesmodellierung verwendeten Softwareprodukte (Petromod/Petrel, beide Schlumberger) notwendig. In beiden Fällen ist das Integrieren einer komplexen Geometrie von Salzstrukturen mit multiplen z-Werten für eine x-y-Koordinate in ein Volumenmodell aus zeittechnischen Gründen nicht praktikabel. Daher wurde ein räumliches Grundlagenmodell

erstellt, das für darauf aufbauende, kleinmaßstäbliche Modellierungen (kinematische und dynamische, als auch verschiedene Volumenmodelle) eine praktikable Umsetzung der eigentlichen Fragestellungen ermöglicht.

2.3.3. Bearbeitung von Überschneidungen der Horizontflächen

Geometrische Inkonsistenzen treten vermehrt in Form von Überschneidungen der Horizontbasisflächen der mesozoischen sowie känozoischen Einheiten auf. Gerade bei geringmächtigen Einheiten, wie beispielsweise der Unterkreide (im Mittel ca. 85 m mächtig), oder bei tertiären Einheiten im Hangenden von Salzstrukturen, ist dieses Phänomen häufig zu beobachten (**Abbildung 4**). Aus diesem Grund kommt es bei Mächtigkeitsberechnungen auf Basis des GTA 3D lokal zu negativen Werten, die zu Folgefehlern bei der Erstellung von Volumenmodellen führen.

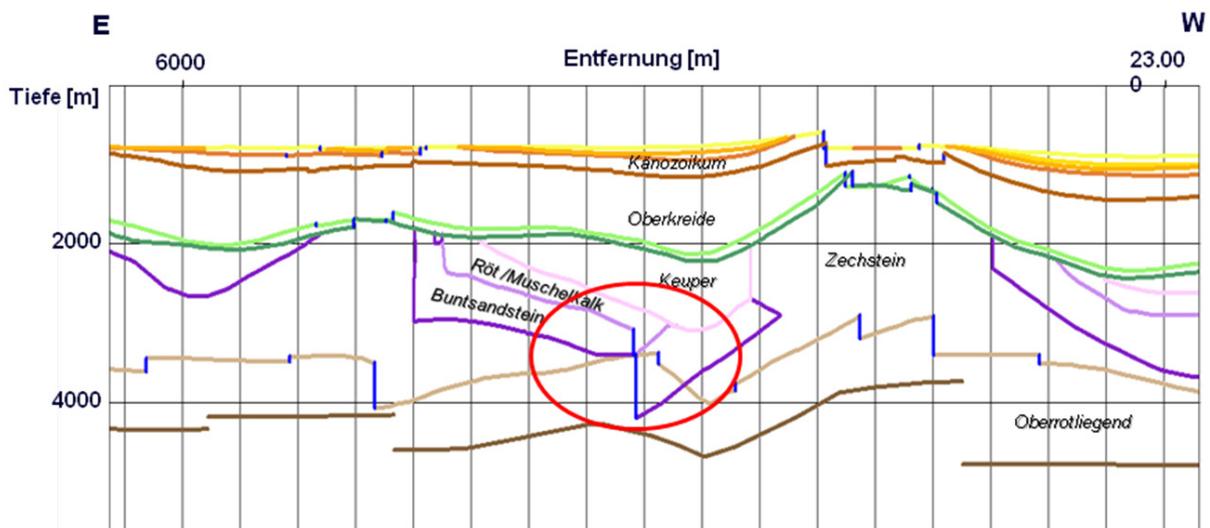


Abbildung 4: E-W-Profileschnitt im Modell des GTA 3D mit Horizontverläufen, blaue Linien stellen vertikal modellierte Störungsflächen dar; der rote Kreis markiert einen Bereich mit markanter Überschneidung der Horizontverläufe (Bombien et al. 2012).

3. Methodik und Konzepte

3.1 Geologisches Grundkonzept

Insgesamt deckt das GSN-Modell stratigraphisch den Bereich von der Basis des Namur bis zur Mittel-Miozän-Diskordanz ab. Die geologische Entwicklungsgeschichte des deutschen Nordseeraumes ist von Arfai et al. (2011) beschrieben. Bei der Betrachtung der Störungsausbisse in den jeweiligen Horizonten des GTA 3D zeigen sich teils deutlich gegensätzliche Muster. Die Abhängigkeit der Bruchmuster in Bezug auf verschiedene stratigraphische Abfolgen im Untergrund wird auch unter dem Begriff der Stockwerkstektonik zusammengefasst. Dabei zeigen verschiedene tektonische Stockwerke ein unterschiedliches Deformationsverhalten zu liegenden oder hangenden Stockwerken. So kann zum Beispiel ein älteres Stockwerk eine Deformationsgeschichte widerspiegeln, die vor der Ablagerung der Abfolgen des jüngeren Stockwerkes stattfand. Desweiteren besteht auch die Möglichkeit, dass tektonische Stockwerke aufgrund stark unterschiedlicher Lithologien auf dieselbe Beanspruchung mit einem unterschiedlichen Deformationsverhalten reagieren. Im vorliegenden Fall wird dies besonders durch die Korrelation der einzelnen Störungsspuren im GTA 3D deutlich (**Abbildung 5**).

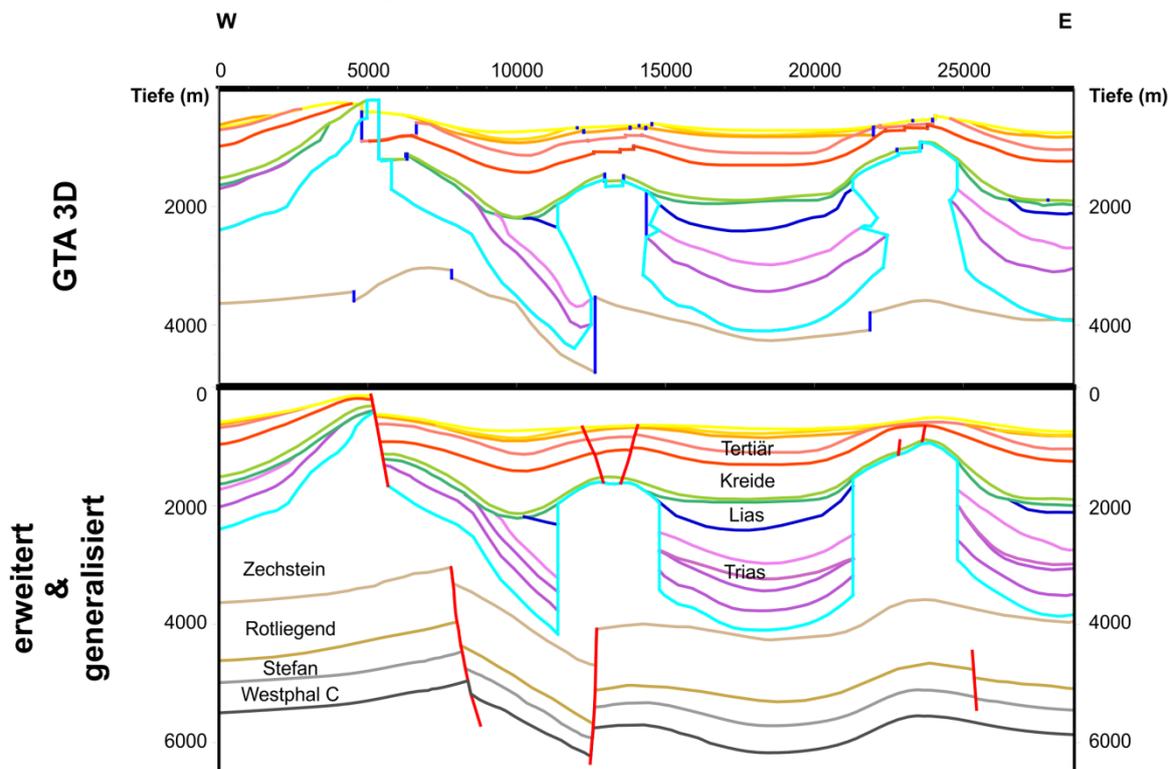


Abbildung 5: Vergleich vom GTA 3D mit dem generalisierten und erweiterten Modell anhand eines W-E-Profileschnittes. Vertikale blaue Linien im oberen Profil und rote Linien im unteren Profil markieren modellierte Störungsverläufe. Unteres Profil ergänzt durch Rotliegend und Karbon

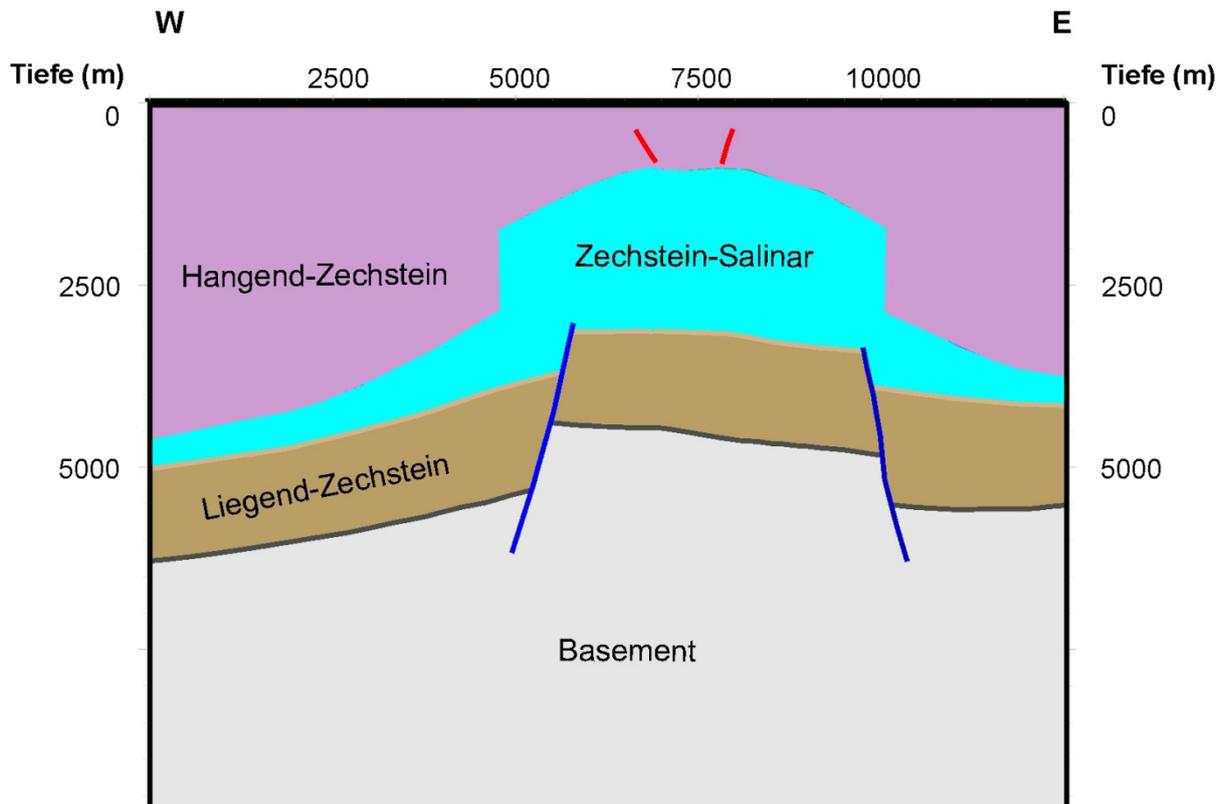


Abbildung 6: Ein W-E-Profilsschnitt durch eine Salzstruktur visualisiert die vorgenommene Stockwerkseinteilung. Braun = Liegend-Zechstein-Stockwerk, türkis = Zechstein-Stockwerk, violett = Hangend-Zechstein-Stockwerk, blaue Linien = Störungsverläufe im Liegend-Zechstein-Stockwerk, rote Linien = Störungsverläufe im Hangend-Zechstein-Stockwerk, Basement definiert Prä-Karbon Abfolgen, die nicht im Modell berücksichtigt wurden.

Das Störungsmuster im Hangenden des Zechstein unterscheidet sich in seiner Ausprägung von dem im Liegenden. Verbindende Störungsverläufe zwischen dem Hangend- und Liegend-Zechstein-Stockwerk sind innerhalb des Zechstein-Salinars entweder nicht vorhanden oder in den zugrundeliegenden seismischen Daten nicht nachweisbar.

Gerade für die strukturelle und sedimentäre Entwicklung des mesozoisch bis känozoischen Deckgebirges spielte die Mobilisation der Zechstein-Salinare im Zuge von Halokinese und Halotektonik eine entscheidende, strukturprägende Rolle.

Daher wird zwischen einem Stockwerk im Liegenden (Liegend-Zechstein-Stockwerk) und einem im Hangenden des Zechstein (Hangend-Zechstein-Stockwerk) unterschieden. Das Zechstein als solches wurde bei der Modellierung nicht genauer differenziert (**Abbildung 6**).

3.1.1 Das Liegend-Zechstein-Stockwerk

Das Liegend-Zechstein-Stockwerk umfasst im Modell die Schichten des Namur (nach Krull 2005), Westfal C und Stefan (beide nach Brückner-Röhling et al. 1994) sowie des sedimentären Oberrotliegend (nach Doornenbal & Stevenson 2010), wobei die Basisfläche des Zechstein aus dem GTA 3D das Top des Stockwerks bildet. Durch die modellierten Basisflächen der Schichten wird das Stockwerk unterteilt.

Die Interpretation und Generalisierung der Störungen im Liegend-Zechstein basiert auf Daten für die Oberrotliegend-Basis aus dem SPBA und auf den Daten des GTA 3D für die Zechstein-Basis.

Zur Überprüfung und Verifizierung der am Modell vorgenommenen Generalisierungen wurde zeitmigierte Reflexionsseismik hinzugezogen (Arfai et al. 2011). Auf diesem Wege konnte sichergestellt werden, dass die Geometrie von Störungen im Modell korrekt erfasst wurde.

Genauere geometrische Parameter, wie zum Beispiel der Einfallswinkel einer Störungsfläche, können jedoch nicht ohne zusätzliche Tiefenwandlung aus zeitmigrierter Seismik generiert werden. Einer größeren Anzahl von Störungen (s. **Abbildung 7**) wurde aufgrund von Hinweisen aus der Seismik ein Blattverschiebungsanteil zugewiesen. Somit wurden diese Störungsflächen meist ohne bevorzugte Vergenz mit steilem Einfallen konstruiert (**Abbildung 8**).

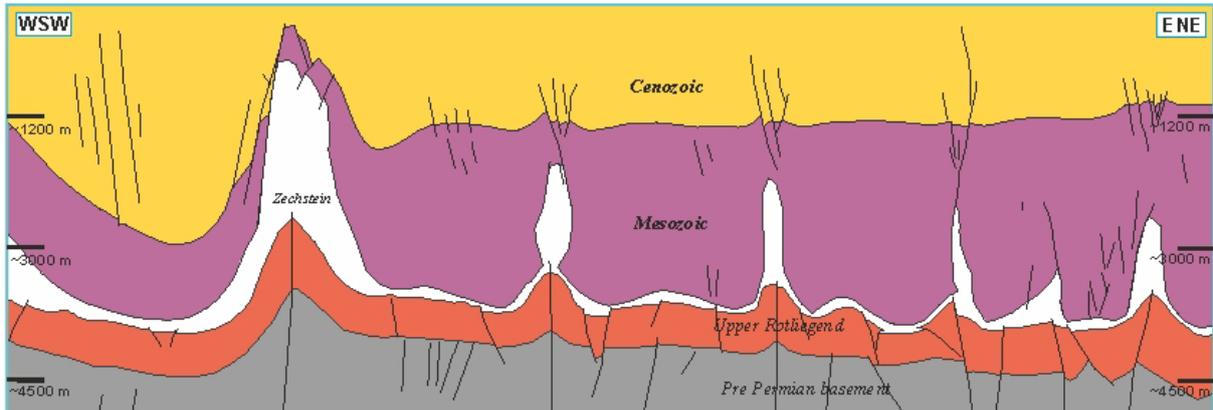


Abbildung 7: Interpretation einer seismischen 2D-Linie nördlich der ostfriesischen Inseln. Das Profil gibt einen Überblick über die Störungsmuster im Oberen Rotliegend und im Prä-Perm-Grundgebirge. Eine Aussage über das genaue Einfallen der Störungen ist auf Basis der zugrundeliegenden groben Tiefenwandlung des Profils nur bedingt möglich. Insbesondere unterhalb von Salzstrukturen wurden vorhandene „velocity pull-ups“ nur teilweise herausgerechnet. Die Mächtigkeitsschwankungen in den Oberrotliegend-Abfolgen lassen sich durch die halotektonische Mobilisierung der Rotliegend-Salinare erklären (Jähne et al. 2012).

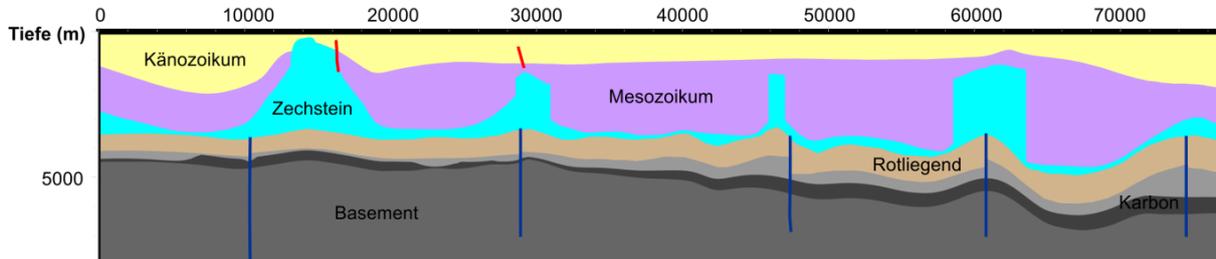


Abbildung 8: W-E-Profileschnitt des generalisierten Modells im Bereich der südlichen deutschen Nordsee. Die blauen Linien zeigen Störungsverläufe im Perm, Karbon und dem restlichen Grundgebirge, die mit einem steilem Einfallen und ohne bevorzugte Vergenz modelliert wurden.

Kartenwerke der Region (Baldschuhn et al. 1998, Reinhold et al. 2008) und neuere Analysen im Rahmen des GPDN-Projektes (Jähne et al. 2012) lassen vermuten, dass die Oberrotliegendabfolgen im Bereich der deutschen Nordsee großflächig halotektonisch mobilisiert wurden. Die Basis des Oberrotliegend wurde im SPBA überwiegend aus Mächtigkeitsschätzungen weniger Bohrdaten und aus der Mächtigkeitsschätzungenkarte des sedimentären Rotliegend im Bezug zu der Basisfläche des Zechstein aus dem GTA berechnet. Mögliche Varianzen der Mächtigkeitsschätzungen durch die partielle Mobilisierung des Rotliegend-Salinars sind nicht berücksichtigt, wodurch sich Unsicherheiten in der Tiefenlage dieser Fläche ergeben.

3.1.2 Das Zechstein

Das Zechstein wird im Modell nicht weiter untergliedert und als ein Schichtpaket dargestellt. Je nach geologischen Rahmenbedingungen wirken die Salzformationen des Zechstein aufgrund des rheologischen Verhaltens tektonisch entkoppelnd. Die Salzstrukturen im zentralen deutschen Nordsee-Sektor besitzen unterschiedliche Formen und Geometrien, wobei die Verteilung bestimmter Salzstrukturtypen mit dem großmaßstäblichen Struktur-aufbau der deutschen Nordsee korreliert. Auf dem Westschleswig-Block sind Salzkissen vorherrschend. Dagegen dominieren im Übergang zum Nordwestdeutschen Becken sowie im Horn-Graben eher komplexere Geometrien in Form von Salzstöcken oder Salzmauern.

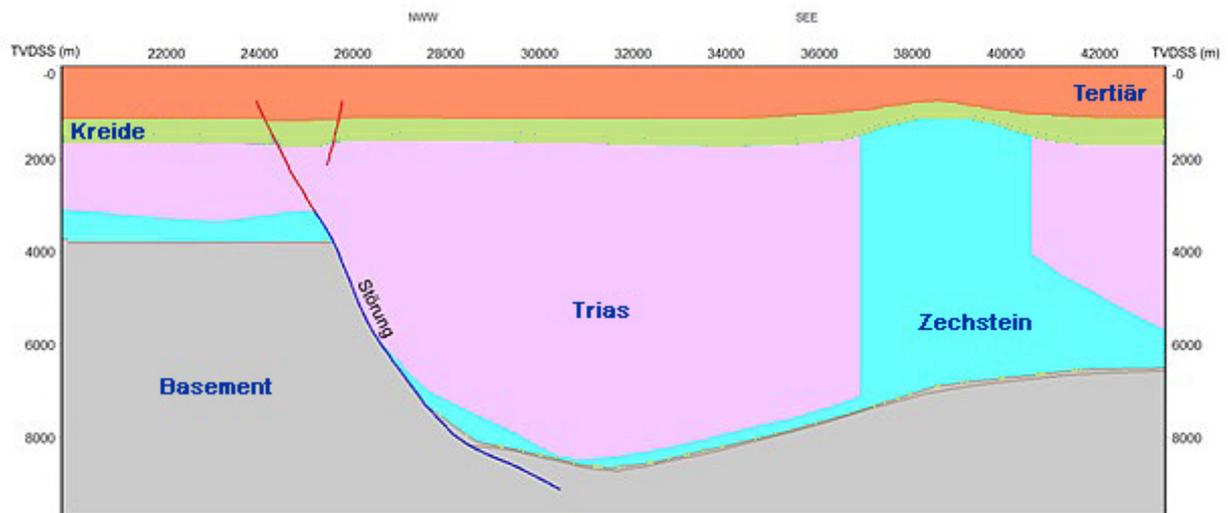


Abbildung 9: NW-SEE-Profilanschnitt im generalisierten Modell senkrecht zur Streichrichtung des Horn-Graben. Die Störung versetzt das Zechstein-Salinar.

Nur vereinzelt treten Störungen auf, die sowohl eindeutig das Liegende als auch das Hangende des Zechstein-Stockwerk und somit ebenfalls das Zechstein-Salinar mit einer hohen Vertikalkomponente versetzen. Ein Beispiel hierfür sind die Hauptstörungen des Horn-Graben (**Abbildung 9**).

3.1.3 Das Hangend-Zechstein-Stockwerk

Das Hangend-Stockwerk des Zechstein im GSN umfasst die Einheiten der Trias, des Jura, der Kreide sowie des Tertiär bis zur Mittel-Miozän-Diskordanz. Die mesozoischen und känozoischen Schichten sind im Bereich des nordwestdeutschen Becken, des Glückstadt-Graben, der G-Plattform, des Horn-Graben sowie seinem südwestlichen und südlichen Fortsatz (**Abbildung 1**), durch Halokinese der Zechstein-Salinare maßgeblich geprägt worden. Im Hangendbereich der Salzstrukturen sind vermehrt Störungssysteme in Form von Scheitelgräben ausgebildet. Der Versatz an Scheitelgräben verteilt sich meist auf eine Vielzahl von Störungen, die sich teilweise komplex verzweigen.

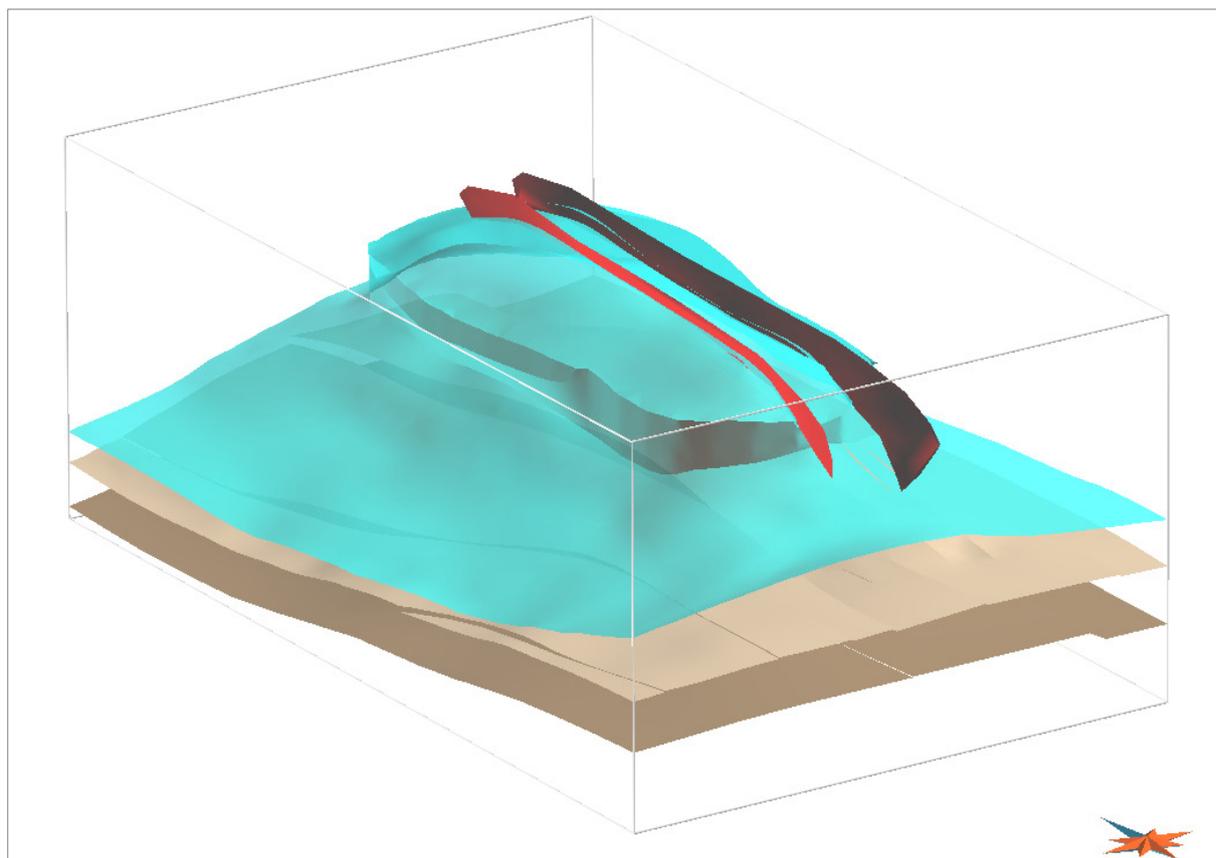


Abbildung 10: Horizontflächen (türkis = Top-Zechsteinsalz, beige = Basis Zechstein) im Bereich einer Salzstruktur mit zwei generalisierten Störungen des Hangend-Zechstein-Stockwerkes, die bis an das Top des „Zechstein Stockwerkes“ modelliert wurden.

Bei der Generalisierung wurden solche Strukturen mit möglichst wenigen Störungen dargestellt (**Abbildung 10**), ohne dabei die kinematische Aussage der Gesamtstruktur entscheidend zu verändern. Vereinzelt treten Störungszonen an Salzstockrändern oder verbindend zwischen zwei benachbarten Salzstöcken auf. Diese sind im Modellgebiet kürzer als 5 km, können aber Versatzbeträge von einigen hundert Metern aufweisen und wurden aus diesem Grund in das generalisierte Modell übernommen (**Abbildung 11**). Im Hangend-Stockwerk überwiegen Störungen mit einer dominierenden Abschiebungskomponente.

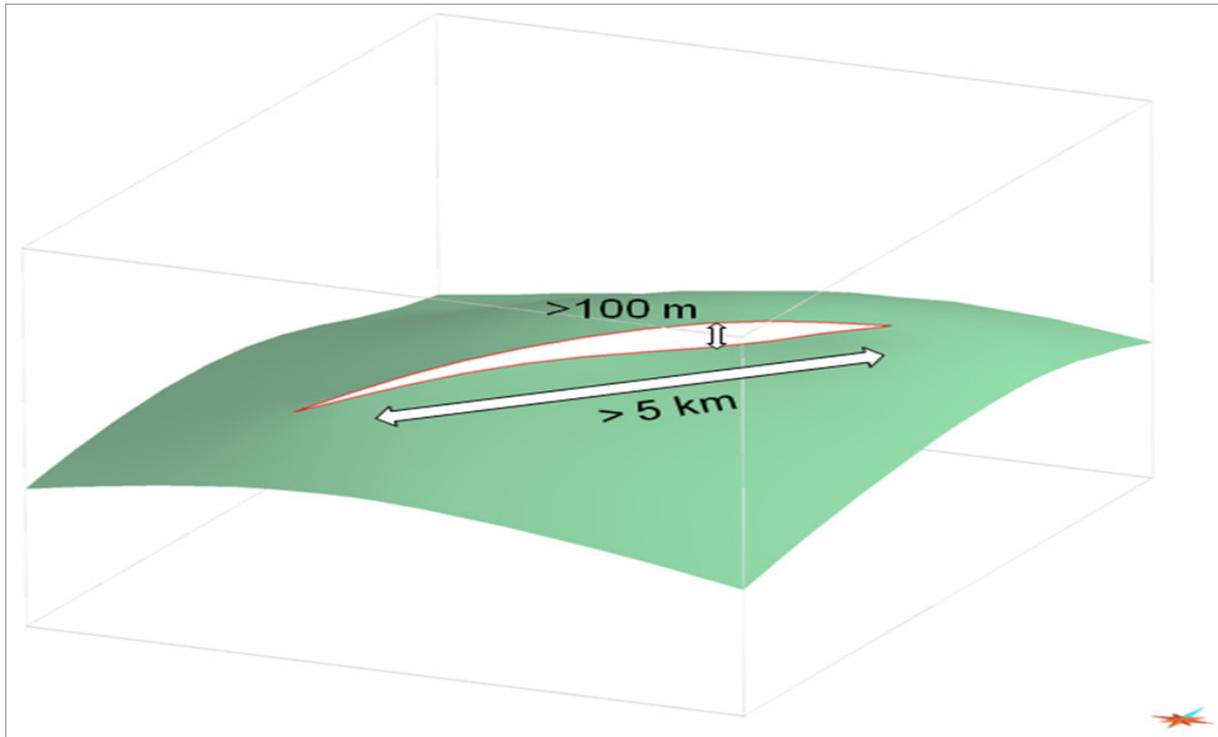


Abbildung 11: Exemplarische Darstellung einer Horizontfläche mit modelliertem Störungsausschnitt. Kriterien zur Berücksichtigung von Störungen im Modell sind: >100 m vertikaler Versatz der Horizontfläche und > 5 km laterale Versatzlänge.

3.2 Modelltechnisches Konzept

Die Erstellung des Modells erfolgte mit der Software GOCAD (v.2011.2; Paradigm®). Daten aus analogen Kartenwerken wurden nach der Digitalisierung und Georeferenzierung zur Weiterverarbeitung, je nach Datenformat, über verschiedene Schnittstellen in GOCAD importiert.

3.2.1 Anpassung der Daten an die Modellgrenzen und Neutriangulierung der Horizonte

In Abhängigkeit von den vorliegenden Datenformaten erfolgte eine unterschiedliche modelltechnische Herangehensweise zur Übertragung in das dreidimensionale Modell. Für die Modellierung der Horizonte des Karbon wurden die Flächenpunkte anhand der Datenpunkte (x-y-z-Werte) der jeweiligen Literaturquellen über die Software ArcGIS (Esri, V10) digitalisiert, georeferenziert und in Form von „*shape-files*“ in GOCAD importiert, um daraus Flächen zu erstellen. Die so berechneten, triangulierten Flächen dienen zur Ableitung der Verbreitung eines Horizontes und der Abstände zwischen Horizonten. Die Berechnung der Tiefenlage erfolgte durch Addition von Mächtigkeitskarten „auf“ die Basisfläche des Zechstein (des GSN). Nachfolgend wurden die auf diese Weise berechneten Horizonte geglättet, auf Flächenüberschneidungen überprüft und gegebenenfalls korrigiert.

Die Flächeninformation für die Basis des Oberrotliegend lag in Form eines 2D-Grids vor und wurde mithilfe des GOCAD-Workflows „*Structural Modeling*“ in eine triangulierte Fläche überführt.

Die Flächendaten des GTA 3D liegen in Kachelform in Größe und Orientierung der TK 100 Blätter vor. Sie wurden im ersten Schritt an die Grenzen des Modellrahmens angepasst. Die im GTA 3D gegebene homogene Maschung der Flächen ist relativ dicht und besitzt damit auch eine relativ hohe Anzahl von Stützpunkten (s. **Abbildung 12** links).

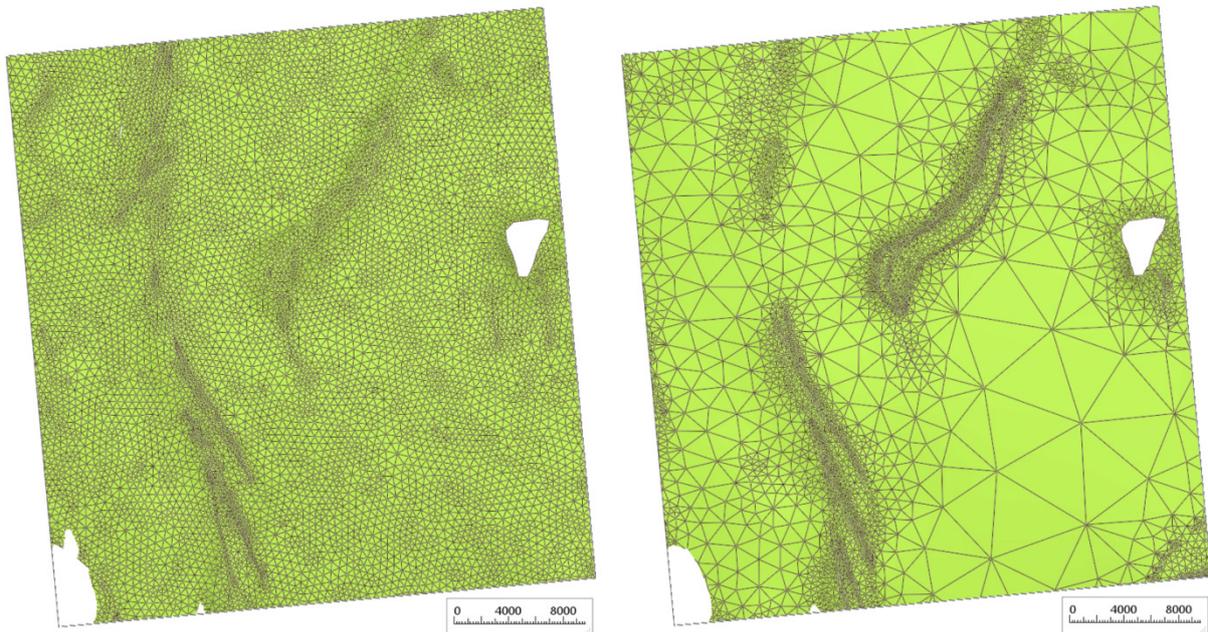


Abbildung 12: Vergleich des Dreiecksnetzes vor und nach der Punkte-Dezimierung bei Erhalt der morphologisch prägendsten Strukturen. Links vor und rechts nach der Modifikation. Durch den Vorgang wird die homogene Maschung in eine heterogene geändert.

So ist beispielsweise die Basisfläche des Zechstein im GTA 3D aus 206.502 Punkten aufgebaut. Nach einer Neumodellierung mithilfe des „*Structural Modeling*“-Workflows, in dem der „*discrete smooth interpolation*“-Algorithmus (DSI, Mallet 1997) verwendet wurde, konnte im GSN-Modell die Punktdichte mit dem „*Decimate*“-Tool um 64 % auf 73.513 Punkte reduziert werden (s. **Abbildung 12**). Die Verwendung des DSI-Algorithmus bei der Flächenerstellung hat den Vorteil, dass die Fläche nicht aus einer direkten Verknüpfung von Punkten miteinander aufgebaut wird (direkte Triangulation), sondern eine bestehende Fläche mit einer vorher definierten Maschung an einen Punktdatensatz durch gesetzte, punktbezogene Rahmenbedingungen („*constraints*“) iterativ angepasst wird. Dementsprechend muss die Dichte der Maschung der erstellten Fläche nicht der Punktdichte der Ausgangsdaten entsprechen.

Nach diesem Arbeitsschritt sind die neumodellierten Flächen aus einer heterogenen Maschung (s. **Abbildung 12**) aufgebaut. Bereiche mit komplexerer Geometrie erfordern eine höhere Punkt- und somit auch eine höhere Dreiecksdichte, um sie möglichst getreu darstellen zu können. Bei einfacherer Flächengeometrie nimmt die Punktdichte dementsprechend ab. Durch die Neutriangulierung aller vorhandenen Flächen des GTA 3D für das GSN wird nicht nur die kumulierte Punktzahl, sondern auch die Datenmenge des Gesamtmodells vermindert (ca. 151 MB als GOCAD-ASCII, zuvor 349 MB).

Für den Muschelkalk (m) und den Oberen Buntsandstein (so) ist im GTA sowie im GTA 3D nur eine gemeinsame Basisfläche (so+m) gegeben. Sowohl bei der Verbreitung als auch bei der Tiefenlage findet dort keine Differenzierung zwischen dem Oberen Buntsandstein und dem Muschelkalk statt. Dies bedeutet, dass die Verbreitung der beiden Einheiten unterschiedlich sein kann, jedoch im Falle des GTA nicht weiter unterschieden wird. Zur Abgrenzung des Röt (so) vom Muschelkalk und zur Erstellung einer Topfläche des Röt

wurden aus stratigraphischen Bohrmarkern Mächtigkeiten des Oberen Buntsandstein berechnet und über den DSI-Algorithmus über das Arbeitsgebiet extrapoliert. Dabei wurde in erster Vereinfachung die Verbreitung der angegebenen Basisfläche als Verbreitung des Oberen Buntsandstein verwendet. Es wurde weiterhin angenommen, dass an den Verbreitungsgrenzen, mit Ausnahme der internen Modellgrenzen (wie zum Beispiel entlang von Salzstrukturen), eine Nullmächtigkeit vorliegt. Zudem wurde entlang der Ränder von Zechstein-Strukturen (Diapiren/Salzmauern) eine Mindestmächtigkeit zugrunde gelegt, die auf der Mächtigkeit des Röt-Ton (soT) aus Literaturdaten basiert. Dagegen wurden für die Salinare des Röt (soS) auch Nullmächtigkeiten zugelassen, da diese möglicherweise in der Nähe von Diapiren mobilisiert wurden.

Für die Erstellung der Basisfläche des Mittleren Buntsandstein (sm) wurden Mächtigkeitsdaten aus Röhling (1988) verwendet. Die Verbreitung orientiert sich an der Basisfläche des Unteren und Mittleren Buntsandstein (su+sm) des GTA. Dessen Karten wurden mithilfe von ArcGIS digitalisiert und georeferenziert. In einem weiteren Schritt wurden diese Daten in GOCAD geladen und zur Modellierung einer neuen Fläche genutzt. Die Mächtigkeitsinformation wurde als Schichteigenschaft („property“) der Fläche (su+sm) aus dem GTA beigefügt. Über einen Skript-Editor erfolgte anschließend eine Addition der Mächtigkeitsinformation auf die Flächendarstellung des Unteren Buntsandstein. Zur Überprüfung der Fläche wurden die stratigraphischen Marker der Volpriehausen-Folge aus Bohrungsdaten verwendet.

3.2.2 Modellierung und Generalisierung von Störungen

Für Störungen wurden Kriterien definiert, die festlegen, welche Störungsinformationen aus den jeweiligen Kartenwerken pro Horizont in das Modell übernommen werden.

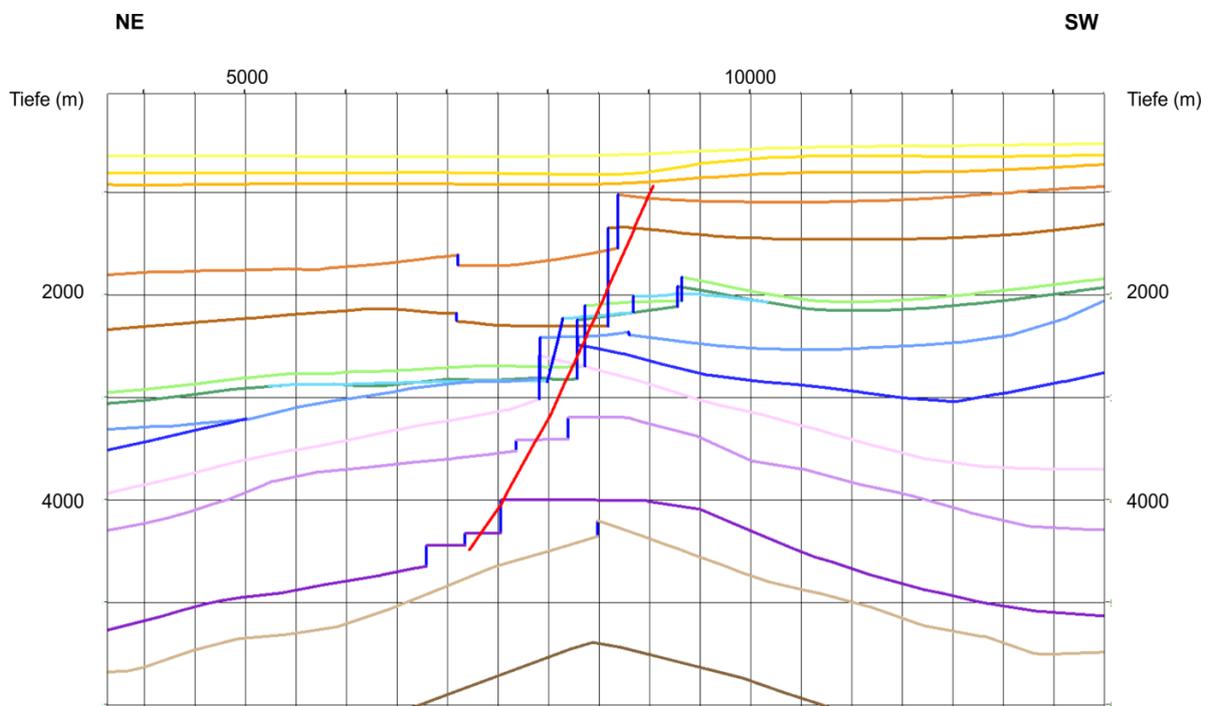


Abbildung 13: NE-SW-Profil aus dem Modell des GTA 3D senkrecht zu einer Störung. Blaue Linien zeigen die modellierten Versätze im ursprünglichen Modell. Die rote Linie zeigt den Verlauf der generalisierten Störung.

Um im Modell berücksichtigt zu werden, muss eine Störung somit drei der folgenden Kriterien erfüllen:

- vertikaler Mindestversatz von 100 m,
- laterale Mindeststörungslänge von 5 km,
- Versatz von mehr als einer Horizontfläche oder
- >>100 m vertikaler Versatz, wenn nur eine Horizontfläche versetzt wird.

Für die Generalisierung in Bezug auf die relevanten Störungssysteme im Hangenden des Zechstein wurde ausschließlich auf den GTA 3D zurückgegriffen. Da dieser aus 2D Kartenwerken konstruiert worden ist, die ausschließlich senkrechte Abrisskanten in den jeweiligen Horizonten darstellen, ist das schlüssige Verbinden dieser Abrisskanten zu plausiblen und über die Horizontgrenzen hinausreichenden Störungsflächen problematisch (s. **Abbildung 13**). Aus diesem Grund wurde vereinzelt auf zeitmigrierte Seismik zurückgegriffen, um den Charakter von im Modell unterbestimmten Strukturen besser zu erfassen.

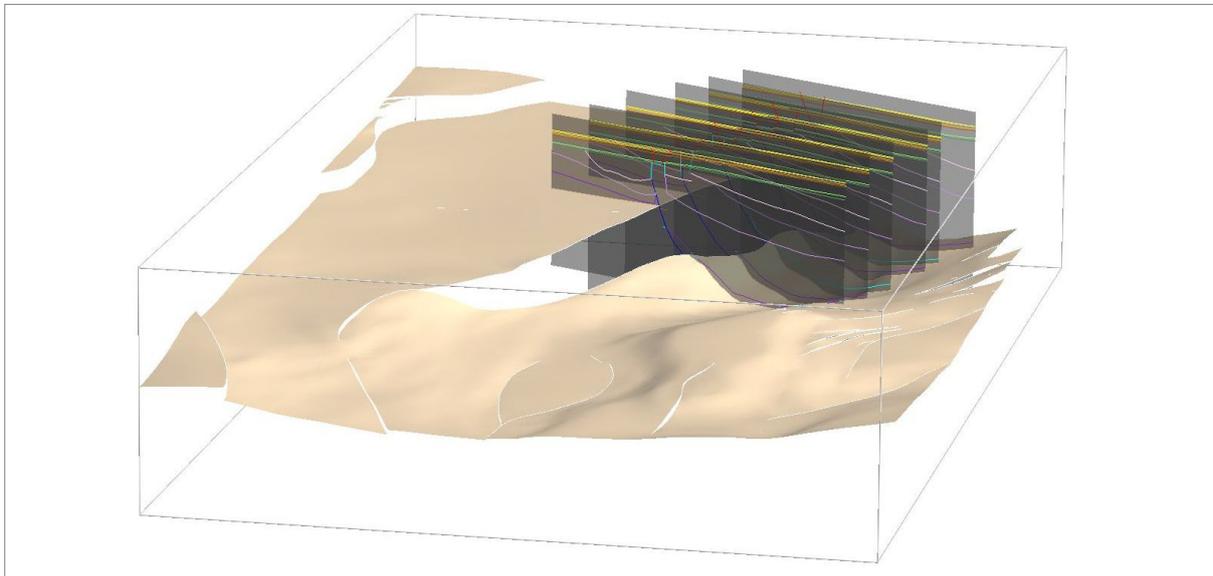


Abbildung 14: Senkrecht zur Störung erstellte Profilschnitte zur Interpretation. Als Bezug ist die Zechstein-Basisfläche des GTA 3D eingeblendet

Die Generalisierung der Störungen erfolgte auf Basis von senkrecht zum Streichen der jeweiligen Störung definierten Störungslinearen („*fault sticks*“, s. **Abbildung 14** und **Abbildung 15**) und der anschließenden Interpolation (s. **Abbildung 16** und **Abbildung 17**). Je nach Komplexität der Geometrie der Störungszone wurde der Abstand der manuell gesetzten interpretierten Profilschnitte variiert. In der Regel schwankt der Abstand dieser Profilinterpretationen zwischen 200 und 1000 m.

Die erstellten „*fault sticks*“ geben mit ihrer Länge die maximale vertikale Ausdehnung der Störungsfläche an. Der Umriss der Fläche wurde über die Endpunkte dieser „*fault sticks*“ generiert. Mit diesen Informationen wurde mithilfe des „*Fault Construction*“-Wizards“ in GOCAD eine Fläche erstellt, die im Wesentlichen die Stützpunkte der Lineare übernimmt.

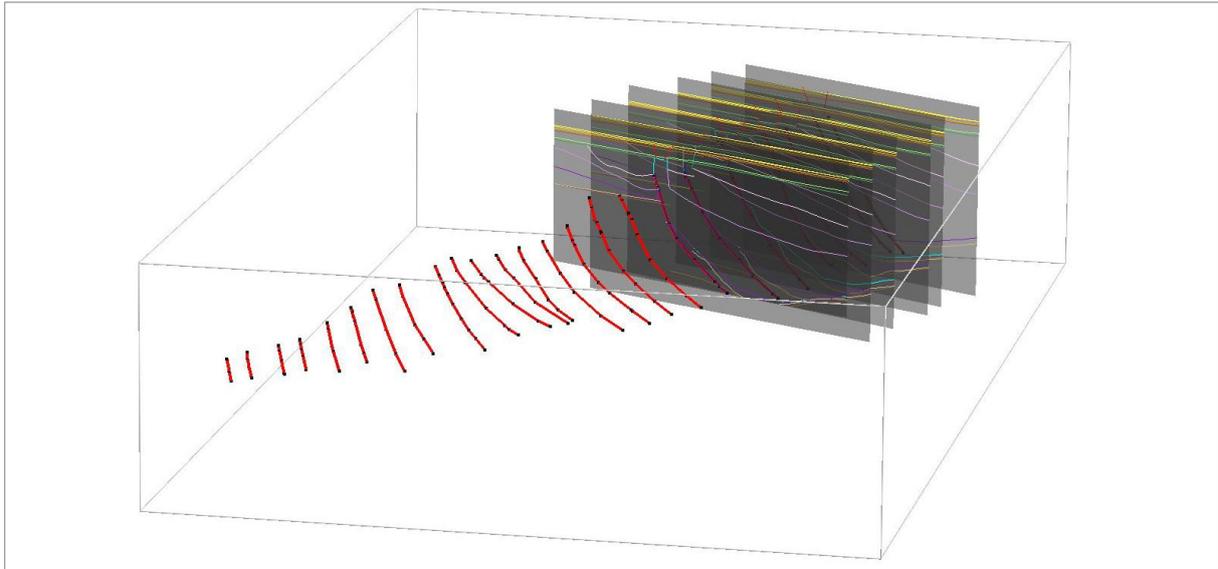


Abbildung 15: „fault stick“ – Interpretation einer Störung. Die einzelnen „fault sticks“ wurden in einer Profilansicht des GTA 3D interpretiert.

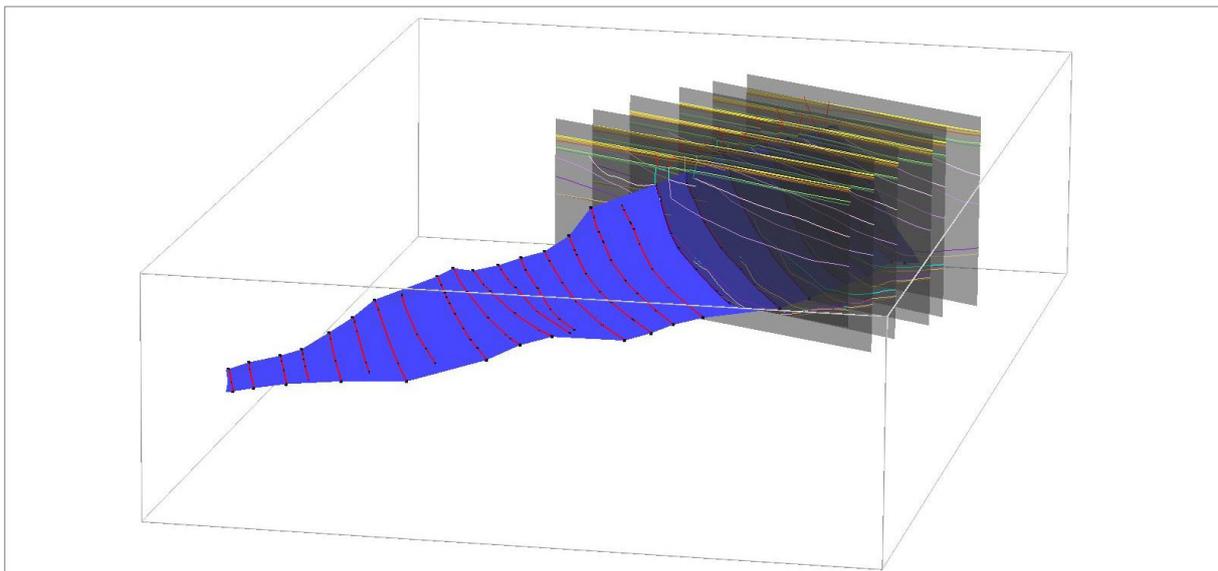


Abbildung 16: Aus den „fault sticks“ modellierte Störungsfläche.

Zu den Enden hin wurden die Störungen als auslaufend, mit einem kontinuierlich abnehmenden Versatz, modelliert.

Störungs-Störungs-Kontakte sind in einem anschließenden Schritt schlüssig (konsistent) konstruiert worden (s. **Abbildung 18**).

Zur Kennzeichnung der Relevanz der Störungen für das GSN-Modell wurden diese in ein Wichtungsschema eingeordnet. Allen modellierten Liegend-Zechstein-Störungen wurde die Wichtung 1 („besonders wichtig“) zugeordnet, da sie im deutschen Nordseeraum häufig einen Einfluss auf die Entwicklung von Salinar-Strukturen haben und zudem meist die höchsten Sprunghöhen aufweisen. Im Gegensatz dazu wurde den meisten Hangend-Zechstein-Störungen eine geringere Bedeutung beigemessen (2 „wichtig“ bis 3 „untergeordnet wichtig“), da sie in der Regel weniger strukturprägend als die Störungen des Liegend-Zechstein-Stockwerkes sind.

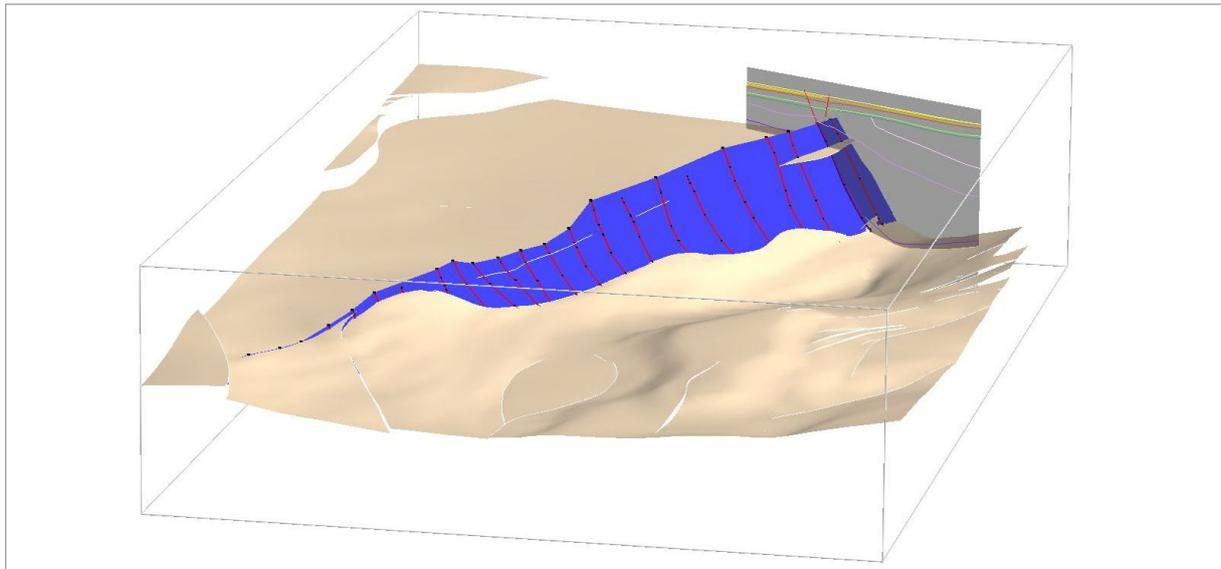


Abbildung 17: Modellierte Störungsfläche in Kontakt zur gestörten Zechstein-Basisfläche im Bereich des Horn-Graben.

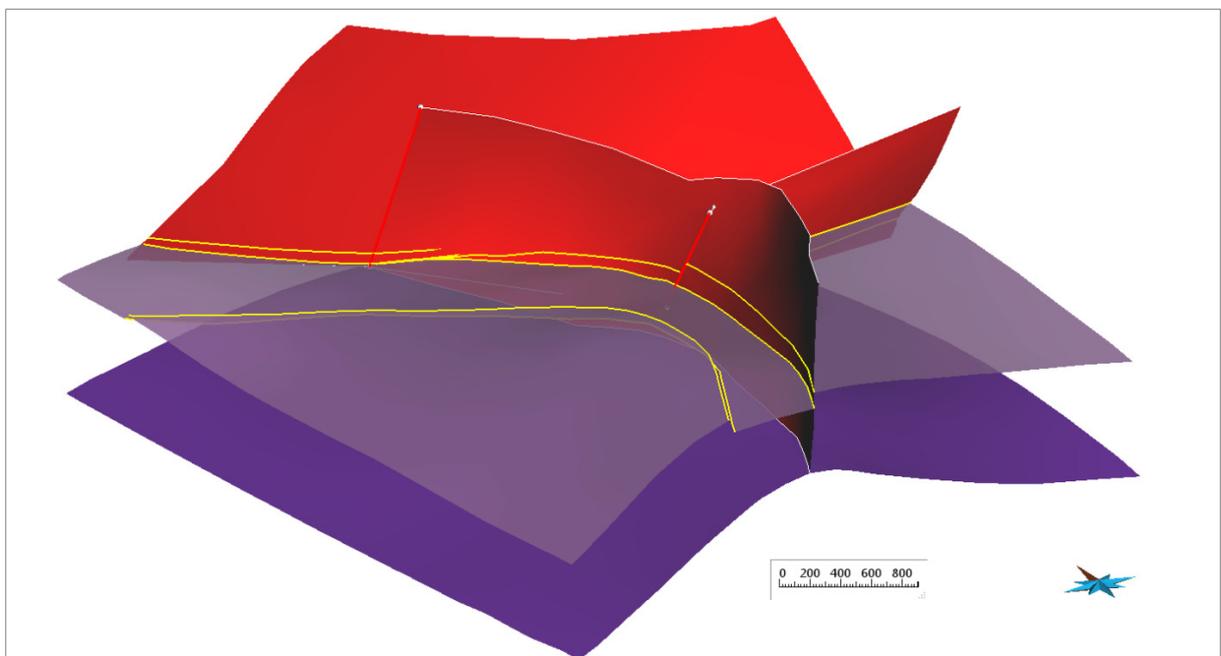


Abbildung 18: Drei modellierte Störungsflächen in Bezug zu Horizontbasisflächen des Oberen und des Unteren/ Mittleren Buntsandstein. Rote Lineare deuten den konsistent modellierte Störungs-Störungs-Kontakt an. Gelbe Lineare visualisieren Störungs-Horizont-Kontakte.

Das Hangend-Zechstein-Stockwerk ist für verschiedene Nutzungsoptionen im tieferen Untergrund von besonderem Interesse und wurde deswegen mit einem detaillierteren Störungsmodell dargestellt. Deshalb sind auch Störungen mit einer Wichtung von 2 bis 3 in das generalisierte Modell integriert worden. Die Wichtung kann bei einer Auswahl von Störungen für eine weitere Generalisierung des Modells und der Reduzierung der Störungsflächen hilfreich sein.

3.2.3 Einbau des Störungsmodells in die modellierten Horizontflächen

Das generalisierte Störungsmodell umfasst 27 Störungen im Liegend- und 78 Störungen im Hangend-Zechstein-Stockwerk. Der Einbau des Störungsmodells in die Horizontflächen wurde für jede Störungsfläche einzeln vorgenommen. Zur effektiven Versatzmodellierung und dem sukzessiven Einbau der einzelnen Störungen und Strukturen in Flächen wurde der Arbeitsschritt „*Horizon-Fault-Contact-Modelling*“ im „*Structural Modelling-Workflow*“ von GOCAD verwendet. Dieser bietet den Vorteil eines auf die modellierte Störungsfläche projizierten Allan-Diagramms zur besseren Darstellung der Beziehungen zwischen Hangend- und Liegend-Block (**Abbildung 18**). Auf diesem Wege lassen sich relativ einfach plausible und konsistente Versatzbeträge modellieren.

Aufgrund der Datengröße der einzelnen Flächen und der damit verbundenen hohen Anforderungen an Rechnerkapazität und Bearbeitungszeit vor dem Einbau der Störungen, wurden Regionen definiert, als eigenständige Fläche extrahiert und anschließend bearbeitet. Diese Vorgehensweise dient der besseren Übersicht und erlaubt eine schnelle Identifizierung von ungewollten Änderungen an den Flächen, welche durch die im Programm implementierten Interpolations-Algorithmen verursacht werden können (Qualitätssicherung). Sofern die Grenz-Stützpunkte der Flächen während des Arbeitsvorganges im Workflow fixiert sind (als „*control nodes*“ gesetzt), können sie anschließend mit relativ geringem Aufwand wieder in die Gesamt- bzw. Ausgangsflächen integriert werden.

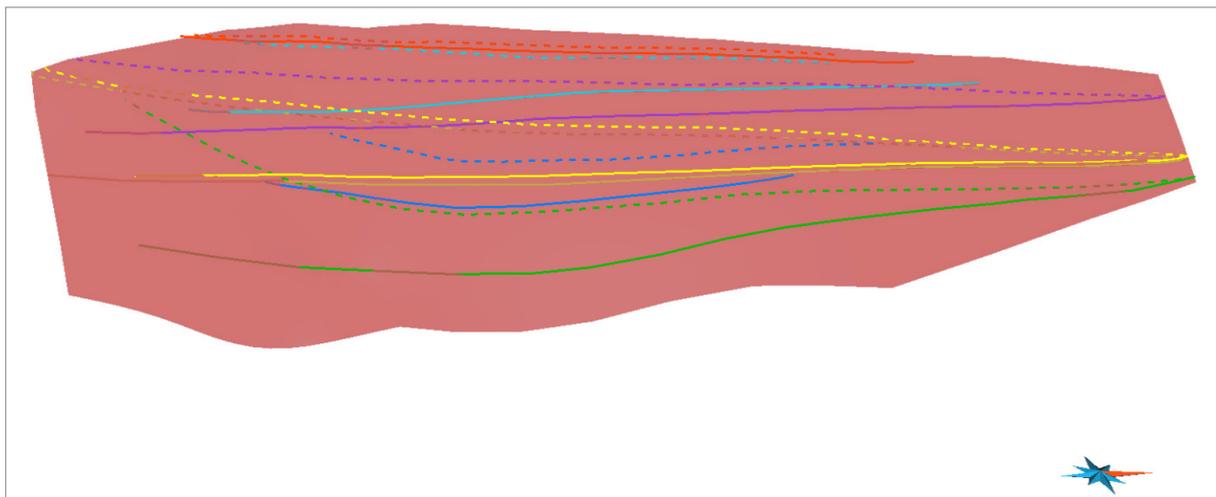


Abbildung 19: Auf eine Störungsfläche projizierte Horizontkontakte während des Arbeitsschrittes „*Horizon-Fault-Contact-Modelling*“ im *Structural Modelling-Workflow*. Durchgezogene Linien = Hangend-Kontakte, gestrichelte Linien = Liegend-Kontakte.

3.2.4 Vereinfachung der Geometrie der Salzstrukturen

Aufgrund der im GTA 3D dargestellten Überhänge in der Salzstruktur-Umhüllenden und der damit verbundenen multiplen z-Achsenwerte, die nur für Detailstudien und zudem nur aufwendig in einem Volumen-Zellenmodell umgesetzt werden können, wurden die Wände der Salzdiapire als vertikale Umhüllende angepasst. Die Geometrie von Salzkissen ist in dieser Hinsicht unproblematisch, da sie keine Überhänge aufweisen. Die laterale Abmessung des Körpers im Modell richtet sich nach der Verbreitung der gegebenen Dachfläche der Salzstruktur (s. **Abbildung 20**). Durch diese geometrische Vereinfachung wird das Volumen des Salzkörpers künstlich vergrößert oder verringert, mögliche Fallenpositionen für Fluide an Salzstocküberhängen sind damit jedoch eliminiert.

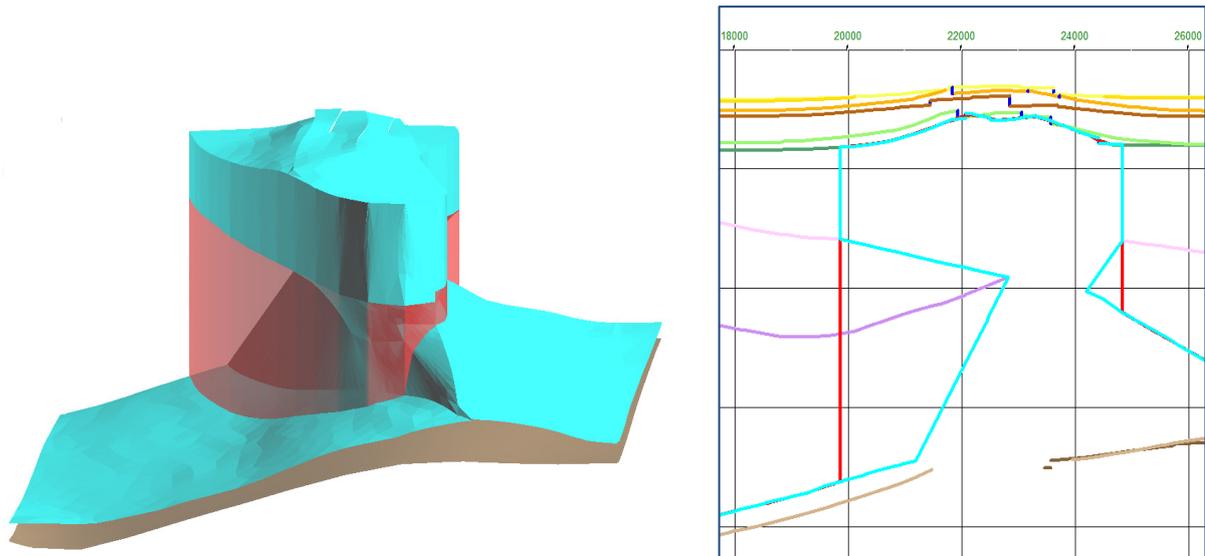


Abbildung 20: Links: Ursprüngliche Salztöpfenfläche (türkis) im GTA 3D (Bombien et al. 2012) im Bereich der Salzstruktur Delia. Rechts: Profilschnitt durch die Salzstruktur Delia. Die transparent-roten Flächen bzw. Linien deuten die generalisierte, senkrechte Salzstockflanke der Struktur an.

3.2.5 Behebung von geometrischen und geologischen Inkonsistenzen

Überschneidungen treten gerade bei geringmächtigen Horizonten der gegebenen Horizontflächen auf (s. Kapitel 2.3). Grundsätzlich wurden diese durch Annahmen von Mindestmächtigkeiten in definierten Regionen lokal behoben. GOCAD bietet für diese Problematiken praktische Hilfsmittel wie beispielsweise das „Remove-Crossovers“-Tool. Dort werden der Problem-, der Referenz-Horizont und eine Mindestmächtigkeit angegeben. Es gibt die Möglichkeit, die Überschneidung nur mit Versatz der Stützpunkte entlang der z-Achse zu korrigieren oder ebenfalls den DSI-Algorithmus unterstützend anzuwenden. Besonders betroffen von geometrischen Inkonsistenzen sind die Horizontflächen des Zechstein, der Kreide und des Tertiär (**Abbildung 21**).

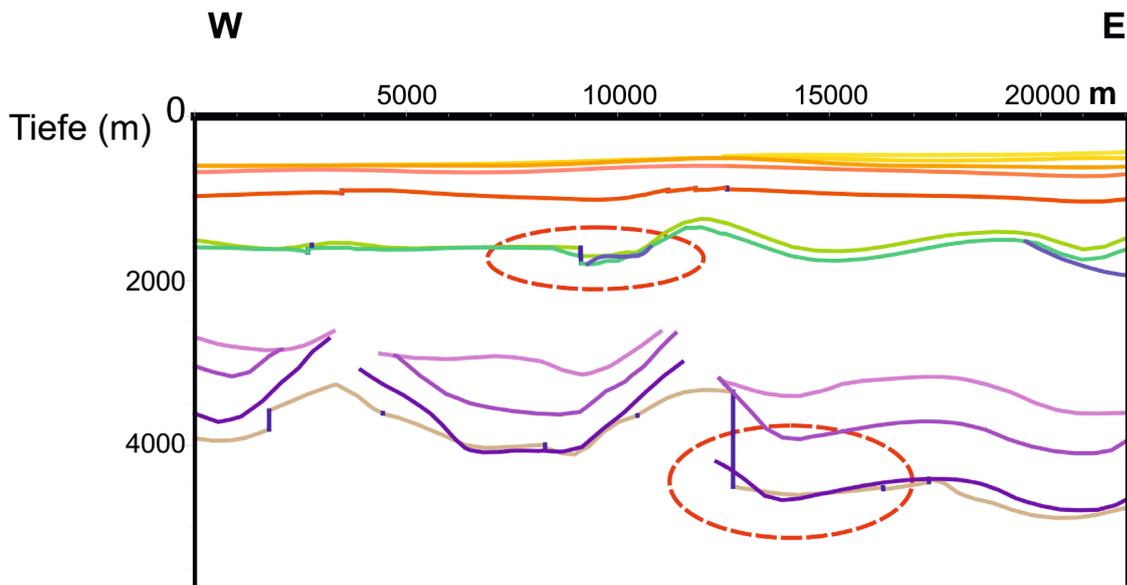


Abbildung 21: W-E-Profilschnitt aus dem GTA 3D, blaue Linien zeigen modellierte Störungsversätze an, farbige Linien stellen die Horizontbasisverläufe dar. Die rot-gestrichelt umrandeten Bereiche betonen exemplarisch Bereiche mit Horizontüberschneidungen im Zechstein (unterer Kreis) und in der Unterkreide (oberer Kreis).

Die markantesten Überschneidungen der Zechstein-Topfläche mit der Zechstein-Basisfläche treten unterhalb von Salzstruktur-Randsenken im Süden des Modellgebietes auf. Bei den Schichtflächen der Kreide (Basisfläche Unterkreide und Basisfläche Oberkreide) und des Tertiär häufen sich Überschneidungen im Hangendbereich von Salzstrukturen, meist im Zusammenhang mit Scheitelstörungssystemen. Die Karten der Horizontbasisflächen des GTA weisen für die Tiefenangaben einen Konturlinien-Abstand von 100 m auf. Der Bereich zwischen zwei Konturlinien bleibt dementsprechend undefiniert. Dort bestehen in der Tiefenskala Abweichungen von bis zu 99 m. Detailliertere Tiefenverläufe insbesondere in stark gestörten Bereichen werden auf diesem Wege verwischt.

Diese Informationen wurden räumlich detailgetreu umgesetzt. Bei geringmächtigen Schichten und Schichtflächen mit flacher Morphologie ergeben sich dabei weite laterale Abstände der Konturlinien. Somit entstehen Bereiche, welche bei einer räumlichen Umsetzung von 2D-Daten „gefüllt“ werden müssen, die jedoch zuvor durch die Darstellung der Kartierungsergebnisse der Arbeiten zum GTA in einer Karte bereits generalisiert wurden. Dadurch ergeben sich größere Fehlermöglichkeiten. Schichtflächen mit einer höheren Datendichte, d. h. engerem Tiefenlinien-Abstand, bieten bei der Umsetzung in 3D eine geringere Fehlerquelle. Dies könnte unter Umständen die Inkonsistenzen des GTA 3D in den Schichtbasisflächen der Kreide und des Tertiär neben weiteren Ursachen erklären.

Im Hangendbereich der Salzstrukturen wurden die Überschneidungen bei kretazischen sowie tertiären Flächen in den meisten Fällen bereits durch den Einbau des Störungsmodells behoben (Kapitel 3.2.3). Derartige Inkonsistenzen, sofern sie nicht bereits durch den Störungseinbau korrigiert wurden, konnten separat und lokal behoben werden. Dabei wurde basierend auf Bohrdaten eine Mindestmächtigkeit der Unterkreide von 40 bis 50 m angenommen (**Tabelle 2**). Die Mindestmächtigkeiten wurden für die einzelnen Einheiten auf Basis von Bohrungskorrelationen in Verbindung mit den seismischen Profilen festgelegt. GOCAD bietet mit der Funktion „*Remove Crossovers*“ ein praktisches und in der Anwendung einfaches Werkzeug zur Behebungen solcher Inkonsistenzen.

Tabelle 2: Auflistung der verwendeten Mindestmächtigkeiten zur lokalen Behebung von Flächenüberschneidungen

Epoche	Betroffene Fläche	Referenzfläche	Mindestmächtigkeit	Begründung
Zechstein	Zechstein-Basis	Zechstein-Top	50 m	Z1-/Z2-Karbonate und Sulfate nur bedingt mobilisierbar, somit als Restmächtigkeit des Zechstein angenommen
Unterkreide	Oberkreide-Basis	Unterkreide-Basis	40 – 50 m	Abgeleitet aus Bohrungskorrelationen und Seismik

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Modellierung der Horizontflächen

Das generierte geologische GSN-Modell umfasst zwischen der Basis Namur und der Mittel Miozän-Diskordanz 26 modellierte Horizonte (**Tabelle 3**) und 105 Störungen, 27 im Liegend- und 78 im Hangend-Zechstein-Stockwerk.

Tabelle 3: Übersicht der Horizontflächen (mit Kurzbezeichnung) des generalisierten und erweiterten Modells. Die Nummerierung in der Nomenklatur der Horizontflächen orientiert sich am GTA (Baldschuhn et al. 2001)

	Horizontfläche	Stratigraphie	Stockwerk
1	03_tmiR-q_basis	Basis Reinbeck	Hangend-Zechstein
2	04_tmiu_basis	Basis Unteres Miozän	Hangend-Zechstein
3	05_tolm+tolo_basis	Basis Oligozän	Hangend-Zechstein
4	06_teom+tolu_basis	Basis Mittleres Eozän	Hangend-Zechstein
5	07_tpao+teou_basis	Basis Oberpaläozän und Unteres Eozän	Hangend-Zechstein
6	08_kro_basis	Basis Oberkreide	Hangend-Zechstein
7	09_kru_top	Top Unterkreide	Hangend-Zechstein
8	09_kru_basis	Basis Unterkreide	Hangend-Zechstein
9	10_jo+wd_basis	Basis Oberjura und Wealden	Hangend-Zechstein
10	11_jutco+jmclo_top	Top Mitteljura (Aalenium bis Callovium)	Hangend-Zechstein
11	11_jutco+jmclo_basis	Basis Mitteljura (Aalenium bis Callovium)	Hangend-Zechstein
12	12_juhe_jutcu_top	Top Unterjura (Hetangium bis Toarcium)	Hangend-Zechstein
13	12_juhe+jutcu_basis	Basis Unterjura (Hetangium bis Toarcium)	Hangend-Zechstein
14	13_k_basis	Basis Keuper	Hangend-Zechstein
15	14_so_top	Top Oberer Buntsandstein	Hangend-Zechstein
16	14_so+m_basis	Basis Oberer Buntsandstein und Muschelkalk	Hangend-Zechstein
17	15_sm_top	Top Mittlerer Buntsandstein	Hangend-Zechstein
18	15_sm_basis	Basis Mittlerer Buntsandstein	Hangend-Zechstein
19	15_su+sm_basis	Basis Unterer Buntsandstein	Hangend-Zechstein
20	16_z_top	Top Zechstein	Zechstein
21	16_z_basis	Basis Zechstein	Zechstein
22	17_ro_top	Top Oberrotliegend	Liegend-Zechstein
23	17_ro_basis	Basis Oberrotliegend	Liegend-Zechstein
24	18_cst_basis	Basis Stefan	Liegend-Zechstein
25	19_cw_basis	Basis Westfal C	Liegend-Zechstein
26	20_cn_basis	Basis Namur	Liegend-Zechstein

Aufgrund der verschiedenen Maßstäbe der Ausgangsdaten und der Generalisierungsschritte bildet das Modell einen uneinheitlichen Detaillierungsgrad ab. Die Maßstäbe variieren zwischen 1:300.000 und 1:3.000.000 (**Tabelle 4**).

Tabelle 4: Übersicht zu den verwendeten Kartenwerken und deren Maßstäben

Kartenwerk	Maßstab
Krull (2005)	Keine Angabe
Brückner-Röhling et al. (1994)	1:500.000
Doornenbal & Stevenson (2010)	1:3.000.000
Baldschuhn et al. (2001)	1:300.000
Röhling (1988)	1:300.000

4.1.1 Modellierung der Karbon-Horizonte

Trotz der teils eingeschränkten Datengrundlage des Liegend-Zechstein-Stockwerks kann die Qualität der Ausgangsdaten für einzelne Horizonte relativ gut abgeschätzt werden. So geben die modellierten Flächen des Karbon (Brückner-Röhling et al. 1994, Krull 2005) gute bzw. konsistente Mächtigkeitstendenzen an. Jedoch zeigen sie kein detailliertes Strukturbild der einzelnen Horizonte, sondern repräsentieren jeweils eine grobe, in sich stimmige Interpretation der im deutschen Nordsee-Sektor verfügbaren Daten.

4.1.2 Modellierung der Rotliegend-Horizonte

Eine Basisfläche des vulkanoklastischen Unterrotliegend lag für die Umsetzung in das 3D Modell nicht vor. Allein aus den zehn verfügbaren Bohrungen, in denen diese Ablagerungen beschrieben wurden, kann aufgrund der nicht flächendeckenden Verbreitung keine Horizontfläche in der zentralen deutschen Nordsee abgeleitet werden. Brückner-Röhling et al. (1994) geben für diesen Horizont im Bereich der Nordsee jeweils pro Bohrung nur eine lokale Verbreitung mit einem Durchmesser von fünf Kilometern um die Bohrung herum an. Weitere Informationen zur Ausprägung werden nicht gegeben.

Die Oberrotliegendbasis des SPBA (Doornenbal & Stevenson 2010) beinhaltet im Vergleich zur Zechsteinbasis des GTA deutlich weniger Informationen über Störungszonen. Die Fläche basiert im deutschen Nordseeraum auf weniger als 40 Bohrungen. Seismikdaten sind in diese Fläche nur teilweise eingearbeitet worden. Somit beruht diese Fläche vorwiegend auf der Interpolation der Mächtigkeitsinformationen in den einzelnen Bohrlokalationen. Als Referenzhorizont wurde die Zechsteinbasis des GTA verwendet. Die Morphologie der Fläche für das Oberrotliegend ähnelt somit der Zechsteinbasis, beinhaltet als Horizont aufgrund der starken Generalisierung jedoch weit weniger Störungsinformationen.

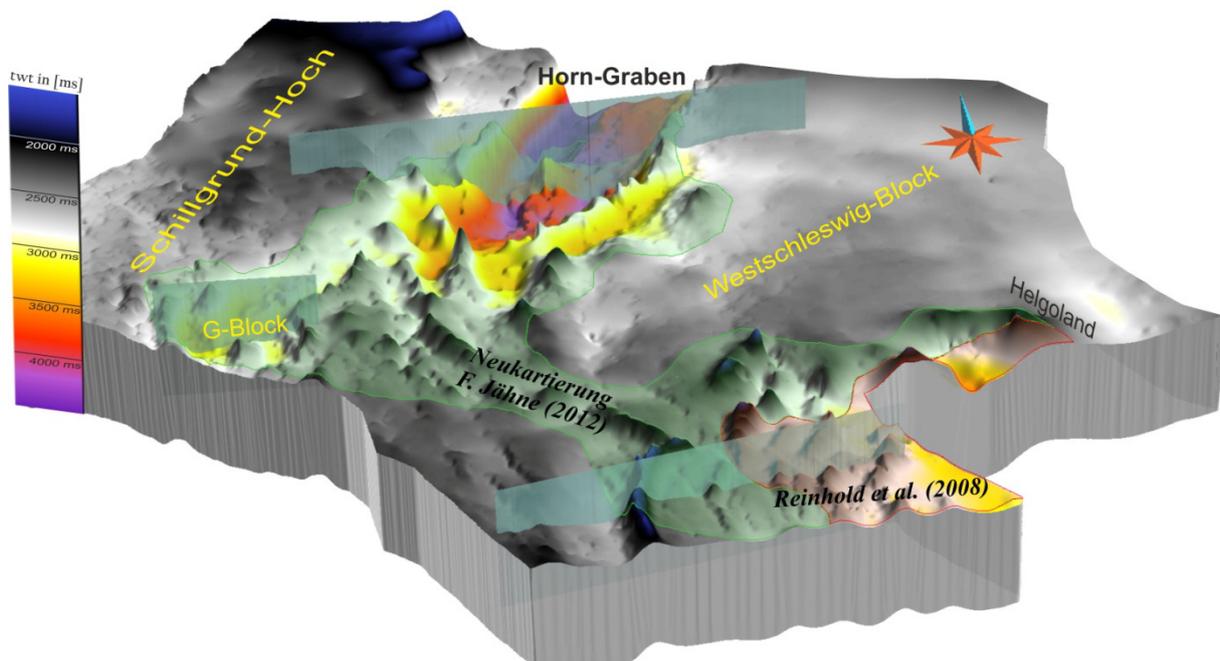


Abbildung 22: Zechstein-Basis aus Re-Interpretation von seismischen-Daten (modifiziert nach Jähne et al. 2012). Schrägansicht nach Norden auf die Basisfläche Zechstein. Grünlich gefärbter Bereich: Ausweisung eines Bereiches, in dem Rotliegend-Salinare mobilisiert wurden (nach Jähne et al. (2012)). Rotbräunliche Fläche: Ausweisung eines Bereiches nach Reinhold et al. (2008), in dem Rotliegend-Salinare mobilisiert wurden. Der Bereich mit halotektonisch mobilisierten Rotliegend-Abfolgen ist durch die erfolgte Neukartierung von Abschnitten des Rotliegendes und der Basis Zechstein im Vergleich zu den Angaben von Reinhold et al. (2008) deutlich größer gefasst.

Die halotektonische Mobilisierung der Oberrotliegendabfolgen wurde bei der Erstellung des Horizontes im SPBA nicht oder nur sehr eingeschränkt berücksichtigt (**Abbildung 22**). Das heißt, dass die Fläche der Oberrotliegendbasis im Modell, insbesondere in den Gebieten mit mobilisiertem Rotliegendesalinar, nur ungenau den realen Tiefenverlauf widerspiegelt.

4.1.3 Modellierung der Horizonte des Buntsandstein und Muschelkalk

Für die Modellierung konnten nur die veröffentlichten Horizontdaten des GTA verwendet werden. Diese bilden damit die Datengrundlage mit dem größten Kartenmaßstab und dem höchsten Detailgrad. Im GTA werden drei Horizonte der Trias dargestellt: Basis Unterer Buntsandstein (su+sm), Basis Oberer Buntsandstein (so+m) sowie Basis Keuper (**Tabelle 1**). Da das GSN-Modell auch als Grundlage für eine lithofazielle Modellierung der Ablagerungen im Buntsandstein dient, ist für dieses Intervall eine genauere stratigraphische Unterteilung erforderlich. Die Daten von Röhling (1988) bilden dafür eine gute Grundlage (s. Kapitel 2). Dieses Kartenwerk basiert auf etwa 30 Bohrungen und reflexionsseismischen Daten.

Der Bereich des Horn-Graben wurde auf Basis von Seismikdaten interpretiert, da in dieser Region keine Bohrung die Untere oder Mittlere Trias erteuft hat. Insgesamt deckt Röhling (1988) mit Ausnahme des Bereichs des Schillgrund-Hoch den gesamten zentralen deutschen Nordsee-Sektor ab. Im Nordwesten werden von Röhling (1988) keine Aussagen zur Verbreitung und Mächtigkeit gemacht, wobei laut GTA in diesem Bereich durchaus noch Buntsandstein ausgewiesen wurde. Daher beruht die Modellerstellung des GSN in diesen Regionen auf Annahmen, die jeweils zu Mächtigkeit und Verbreitung auf Basis der vorliegenden Flächen des GTA und vereinzelter Bohrungen in diesen Regionen getroffen wurden.

4.2 Modellierung von geotektonischen Strukturen

Die verwendeten Literaturdaten stellen eine gute Grundlage für die Erstellung des vereinfachten, überregionalen GSN-Modells dar. Größere Unsicherheiten aufgrund der Datenlage gibt es nur bei Horizonten des Liegend-Zechstein-Stockwerkes, insbesondere unterhalb von Salzstrukturen. Im Hangenden des Zechstein sind die Unsicherheiten im Vergleich dazu wesentlich geringer, wobei es wiederum für einzelne Regionen, beispielsweise den Horn-Graben, nur eine einzelne Bohrung als belastbare Grundlage für die stratigraphische Einordnung der seismischen Reflektoren gibt. Die Abdeckung mit seismischen Daten weist im zentralen deutschen Nordsee-Sektor Datenlücken auf, die mehrere Quadratkilometer groß sein können. Darauf beruhend ergeben sich in solchen Bereichen des generalisierten Modells größere Unsicherheiten.

Durch die beschriebene Vereinfachung der Geometrie der Diapirstrukturen wurden Überhänge entfernt und Salzstockflanken als senkrechte Umhüllende modelliert, wodurch in den meisten Fällen das Volumen dieser Strukturen vergrößert und potenzielle Speicherstrukturen an Salzstockflanken eliminiert wurden.

Die Reduzierung der Störungsinformationen auf die wichtigsten Störungssysteme im Bereich der Zechsteinbasis vergrößert das im GTA (Baldschuhn et al. 1998, Baldschuhn et al. 2001) dargestellte Strukturbild des Liegend-Zechstein-Stockwerkes. Dadurch ergeben sich Freiheitsgrade für ein einheitliches Strukturbild für alle weiteren Horizonte im Liegenden, welches nur die prägendsten Störungssysteme enthält. Im Vergleich zum Hangend-Zechstein-Stockwerk wurden im Liegend-Zechstein-Stockwerk wesentlich weniger Störungen modelliert. Dies bedeutet nicht, dass die Anzahl der Verwerfungen im Hangenden in der Realität höher ist als

im Liegenden. Dieser Effekt ist vielmehr das Resultat einer stärkeren Generalisierung des Störungsbildes im Liegend-Zechstein-Stockwerk.

Für das generalisierte Störungsmodell des GSN wurden im Hangend-Zechstein-Stockwerk einige Störungen zu einer Störungszone zusammengefasst oder, bei geringem Einfluss auf den Verlauf von Horizontflächen, entfernt. Die modellierten Störungssysteme zeigen an in welchen Bereichen des Modells eine erhöhte Verwerfungsdichte zu erwarten ist. Weitere vereinzelte, unbedeutendere Störungszonen können im Untergrund existieren, sind jedoch bisher nicht erfasst oder im Zuge der Generalisierung nicht modelliert worden. Die für das gesamte Strukturbild der Region prägendsten Störungssysteme sind erfasst und dargestellt worden.

Durch die beschriebenen Arbeitsschritte in Kapitel 3 wurden Inkonsistenzen in den Horizonten und im gesamten Modell behoben. Der Fokus dieser Arbeiten lag auf einem korrigierten und generalisierten Strukturmodell. Aus diesem Grund sind im Modell Bereiche vorhanden, welche nicht überschneidungsfrei geschlossen wurden.

4.3 Mögliche Weiterverarbeitung der Daten aus GSN

Zur Weiterverarbeitung der Modelldaten ist es möglich, diese über bestimmte Exportformate von GOCAD in andere Software-Plattformen zu überführen (**Abbildung 23**). Petrel (v.2012.4; Schlumberger®) bietet die Option das GOCAD-eigene Format „-ts“ einzulesen und weiterzuverarbeiten. Hingegen funktioniert der Datenimport sowie -export zwischen PetroMod und GOCAD über ASCII-Formate. Für eine weitere Ausarbeitung der Daten mit ArcGIS ist ein Export in CAD-Formaten (vorzugsweise „-dxf“) zu empfehlen. In GOCAD gibt es die Möglichkeit, Shape-Dateien aus ArcGIS zu importieren. Bei allen Import-Export-Vorgängen werden die grundsätzlichen Eigenschaften der Objekte übernommen. In GOCAD angelegte programmspezifische Optionen, wie beispielsweise manuell definierte Regionen, können nur über Umwege exportiert werden. „-ts“-Dateien, welche diese Regionen beinhalten, können in Petrel nicht eingelesen werden. Derzeit (Version 2012.2) können diese Dateiformate in PetroMod zwar importiert, aber nicht modifiziert werden.

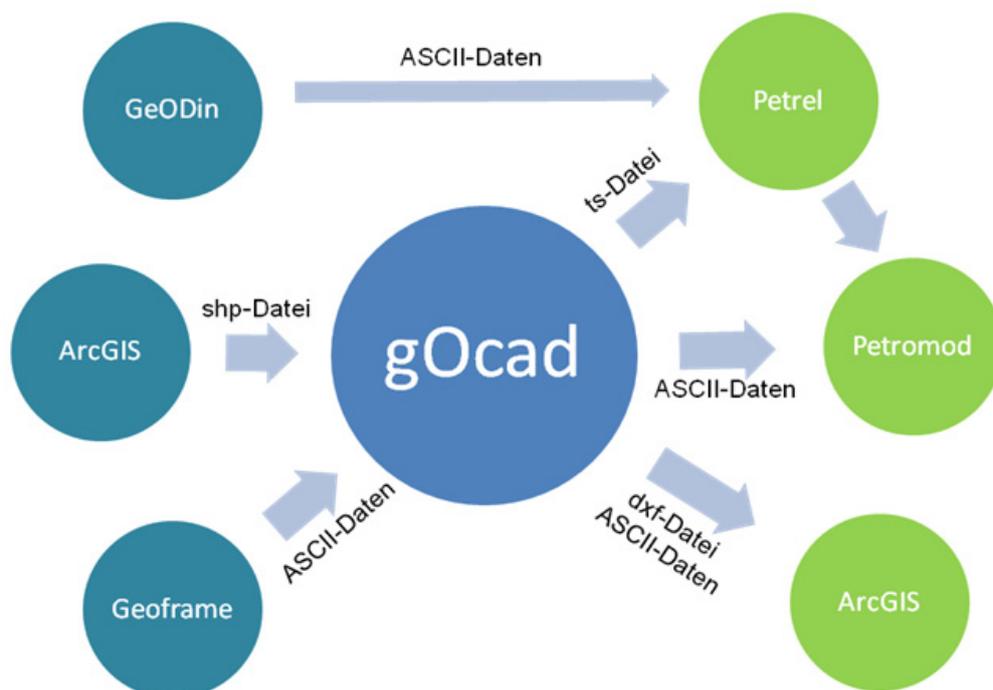


Abbildung 23: Datenaustauschmöglichkeiten der Modelldaten und deren Ausgangsdaten.

5. Fazit

Durch den beschriebenen optimierten Bearbeitungsworkflow wurde eine generalisierte und von (nahezu allen) Inkonsistenzen bereinigte Grundlage für weitergehende Modellierungen im Bereich des zentralen deutschen Nordsee-Sektors geschaffen (**Abbildung 24**).

Das geologische GSN-Modell umfasst neben den Horizonten (Namur bis zur Mittel-Miozän-Diskordanz) ein vereinfachtes Strukturmodell. Dieses wurde in drei tektonische Stockwerke unterteilt: Liegend-Zechstein, Zechstein sowie Hangend-Zechstein. Das generierte Modell kann ohne aufwendige Schritte in ein Volumenmodell auf unterschiedlichen Softwareplattformen, wie beispielsweise Petrel oder Petromod, umgesetzt werden. Zudem besteht die Möglichkeit, bei zusätzlicher Datenverfügbarkeit weitere Horizonte zu integrieren. Ein Beispiel dafür wären noch nicht digital aufbereitete Mächtigkeitskarten, z. B. die des Rhatkeuper aus Baldschuh et al. 2001).

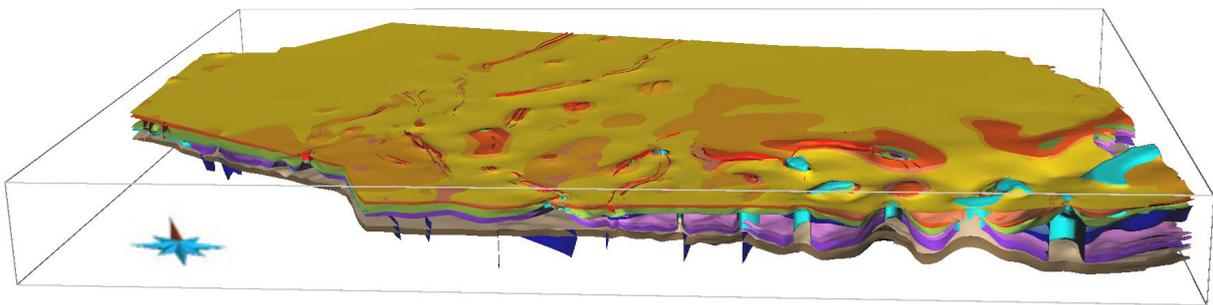


Abbildung 24: Übersicht über das GSN-Modell. Das Modell wurde von Süden her angeschnitten.

6. Literaturverzeichnis

- Arfai, J., Jähne, F., Lutz, R., Reinhardt, L., Thöle, H. & Wirth, H. (2011): Datengrundlage, Arbeitskonzepte und erste vorläufige Ergebnisse zum Projekt Geopotenzial Deutsche Nordsee (2009-2010). – 147 S., Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S. & Kockel, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. – Geologisches Jahrbuch, **Reihe A 153**: 1-88.
- Baldschuhn, R., Frisch, U. & Kockel, F. (1998): Der Salzkeil, ein strukturelles Requisit der saxonischen Tektonik. – Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, **149** (1): 59-69.
- Bombien, H., Hoffers, B., Breuckmann, S., Helms, M., Lademann, K., Lange, M., Oelrich, A., Reimann, R., Rienäcker, J. & Schmidt, K. (2012): Der Geotektonische Atlas von Niedersachsen und dem deutschen Nordseesektor als geologisches 3D-Modell. – GMIT, **48**: 6-13.
- Brückner-Röhling, S. (1999): Sequenzstratigraphie des Mittleren Muschelkalks in Norddeutschland und der Deutschen Nordsee. – 16 S., Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- Brückner-Röhling, S., Hoffmann, N., Koch, J., Kockel, F. & Krull, P. (1994): Tiefengas: Kohlenstoff-Potential im Präwestfal des NW-deutschen Beckens [sowie] Erdgaspotential im Prä-Westfal der NE-deutschen Senke: Struktur-, Mächtigkeits- und Inkohlungskarten des norddeutschen Oberkarbon- und Permbeckens und seiner Ränder 1:500 000. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- Doornenbal, J. C. & Stevenson, A. G. [Hrsg.] (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area. – 341 S.; Houten (EAGE Publications b.v.).
- Jähne, F., Bebiolka, A., Arfai, J. & Lutz, R. (2012): Deformation of Rotliegend "salt formations" and their influence on the structural pattern in the German North Sea. – GeoHannover 2012, GeoRohstoffe für das 21. Jahrhundert, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, **80**: 521.
- Kockel, F. (1995): Structural and palaeogeographical development of the German North Sea sector. – Beiträge zur regionalen Geologie der Erde. – 96 S.; Stuttgart (Gebrüder Bornträger).
- Krull, P. (2005): Stratigraphie von Deutschland V: Das Oberkarbon (Pennsylvanien) in Deutschland. – Courier Forschungsinstitut Senckenberg, **254**: 13-24.
- Mallet, J.-L. (1997): Discrete modeling for natural objects. – Mathematical geology, **29** (2): 199-219.
- Reinhold, K., Krull, P. & Kockel, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands 1:500 000. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Berlin/Hannover.
- Reinhold, K., & Müller, C. (2011): Speicherpotenziale im tieferen Untergrund-Übersicht und Ergebnisse zum Projekt Speicher-Kataster Deutschland. – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, **74**: 9-27.
- Röhling, H. G. (1988): Paläogeographie des Unteren und Mittleren Buntsandsteins im Nordwestdeutschen Becken. BMFT-Förderungsvorhaben Nr. 03E 6336 A. – 107 S., Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.

7. Abkürzungsverzeichnis

AWZ	Ausschließliche Wirtschaftszone
DSI	„Discrete smooth interpolation“-Algorithmus (GOCAD)
GPDN	Projekt Geopotenzial Deutsche Nordsee (www.gpdn.de)
GSN	Generalisiertes, erweitertes Strukturmodell des zentralen deutschen Nordsee-Sektors
GTA	Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor.
GTA 3D	Der Geotektonische Atlas von Niedersachsen und dem deutschen Nordseesektor als geologisches 3D-Modell
SPBA	Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area
TVDSS	True vertical depth subsea. Tiefenlage unter dem Meeresspiegel.
WGS	World Geodetic System

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über das Modellgebiet im deutschen Nordsee-Sektor (rot umrandet). Die Grenzen der strukturellen Einheiten im Arbeitsgebiet sind dargestellt.	2
Abbildung 2: Mächtigkeitsverteilung des Namur nach Krull (2005).....	4
Abbildung 3: NE-SW-Profilschnitt aus dem Modell des GTA 3D. Blau: Senkrecht modellierten Störungsflächen. Weitere farbliche Linien markieren den Verlauf der Horizontflächen (Bombien et al. 2012).	5
Abbildung 4: E-W-Profilschnitt im Modell des GTA 3D mit Horizontverläufen, blaue Linien stellen vertikal modellierte Störungsflächen dar; der rote Kreis markiert einen Bereich mit markanter Überschneidung der Horizontverläufe (Bombien et al. 2012).....	7
Abbildung 5: Vergleich vom GTA 3D mit dem generalisierten und erweiterten Modell anhand eines W-E-Profilschnittes. Vertikale blaue Linien im oberen Profil und rote Linien im unteren Profil markieren modellierte Störungsverläufe. Unteres Profil ergänzt durch Rotliegend und Karbon.....	8
Abbildung 6: Ein W-E-Profilschnitt durch eine Salzstruktur visualisiert die vorgenommene Stockwerkseinteilung. Braun = Liegend-Zechstein-Stockwerk, türkis = Zechstein-Stockwerk, violett = Hangend-Zechstein-Stockwerk, blaue Linien = Störungsverläufe im Liegend-Zechstein-Stockwerk, rote Linien = Störungsverläufe im Hangend-Zechstein-Stockwerk, Basement definiert Prä-Karbon Abfolgen, die nicht im Modell berücksichtigt wurden.	9
Abbildung 7: Interpretation einer seismischen 2D-Linie nördlich der ostfriesischen Inseln. Das Profil gibt einen Überblick über die Störungsmuster im Oberen Rotliegend und im Prä-Perm-Grundgebirge. Eine Aussage über das genaue Einfallen der Störungen ist auf Basis der zugrundeliegenden groben Tiefenwandlung des Profils nur bedingt möglich. Insbesondere unterhalb von Salzstrukturen wurden vorhandene „ <i>velocity pull-ups</i> “ nur teilweise herausgerechnet. Die Mächtigkeitsschwankungen in den Oberrotliegend-Abfolgen lassen sich durch die halotektonische Mobilisierung der Rotliegend-Salinare erklären (Jähne et al. 2012).....	10
Abbildung 8: W-E-Profilschnitt des generalisierten Modells im Bereich der südlichen deutschen Nordsee. Die blauen Linien zeigen Störungsverläufe im Perm, Karbon und dem restlichen Grundgebirge, die mit einem steilen Einfallen und ohne bevorzugte Vergenz modelliert wurden.	10
Abbildung 9: NWW-SEE-Profilschnitt im generalisierten Modell senkrecht zur Streichrichtung des Horn-Graben. Die Störung versetzt das Zechstein-Salinar.	11
Abbildung 10: Horizontflächen (türkis =Top-Zechsteinsalz, beige = Basis Zechstein) im Bereich einer Salzstruktur mit zwei generalisierten Störungen des Hangend-Zechstein-Stockwerkes, die bis an das Top des „Zechstein Stockwerkes“ modelliert wurden.....	12
Abbildung 11: Exemplarische Darstellung einer Horizontfläche mit modelliertem Störungsausbiss. Kriterien zur Berücksichtigung von Störungen im Modell sind: >100 m vertikaler Versatz der Horizontfläche und > 5 km laterale Versatzlänge.	13
Abbildung 12: Vergleich des Dreiecksnetzes vor und nach der Punkte-Dezimierung bei Erhalt der morphologisch prägendsten Strukturen. Links vor und rechts nach der Modifikation. Durch den Vorgang wird die homogene Maschung in eine heterogene geändert.....	14
Abbildung 13: NE-SW-Profil aus dem Modell des GTA 3D senkrecht zu einer Störung. Blaue Linien zeigen die modellierten Versätze im ursprünglichen Modell. Die rote Linie zeigt den Verlauf der generalisierten Störung.....	15
Abbildung 14: Senkrecht zur Störung erstellte Profilschnitte zur Interpretation. Als Bezug ist die Zechstein-Basisfläche des GTA 3D eingeblendet.....	16
Abbildung 15: „ <i>fault stick</i> “ – Interpretation einer Störung. Die einzelnen „ <i>fault sticks</i> “ wurden in einer Profilsicht des GTA 3D interpretiert.....	17

Abbildung 16: Aus den „ <i>fault sticks</i> “ modellierte Störungsfläche.	17
Abbildung 17: Modellierte Störungsfläche in Kontakt zur gestörten Zechstein-Basisfläche im Bereich des Horn-Graben.....	18
Abbildung 18: Drei modellierte Störungsflächen in Bezug zu Horizontbasisflächen des Oberen und des Unteren/ Mittleren Buntsandstein. Rote Lineare deuten den konsistent modellierten Störungs-Störungs-Kontakt an. Gelbe Lineare visualisieren Störungs-Horizont-Kontakte.....	18
Abbildung 19: Auf eine Störungsfläche projizierte Horizontkontakte während des Arbeitsschrittes „Horizon-Fault-Contact-Modelling“ im Structural Modelling-Workflow. Durchgezogene Linien = Hangend-Kontakte, gestrichelte Linien = Liegend-Kontakte.	19
Abbildung 20: Links: Ursprüngliche Salztopfläche (türkis) im GTA 3D (Bombien et al. 2012) im Bereich der Salzstruktur Delia. Rechts: Profilschnitt durch die Salzstruktur Delia. Die transparent-roten Flächen bzw. Lineare deuten die generalisierte, senkrechte Salzstockflanke der Struktur an.....	20
Abbildung 21: W-E-Profilschnitt aus dem GTA 3D, blaue Lineare zeigen modellierte Störungsversätze an, farbige Linien stellen die Horizontbasisverläufe dar. Die rot-gestrichelt umrandeten Bereiche betonen exemplarisch Bereiche mit Horizontüberschneidungen im Zechstein (unterer Kreis) und in der Unterkreide (oberer Kreis).	20
Abbildung 22: Zechstein-Basis aus Re-Interpretation von seismischen-Daten (modifiziert nach Jähne et al. 2012). Schrägansicht nach Norden auf die Basisfläche Zechstein. Grünlich gefärbter Bereich: Ausweisung eines Bereiches, in dem Rotliegend-Salinare mobilisiert wurden (nach Jähne et al. (2012). Rotbräunliche Fläche: Ausweisung eines Bereiches nach Reinhold et al. (2008), in dem Rotliegend-Salinare mobilisiert wurden. Der Bereich mit halotektonisch mobilisierten Rotliegend-Abfolgen ist durch die erfolgte Neukartierung von Abschnitten des Rotliegenden und der Basis Zechstein im Vergleich zu den Angaben von Reinhold et al. (2008) deutlich größer gefasst.	23
Abbildung 23: Datenaustauschmöglichkeiten der Modelldaten und deren Ausgangsdaten.....	25
Abbildung 24: Übersicht über das GSN-Modell. Das Modell wurde von Süden her angeschnitten.	26

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Für das Modell verwendete Daten- und Literaturquellen	3
Tabelle 2: Auflistung der verwendeten Mindestmächtigkeiten zur lokalen Behebung von Flächenüberschneidungen	21
Tabelle 3: Übersicht der Horizontflächen (mit Kurzbezeichnung) des generalisierten und erweiterten Modells. Die Nummerierung in der Nomenklatur der Horizontflächen orientiert sich am GTA (Baldschuh et al. 2001)	22
Tabelle 4: Übersicht zu den verwendeten Kartenwerken und deren Maßstäben	22