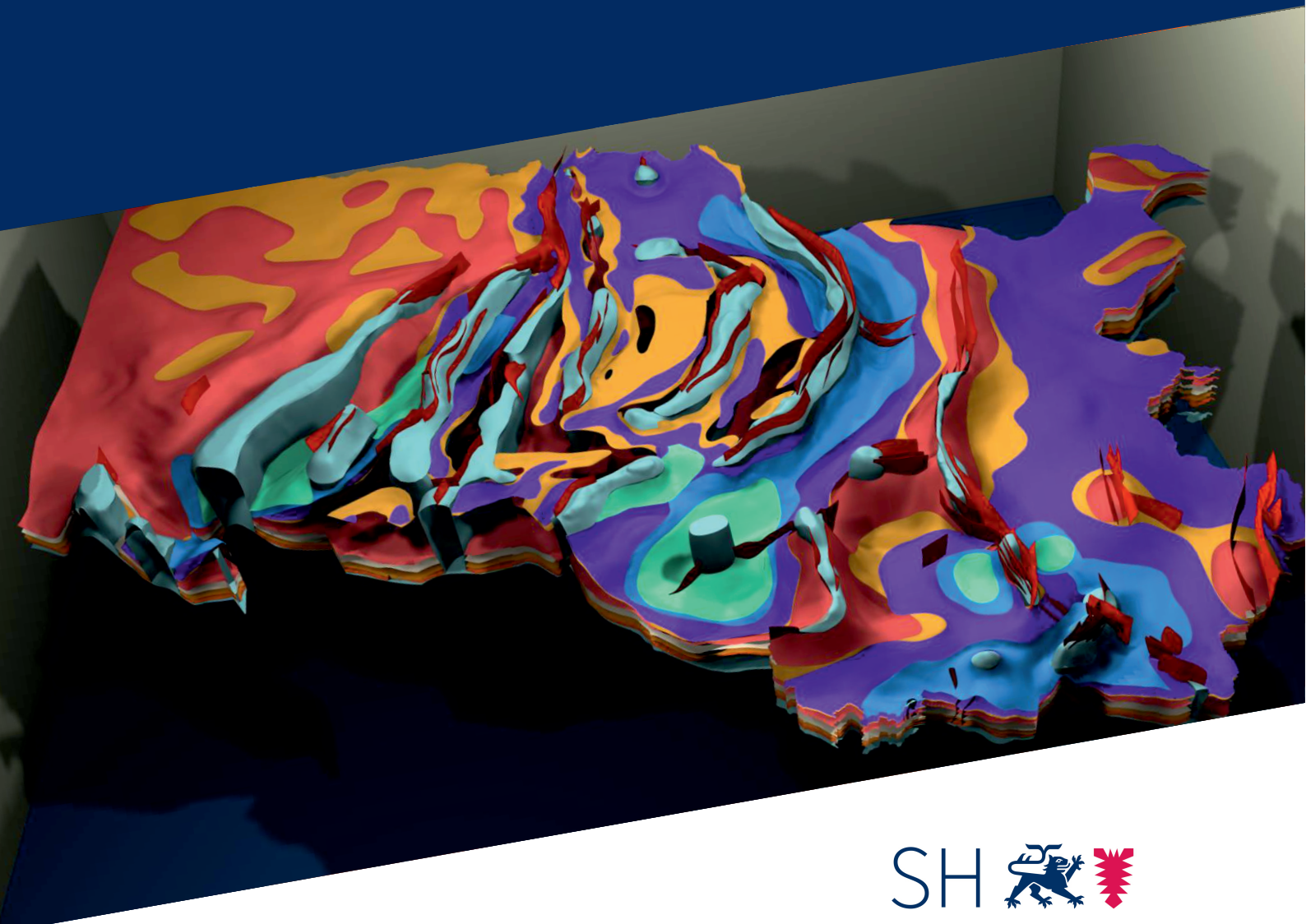


Potenziale des unterirdischen Speicher- und Wirtschaftsraumes im Norddeutschen Becken (TUNB)

Teilprojekt 1 Schleswig-Holstein und Hamburg

Abschlussbericht



Schleswig-Holstein
Landesamt für
Landwirtschaft, Umwelt
und ländliche Räume
Geologischer Dienst

Potenziale des unterirdischen Speicher- und Wirtschaftsraumes im Norddeutschen Becken (TUNB)

Teilprojekt 1 Schleswig-Holstein und Hamburg

Abschlussbericht

Geologischer Dienst im Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume
Schleswig-Holstein (LLUR)

Bearbeiter: Thomas Liebsch-Dörschner, Laura Dzieran, Fabian Hese, Katrin
Lademann, Petra Offermann

Berichtsdatum: 04.11.2020

Inhaltsverzeichnis

1	Geologischer Rahmen.....	5
2	Datengrundlage.....	7
2.1	Koordinatensystem.....	7
2.2	Topographische Grundlagen	7
2.3	Bohrungen – oberflächennaher Untergrund	7
2.4	Bohrungen – tiefer Untergrund	8
2.5	Seismik	9
2.6	Geotektonischer Atlas von NW-Deutschland	10
2.7	Geologische 3D-Modelle	11
2.8	Weitere Daten von Projekten / Institutionen.....	11
3	Methodik	11
3.1	Kachelung	11
3.2	Datenaufbereitung GTA	12
3.3	Datenaufbereitung Bohrungen	13
3.4	Datenaufbereitung Seismikdaten.....	16
3.5	GTA Geschwindigkeitsmodell – Jaritz	17
3.6	Seismikinterpretation.....	19
3.7	Modellierprozesse	23
3.8	Grenzharmonisierung.....	29
4	Ergebnisse und Auswertung.....	30
4.1	Modellbestandteile	33
4.2	Statistische Auswertungen	42
4.3	Probleme, Unsicherheiten, Diskrepanzen.....	46
4.4	Fazit - Résumé.....	48
5	Parametrisierung – seismische Geschwindigkeit.....	50
6	Literaturverzeichnis	51

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Strukturdomänen des Norddeutschen Beckens in Schleswig-Holstein und Hamburg (LLUR SH 2020, Baldschuhn et al. 2001). Basis Buntsandstein, Störungsverläufe und Profil: Geologisches 3D-Modell 2020 (TUNB, TP1), Salzdiapire und Mauern: BGR (Reinhold et al. 2008).	6
Abb. 2: Tiefbohrungen im Projektgebiet TP1 SH/HH (Blau: intrusive Salzstrukturen Perm, BGR 2008).	8
Abb. 3: Seismische Profile im Projektgebiet TP1 SH/HH (Blau: intrusive Salzstrukturen Perm, BGR 2008).	9
Abb. 4: Arbeitsgebiete des Teilprojektes 1 (SH / HH).	12
Abb. 5: Gebiete der rekonstruierten GTA-Geschwindigkeitsmodelle (rot), Arbeitsgebiete des TUNB Teilprojektes 1 (blau).	17
Abb. 6: Rekonstruktion des GTA-Geschwindigkeitsmodells. Es wurden kartierte Anfangsgeschwindigkeiten und Gradienten in Model3D Schichtkörpern definiert und die Intervallgeschwindigkeit mittels angegebener Beziehung berechnet. Die Werte wurden im letzten Schritt auf 3D-Voxets übertragen.	18
Abb. 7: Seismische Profile wurden mit GTA Daten und Modellen in der Zeit Domäne verglichen (blau und grün), lokal wurden Auswertungen für die Modellierung verwendet (grün).	19
Abb. 8: Strukturübersicht und interpretierte seismische Profile (grün). In den gelb markierten Bereichen wurden seismische Interpretationen in die Modellierung einbezogen.	20
Abb. 9: Stratigraphische Übersicht der TUNB Horizonte.	24
Abb. 10 (aus Thomsen et al. 2017): Links: Ausschnitt der Basisfläche O. Buntsandstein aus dem Basismodell SH (GTA3D) zur Darstellung der Störungsspuren. Die Lücken zwischen den Kontakten an Störungen wurden durch vertikale Flächen geschlossen (grau) und fault center lines erzeugt (schwarze Linien). Rechts: Ausschnitt eines Scans des GTA Tiefenlinienplans O. Buntsandstein. Dargestellt sind Tiefenlinien, Störungsspuren sowie Sattel- und Muldenachsen.	25
Abb. 11 (aus Thomsen et al. 2017): Links: Darstellung von Störungen in einem geologischen Profil des GTA 1.100.000. Rechts: Zum Vergleich - vertikaler Schnitt des Basismodells SH (GTA3D). Die direkte Verbindung der Störungsspuren (schwarze Punkte, rote Linien; Plön-Segeberg Störungszone) führt zu unrealistischen Geometrien.	26
Abb. 12: Störungsspuren des GTA (farbkodiert nach Tiefe) und Störungsflächen des TUNB Modells (beige). Die Basis Buntsandstein (orange) und Hüllflächen der Salzstrukturen (blau) dienen der strukturellen Orientierung. Unten links: Störungsflächen im Dachbereich der Salzstrukturen wurden auf Grundlage der GTA Störungsspuren modelliert. Unten rechts: In diesem Gebiet erfolgte eine Re-Interpretation von seismischen Profilen (Strukturen im S und E), Störungsspuren des GTA wurden zum Teil verworfen.	27
Abb. 13 (aus Thomsen et al. 2017): Links/Mitte: Prinzipielle Darstellung der Einzelkomponenten des Modells der Salzstruktur Waabs-Moenkloh (Strukturmodell SH 2016, Versätze an Störungen sind im TUNB Modell enthalten). Rechts: Hüllfläche der Salzstruktur Waabs-Moenkloh, Bohrungen und Salzstock - Verbreitungslinien aus dem GTA (Schwarz).	28
Abb. 14: Geologisches 3D-Modell SH / HH. Basis Zechstein, U. Buntsandstein, Salzstrukturen und Störungen (vert. Überhöhung: x3).	31
Abb. 15: Geologisches 3D-Modell SH / HH. Basis Zechstein bis Basis O. Jura, Salzstrukturen und Störungen (vert. Überhöhung: x3).	31

Abb. 16: Geologisches 3D-Modell SH / HH. Basis Zechstein bis Basis U. Kreide, Salzstrukturen und Störungen (vert. Überhöhung: x3).	32
Abb. 17: Geologisches 3D-Modell SH / HH. Basis Zechstein bis Basis M. Oligozän, Salzstrukturen und Störungen (vert. Überhöhung: x3).	32
Abb. 18: Basis Zechstein (hellblau), U. Buntsandstein (orange), Salzmauern und Diapire des Perm (blau) sowie Störungsflächen (rot) des 3D-Modells (Überhöhung x3).	34
Abb. 19: Top Perm (Basis Buntsandstein und Hüllflächen der Salzstrukturen, beige) und Basis Zechstein (hellblau) des Geologischen 3D-Modells SH/HH. Zur Visualisierung des Modells wurde die 3D Raytracing- und Animations-Software Blender verwendet (www.blender.org).	36
Abb. 20: Tertiäre Modellflächen Basis O. Paläozän (gelb), M. Oligozän (braun), U. Miozän (grün), M. Miozän (grau) und Quartär (halbtransparent). Unten: Ausschnittsvergrößerung des östlichen Teils des Modellgebietes. Tertiäre Modellflächen mit KW-Bohrungen (Bohrtürme) und Bohrmarkern von Hydrobohrungen.	37
Abb. 21: Modellflächen des Jura (violett, mittelblau, cyan), Salzstrukturen, Störungsflächen und KW-Bohrungen im Bereich des Ostholstein Troges (Basis Buntsandstein im Hintergrund hellorange).	39
Abb. 22: Vergleiche zwischen GTA Daten (GTA3D Modellflächen) und dem TUNB Modell.	41
Abb. 23: Abstände zwischen Bohrmarkern und entsprechenden lithostratigraphischen Grenzflächen des TUNB Modells (TP1) und GTA Modells (Wertebereich der X-Achse: 0 – 200 m). Basis ToIM bis Basis JM.	43
Abb. 24: Abstände zwischen Bohrmarkern und entsprechenden lithostratigraphischen Grenzflächen des TUNB Modells (TP1) und GTA Modells (Wertebereich der X-Achse: 0 – 200 m). Basis JU bis Basis SU.	44
Abb. 25: Aus Top und Basis Zechsteins wurde ein Hüllkörper des Zechsteins konstruiert und das Volumen berechnet (Oben, farbkodiert nach Tiefe). Aus Volumen und Grundfläche ergibt sich eine söhlige Mächtigkeit von etwa 1100 m (Unten).	45
Abb. 26: Seismisches Profil (nicht migriert, Zeit-Domäne) und Anschnitt des 3D Modells im Bereich des Hamburger Troges (Salzstruktur Elmshorn). Die Tiefen-Zeit Konvertierung des Modells erfolgte mit dem GTA-Geschwindigkeitsmodell.	47
Abb. 27: Geologisches 3D-Modell SH / HH (TUNB-TP1). Die Visualisierung des Modells erfolgte mit der 3D Raytracing- und Animations-Software Blender (www.blender.org).	49

Teilprojekt 1 Schleswig-Holstein und Hamburg

1 Geologischer Rahmen

Der Untergrund von Schleswig-Holstein und Hamburg wird durch den Westschleswig-Block im Westen, der weit in den deutschen Nordseesektor hineinreicht, dem Ostholstein-Westmecklenburg-Block im Osten und dem Glückstadt-Graben im Zentrum gegliedert (Abb. 1). Die beiden Blöcke sind nicht durch interne Sockelstörungen differenziert und es herrschen überwiegend söhlige Lagerungsverhältnisse. Die Blöcke und der Graben werden durch das Ringkøbing-Fyn-Hoch im Norden und durch den Pompeckj-Block in Niedersachsen im Süden begrenzt. Der Glückstadt-Graben ist eines der tiefsten post-permischen Strukturen des Norddeutschen Beckens mit Sedimentmächtigkeiten von bis zu 11 km (Baldschuhn et al. 2001, Maystrenko et al. 2005, Littke et al. 2008, Warsitzka et al. 2016). Der NNE-SSW streichende Glückstadt-Graben zeigt durch die Differenzierung in verschiedene Tröge und das Auftreten von tiefreichenden Störungszonen und Salzdiapiren eine komplexe strukturgeologische Entwicklung.

Innerhalb des Meso- und Känozoikums werden NNE bis N bzw. NNW verlaufende Strukturelemente von W-E bis NW-SE streichenden Störungen gequert (Baldschuhn et al. 2001). Die meisten der tiefreichenden Störungen in Schleswig-Holstein orientieren sich an dem Hauptstörungssystem im prä-salinaren Sockel (Baldschuhn et al. 2001, Maystrenko et al. 2005), die in der geologischen Entwicklungsgeschichte durch das richtungsändernde regionale Stressfeld mehrfach reaktiviert worden sind und Einfluss auf die Salzstrukturentwicklung des Glückstadt-Grabens hatten.

Der Glückstadt-Graben wurde vermutlich schon im Rotliegend und Zechstein angelegt (Kockel 1998). Die erste bedeutende Rifting Phase erfolgte im Mittleren Buntsandstein (vor allem Detfurth- und Hardeggen-Folge, Kockel 1998). In einem W-E gerichteten, extensionalen Spannungsfeld bildeten sich Störungszonen und es kam zu verstärkter Subsidenz im zentralen innersten Bereich des Grabens (Baldschuhn et al. 2001, Warsitzka et al. 2016). Erneute starke W-E gerichtete transtensionale Bewegungen und verstärkte Subsidenz setzten im Unteren Gipskeuper ein und hielten bis in den Steinmergelkeuper an (Kockel 1998), hierbei weitete sich der Graben. Störungszonen bildeten sich bevorzugt über aktiven Sockelstörungen und bildeten Schwächezonen, in die das vorher schon mobilisierte Zechstein- und zum Teil Rotliegend-Salinar eindrang. Kissenbildung in der frühen Trias und der im Keuper einsetzende Diapirismus (Baldschuhn et al. 2001, Doornenbal et al. 2010) führten zur Entstehung von primären und später sekundären Randsenken, die den Sedimentationsraum differenzierten und laterale Bewegungen des Perm-Salzes zusätzlich verstärkten. Die Bildung der Salzdiapire wurde von tektonischen Prozessen beeinflusst und erfolgte zunächst im zentralen Teil des Glückstadt-Grabens und setzte sich dann von innen nach außen fort (z.B. Weber 1977, Maystrenko 2005). Die Intensität der Grabenentwicklung im Keuper spiegelt sich wider in der extremen Mächtigkeitszunahme von 300 – 700 m auf den Blöcken zu maximal 5000 m im zentralen Glückstadt-Graben (Baldschuhn et al. 2001). Im Unteren und Mittleren Jura folgte eine Phase mit anhaltender Extension und Subsidenz, wobei sich die Sedimentation, auch beeinflusst durch den sich fortsetzenden Diapirismus, zunehmend in die äußeren Trog-Bereiche des Grabens verlagerte (Westholstein- und Ostholstein-Trog; Maystrenko et al. 2013, Warsitzka et al. 2016). Angrenzend an die Depozentren des Keupers bildeten sich im Zuge des jurassischen Diapirismus sekundäre Tröge (Littke et al. 2008), die wiederum Einfluss auf die Salzmobilisierung nahmen. Im späten Jura und frühen Kreide folgte im Bereich des Glückstadt-Grabens eine tiefgreifende Erosionsphase durch Hebung (Jaritz 1969, Jaritz 1980, Rodon & Littke 2005), die zur Abtragung von Sedimenten des Juras und Oberen bis Mittleren Keupers führte. In den jurassischen Randtrögen sind die Abfolgen weitgehend erhalten (Baldschuhn et al. 2001). In der Kreide setzte wieder moderate Subsidenz ein und es kam zur

flächendeckenden Ablagerung von marinen Sedimenten, die heute diskordant die triassischen und jurassischen Abfolgen abdecken. In einigen Bereichen des Norddeutschen Beckens kam es durch die alpidische Orogenese im frühen Tertiär zu Inversionstektonik (z.B. Niedersächsisches Becken). Für den Bereich des Glückstadt-Grabens existieren bisher keine Belege für kompressive Inversion, stattdessen überwog Subsidenz, die sich in den äußeren Grabenbereichen verstärkte. Im Verlaufe des Tertiärs setzte in einem WNW-ESE bis W-E gerichteten Spannungsfeld tektonische Aktivität und verstärkter Diapirismus ein (Baldschuhn et al. 2001, Maystrenko 2005, Warsitzka et al. 2016). Neben Nachbewegungen des Zechstein-Salinars und Reaktivierung von Störungen im gesamten Gebiet, entwickelten sich Salzdiapire und Störungen vor allem an den äußersten Rändern des Glückstadt-Grabens. Damit einhergehende Subsidenz führte zu der weiteren Entwicklung des Westholstein- und Ostholstein-Troges sowie des Hamburger-Troges (Baldschuhn et al. 2001).

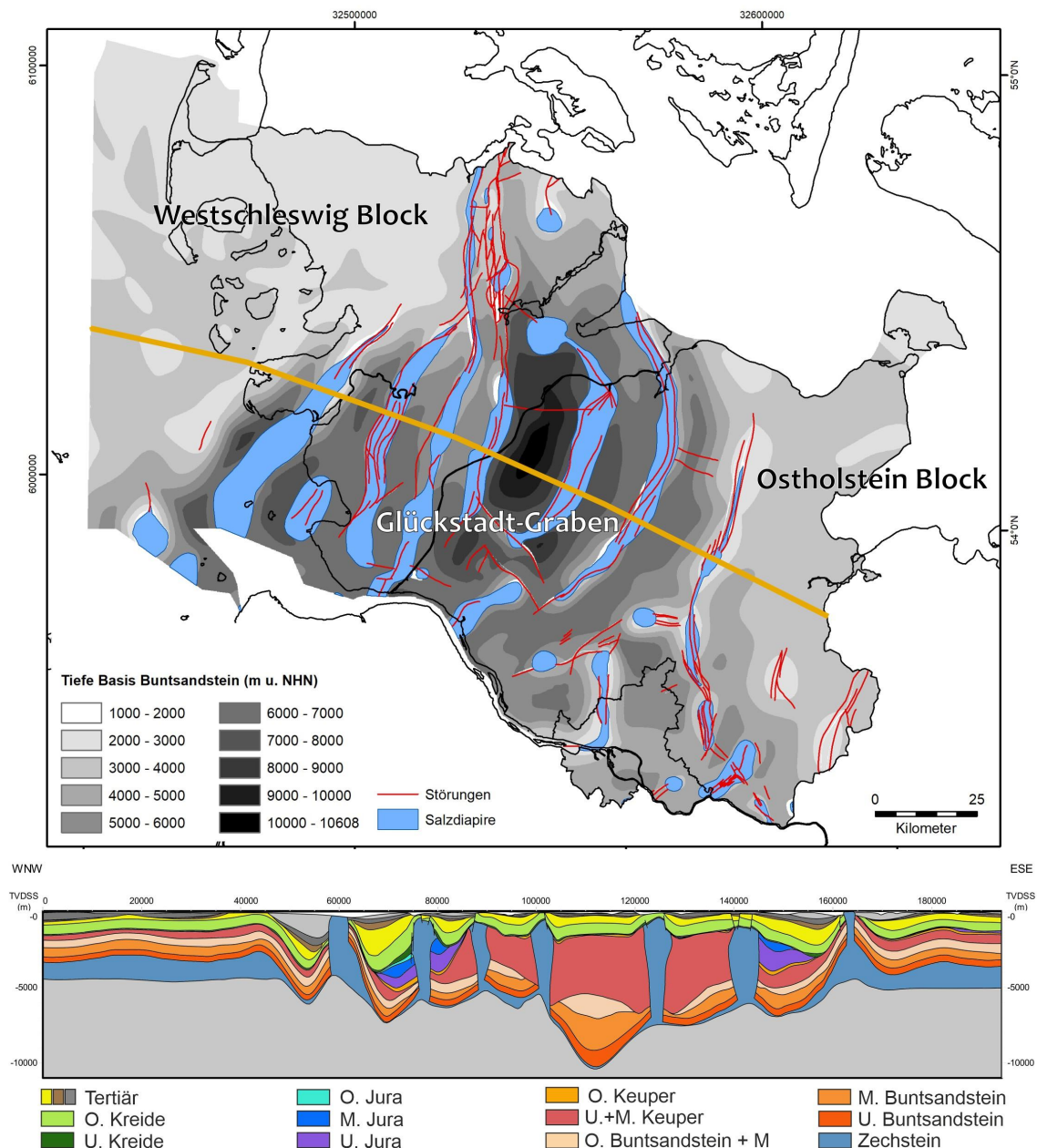


Abb. 1: Strukturdomänen des Norddeutschen Beckens in Schleswig-Holstein und Hamburg (LLUR SH 2020, Baldschuhn et al. 2001). Basis Buntsandstein, Störungsverläufe und Profil: Geologisches 3D-Modell 2020 (TUNB, TP1), Salzdiapire und Mauern: BGR (Reinhold et al. 2008).

2 Datengrundlage

2.1 Koordinatensystem

In den Landesgebieten Schleswig-Holstein und Hamburg gilt das Koordinatensystem UTM - Zone 32, Datum ETRS89, mit führender Kennziffer 32 in der X Koordinate (EPSG: 4647).

2.2 Topographische Grundlagen

Für den obersten Abschluss des 3D-Modells wird das DGM200 Geländemodell des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie verwendet. Der Datensatz besteht aus regelmäßig angeordneten Gitterpunkten, die einen Abstand von 200 x 200 m aufweisen (Genauigkeit der Lage $\pm 1 - 3$ m, Höhe: $\pm 3 - 10$ m). Die Punktdaten wurden durch direkte Triangulierung in eine triangulierte Fläche überführt. Im Offshore-Bereich entspricht die Höhe NHN.

Zur einheitlichen Abgrenzung von Modellgebieten wird der Datensatz Verwaltungsgebiete 1:250.000 (VG250) des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie verwendet.

2.3 Bohrungen – oberflächennaher Untergrund

Der Bestand an insgesamt vorhandenen Schichtenverzeichnissen von Bohrungen des Landesarchivs Schleswig-Holstein beläuft sich auf ca. 700.000, davon gut 50.000 tiefere Bohrungen aus den Bereichen Hydrogeologie und Rohstofferkundung und ca. 350.000 Baugrundbohrungen, die dem Geologischen Landesarchiv größtenteils von dritter Seite zur Verfügung gestellt worden sind.

Die rund 300.000 Flachbohrungen, die auf die Erkundung des oberflächennahen Bereichs ausgerichtet sind, stammen vor allem aus der bodenkundlichen und geologischen Landesaufnahme.

Das Bohrarchiv SH umfasst 235.231 digital erfasste Bohrungen (Stand 03/2020) aus den Fachbereichen Baugrund, Geologie, Geothermie, Lagerstätten und Hydrologie (Tab. 1). Für die Modellierung von tertiären Horizonten waren vor allem ausreichend tiefe und stratifizierte Bohrungen von Bedeutung. Für das Landesgebiet Hamburg wurden Bohrungen des Bohrarchivs Hamburg aufbereitet und verwendet.

	Anzahl	Anzahl ET > 50 m	Anzahl ET > 100 m	Anzahl ET > 200 m
Bohrungen Insgesamt	235.231	20.768	5356	1166
Bohrungen Baugrund	170.833	206	72	68
Bohrungen Geologie	3672	0	0	0
Bohrungen Geothermie	9984	9066	1168	3
Bohrungen Lagerstätten	912	50	37	8
Bohrungen Hydrologie	49.830	11.446	4079	1087

Tab. 1: Statistische Angaben zu digital erfassten Bohrungen des Bohrarchivs SH (ET: Endteufe).

2.4 Bohrungen – tiefer Untergrund

Die Kenntnis des tieferen Untergrundes von Schleswig-Holstein und Hamburg basiert auf seismischen Daten und Tiefbohrungen, die maßgeblich von der Kohlenwasserstoff-Industrie erhoben wurden. Die Bohrungen entstanden im Zeitraum 1870 bis 2020 und sind hinsichtlich Qualität, Umfang und Genauigkeit der geophysikalischen Bohrlochmessungen und Schichtenverzeichnisse aufgrund des langen Erhebungszeitraumes sehr heterogen. Im Projektgebiet (Teilprojekt 1 – SH / HH) existieren 1887 Bohrungen (Anzahl mit Ablenkungen bzw. Vertiefungen, Tab. 2, Abb. 2). Es wurden 1429 Bohrungen für die 3D-Modellierung aufbereitet und verwendet.

	Anzahl	min. Endtiefe [m]	mittl. Endtiefe [m]	max. Endtiefe [m]
SH TUNB	1484	14	1574	9275
HH TUNB	401	249	960	3305
HH Neuwerk TUNB	2	2681	2741	2800
SH HH TUNB TP1	1887	14	1445	9275

Tab. 2: Statistische Angaben zu Tiefbohrungen (Endtiefe: gemessene Tiefe = MD; KW-Datenbank der Länder, Anzahl inkl. Vertiefungen oder Ablenkungen).

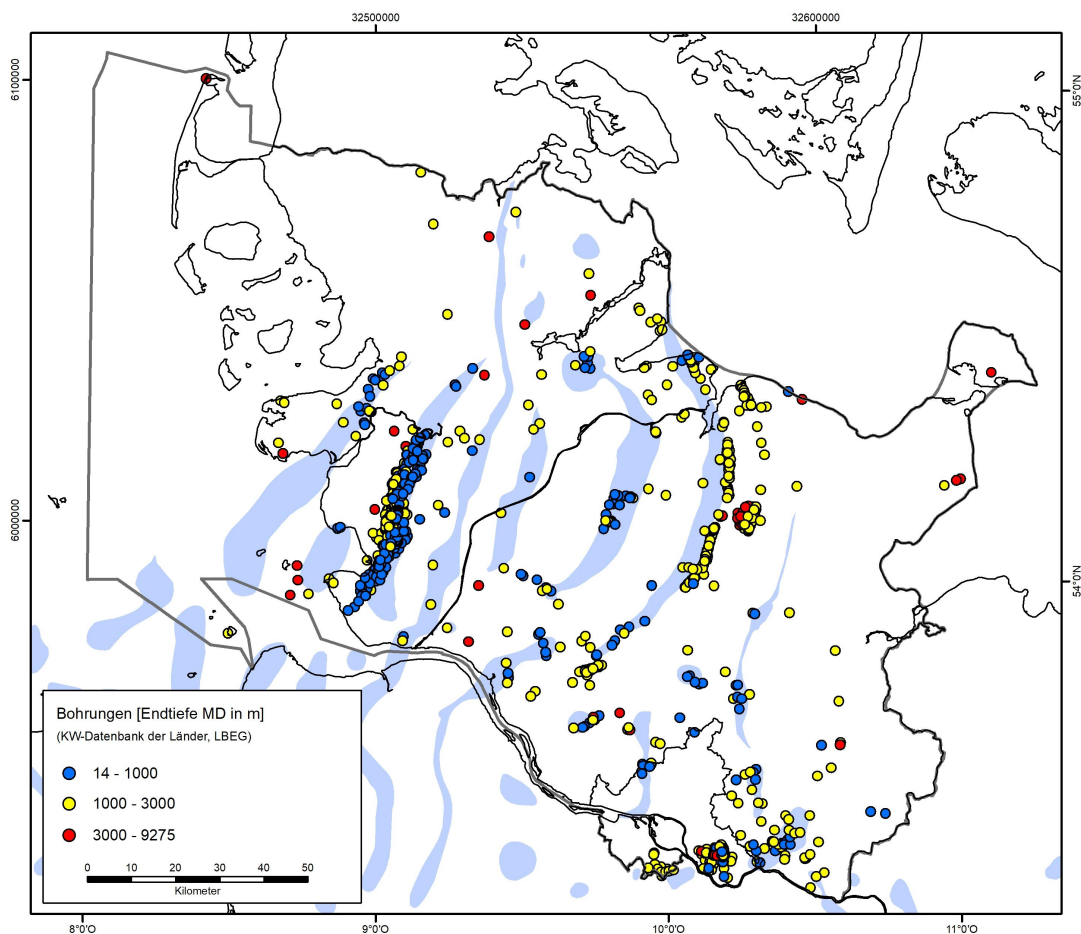


Abb. 2: Tiefbohrungen im Projektgebiet TP1 SH/HH (Blau: intrusive Salzstrukturen Perm, BGR 2008).

2.5 Seismik

Das Projektgebiet wird durch 3155 seismische Profile und zwei 3D Surveys abgedeckt. Zwei Drittel der seismischen Profile wurden vor 1965 produziert und liegen meist als „Linedrawings“ vor (Linien von charakteristischen Reflektoren, ursprünglich Einzelschussaufnahmen). In der Mitte der 60er Jahre wurde die Methodik der seismischen Messung deutlich weiterentwickelt, sodass der Untergrund mit höherer Auflösung abgebildet werden konnte. Ein Drittel der Profile entstand in dem Zeitraum 1965 bis 2011. Diese Daten sind in unterschiedlichen Prozessierungsstadien und Qualitäten archiviert und zeigen abgesehen von wenigen größeren Datenlücken eine relativ gute Abdeckung der Landesflächen (Tab. 3, Abb. 3). Letztgenannte Daten liegen größtenteils in der Zeit-Domäne vor.

	Anzahl	Messdatum < 1965	Messdatum > 1965
SH TUNB	2955	2107	848
HH TUNB	170	136	34
HH Neuwerk TUNB	30	16	14
SH HH TUNB TP1	3155	2259	896

Tab. 3: Statistische Angaben zu seismischen Profilen (KW-Datenbank der Länder).

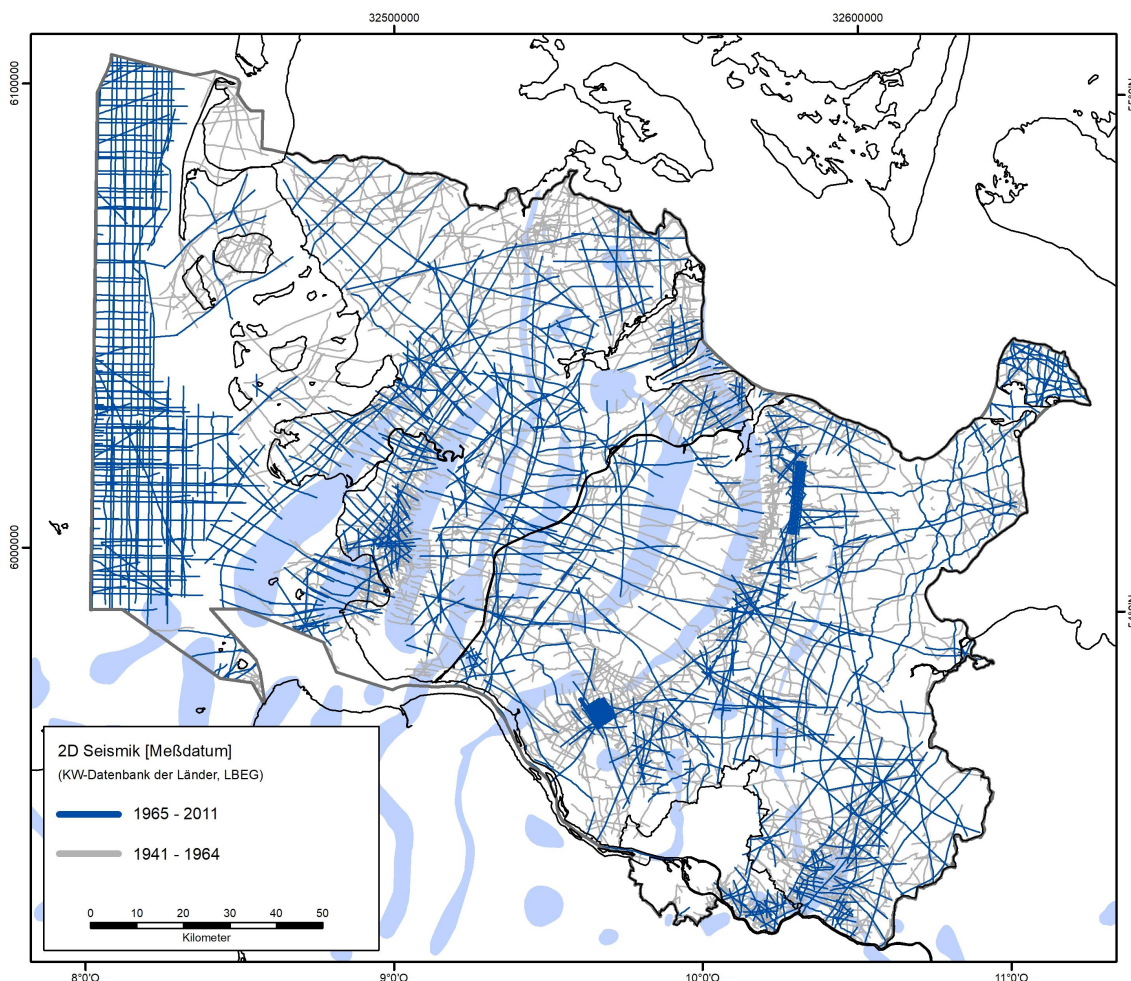


Abb. 3: Seismische Profile im Projektgebiet TP1 SH/HH (Blau: intrusive Salzstrukturen Perm, BGR 2008).

2.6 Geotektonischer Atlas von NW-Deutschland

In den 80er und 90er Jahren entwickelten Franz Kockel und Werner Jaritz zusammen mit einigen MitarbeiterInnen den Geotektonischen Atlas von NW-Deutschland und erreichten damit eine flächendeckende Darstellung des Nordwestdeutschen Beckens. Auf der Grundlage der seismischen Profile und Bohrungen der KW-Industrie wurden zunächst Karten im Maßstab 1:100.000 erarbeitet (BGR, unveröffentlicht). Im weiteren Verlauf des Projektes wurden diese Strukturkarten überarbeitet, homogenisiert und zusammengefügt und im Maßstab 1:300.000 veröffentlicht (Baldschuhn et al. 2001; GTA). Der Atlas enthält 14 Tiefenlinienpläne der Basis lithostratigraphischer Horizonte (Basis Zechstein – Basis M. Miozän), Restmächtigkeitskarten ausgewählter Formationen, Strukturentwicklungskarten, abgedeckte geologische Karten, sowie geologische Profile und Texte.

GTA 1: 100.000 (BGR, unveröffentlicht)

Tiefenlinienpläne der lithostratigraphischen Horizonte als TK100 Kartenblätter: Basis Zechstein, U. Buntsandstein, O. Buntsandstein, Keuper, U. Jura, M. Jura, O. Jura (und Wealden), U. Kreide, O. Kreide (und Dan), O. Paläozän, M. Eozän, M. Oligozän, U. Miozän, M. Miozän. Die tertiären Horizonte Basis M. Eozän bis Basis M. Miozän liegen nur für wenige Kacheln vor.

- Tiefenlinien (100 m, 50 m, 25 m)
- Verbreitungsgrenzen: Salzstockgrenze, Salzstocküberhang, Ausbiss, Verbreitung von liegenden Einheiten (sicher, unsicher)
- Störungsspuren: Aufschiebung, Überschiebung, Abschiebung (sicher, unsicher)
- Mulden- und Sattelachsen
- Hilfslinien, Gebiete ohne Datenabdeckung, u.v.m.

Geologische Profile, Berichte

GTA 1: 300.000 (Baldschuhn et al. 2001)

Tiefenlinienpläne der lithostratigraphischen Horizonte: Basis Zechstein, U. Buntsandstein, O. Buntsandstein, Keuper, U. Jura, M. Jura, O. Jura (und Wealden), U. Kreide, O. Kreide (und Dan), O. Paläozän, M. Eozän, M. Oligozän, U. Miozän, M. Miozän.

- Tiefenlinien (100 m)
- Tiefenlinien Hilfslinien (25 + 50 m, interpoliert)
- Verbreitungsgrenzen: Salzstockgrenze, Salzstocküberhang, Ausbiss
- Störungsspuren: Aufschiebung, Überschiebung, Abschiebung
- Mulden- und Sattelachsen
- Hilfslinien, Gebiete ohne Datenabdeckung, u.v.m.

Restmächtigkeitskarten (1:500.000), TUNB relevant: Rhät, U. Buntsandstein

Strukturentwicklungskarten, Geologische Profile (generalisiert)

Arbeitskarten der Anfangsgeschwindigkeiten und Gradienten von lithostratigraphischen Einheiten (BGR, unveröffentlicht, in generalisierter Form von Jaritz et al. 1991 publiziert)

2.7 Geologische 3D-Modelle

In früheren Projekten des LLUR SH entstanden verschiedene Geologische 3D-Modelle des Landes. Eine relevante Grundlage für nachfolgende Arbeiten war das 3D Basismodell SH (GTA3D), das eine räumliche Visualisierung des Geotektonischen Atlas darstellt (Rosenbaum et al. 2012, Hese 2012). Nachfolgend entstand im Rahmen des EU-Interreg4a Forschungsprojektes GeoPower ein grenzübergreifendes Geologisches 3D-Modell für die Region Sønderjylland / Schleswig. Im Rahmen des GeotIS-StörTief Projektes (2014 – 2017) wurde ein konsistentes 3D-Modell des Glückstadt-Grabens und angrenzender Gebiete erarbeitet (Thomsen et al. 2017). Es umfasst 12 lithostratigraphische Grenzflächen, Störungsflächen von tiefreichenden Störungszonen sowie Hüllflächen der Salzstrukturen. Dieses Modell wurde dem TUNB Projekt zur weiteren Entwicklung übergeben.

2.8 Weitere Daten von Projekten / Institutionen

Für die Modellierung der Basis Rupel wurde der Tiefenlinienplan Basis Rupel aus dem Forschungsprojekt COOSKA (BGR 2012) verwendet. Die Grundlage für die Konstruktion der Basis des Quartärs ist der Tiefenlinienplan Basis Quartär des LLUR SH (2016).

3 Methodik

3.1 Kachelung

Das Projektgebiet wurde in sieben Arbeitsgebiete aufgeteilt (Abb. 4). Die interne Grenzziehung orientierte sich an geologischen Strukturen, um damit komplexe ungünstige Schnitte zu vermeiden. Die Landesgrenzen basieren auf dem Datensatz VG250. Das erste Arbeitsgebiet liegt im Südosten an den Landesgrenzen zu Niedersachsen und Mecklenburg-Vorpommern. Zusammen mit den Nachbarländern wurden in dieser Pilotregion Methoden der Grenzharmonisierung erarbeitet. Im Anschluss wurden die Gebiete von Ost nach West bearbeitet.

Arbeitsgebiet 1: Südost Holstein (AG1 – SOH, Pilotregion)

Arbeitsgebiet 2: Ostholstein Block (AG2 - OHB)

Arbeitsgebiet 3: Raum Hamburg (AG3 - RHH)

Arbeitsgebiet 4: Glückstadt-Graben Ost (AG4 - GGO)

Arbeitsgebiet 5: Glückstadt-Graben West (AG5 - GGW)

Arbeitsgebiet 6: Westschleswig Block (AG6 - WSB)

Arbeitsgebiet 7: Neuwerk (AG7 - NWK)

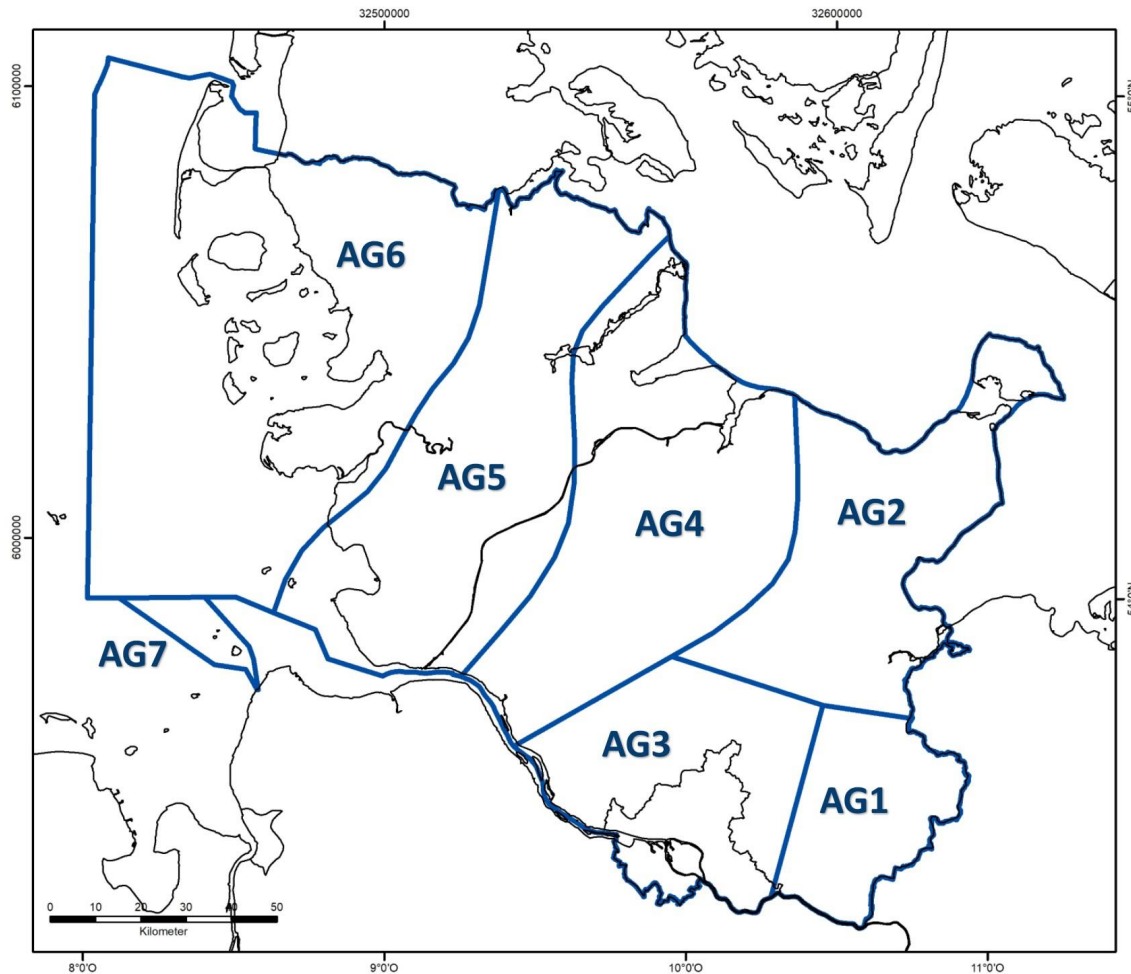


Abb. 4: Arbeitsgebiete des Teilprojektes 1 (SH / HH).

3.2 Datenaufbereitung GTA

GTA 1:100.000

Die in TK100 Kacheln vorliegenden Karten des GTA 1:100.000 wurden gescannt und digitalisiert. Die Daten wurden dann sowohl kachelweise als auch zusammengefügt im Shape und GOCAD Ascii Format abgelegt. Die gescannten geologischen Profile wurden in GOCAD als Bilddaten auf Profilflächen projiziert (*Texture UV Mapping*) und als Bilddaten sowie im GOCAD Format abgelegt.

GTA 1:300.000

Die digitalen Tiefenlinienpläne des GTA 1:300.000 liegen unter anderem im ArcGIS Shape Format vor. Für die Projektarbeit wurde alle Kartenelemente eines Horizontes getrennt im Shape Format und GOCAD Format abgelegt (Tiefenlinie, Abschiebung, Aufschiebung, Ausbiss, Salzstockrand, etc.). Entsprechend wurde mit den Restmächtigkeitskarten verfahren.

GTA Geschwindigkeitsmodell

Im GTA Projekt wurde ein Geschwindigkeitsmodell entwickelt, das von Jaritz et al. (1991) publiziert wurde. Der Kern des Geschwindigkeitsmodells sind 11 Geschwindigkeits-Layer in NW-Deutschland (10 + 1 Layer mit konstanter Geschwindigkeit), für welche regionale Anfangsgeschwindigkeiten V_{NN} kartiert und optimale Gradienten g ermittelt wurden. Neben den Erläuterungen zum Geschwindigkeitsansatz werden in der Jaritz-Publikation auch V_{NN} -Karten und Gradienten für Nordwestdeutschland dargestellt. Diese Karten sind jedoch für die Publikation vereinfachte Darstellungen der Originale. Zur Rekonstruktion des Geschwindigkeitsmodells wurden die (handschriftlichen) Arbeitskarten von der BGR und vom LBEG gesichtet und gescannt. Für SH handelt es sich um 174 Kartenblätter im Maßstab 1:100.000. Sie wurden im LLUR georeferenziert. Für den Aufbau eines Geschwindigkeitsmodells in GOCAD wurden die Karten digitalisiert. Anschließend erfolgte landesweit die Interpolation der Werte auf triangulierten Flächen.

3.3 Datenaufbereitung Bohrungen

Bohrdaten liefern meist sehr präzise punktuelle Informationen zur Tiefenlage und Verbreitung von Formationen, sowie zur Lithologie und zu petrophysikalischen Eigenschaften. Sie sind daher für die seismische Auswertung, Geologische 3D-Modellierung als auch für die Parametrisierung von großer Bedeutung. Für die 3D-Modellierung des tieferen Untergrundes werden vor allem die Tiefbohrungen der KW-Industrie verwendet. Da tertiäre und teils kretazische Einheiten in manchen Bereichen des Landes sehr dicht unter der Oberfläche liegen und auch die Basis Quartär in dem Projekt berücksichtigt wird, sind auch Bohrungen des Landesarchivs, vor allem tiefere stratifizierte Wasserbohrungen, relevant.

Bohrungen des oberflächennahen Untergrundes

Das Bohrarchiv Schleswig-Holstein umfasst 235.231 digital erfasste Bohrungen (Stand 03/2020) aus den Fachbereichen Baugrund, Geologie, Geothermie, Lagerstätten und Hydrologie, die vor allem der Erkundung des oberflächennahen Untergrundes dienen. Das erste Ziel der Datenaufbereitung für GOCAD war, eine sinnvolle Auswahl an qualitätsgesicherten und stratifizierten Bohrungen zu treffen. Hierzu wurde zunächst eine Datenanalyse der GeODIN Datenbank durchgeführt. Nachdem die Bohrungen und ihre Interpretationsversionen (es liegen oft mehrere vor) hinsichtlich Stratifizierung gruppiert waren, wurden die stratifizierten Interpretationsversionen weiter dahingehend analysiert, ob sie nur das Quartär ansprechen, oder auch Schichten, die älter sind als Quartär. Bei insgesamt 8627 Interpretationsversionen (5867 Bohrungen) tritt eine stratigraphische Schicht auf, die älter ist als Quartär. Bei 21.329 Interpretationsversionen (19.839 Bohrungen) sind die stratigraphischen Schichten nicht älter als Quartär. Für die Bohrungen, die die Basis Quartär durchteufen, wurden (pro Arbeitsgebiet) GOCAD Bohrungsobjekte, sowie Stratigraphie-Logs und Markersets für die GTA bzw. TUNB Horizonte erzeugt. Unsichere Ansprachen sind mittels eines Unsicherheits-Logs kenntlich gemacht worden. Für den Fall, dass eine stratigraphische Schicht ein zu großes Intervall aufspannt, wurde in dem Stratigraphie-Log ein Farbverlauf definiert. Zur besseren Einschätzung der Qualität wurde ergänzend ein Punktdatensatz mit Angaben zum Bearbeiter und des Bohrzeitraumes erstellt. Für stratifizierte Bohrungen, die die Basis Quartär nicht erreichen, wurde ein Punktdatensatz der tiefsten Quartär Ansprachen erzeugt (meist nahe der Endteufe). Aufgrund der großen Datenmenge (etwa 20.000 Bohrmarker) war die individuelle Betrachtung der Qualität und Einbezug dieser Quartärbohrungen bei der Modellierung nur eingeschränkt möglich.

Bohrungen des tiefen Untergrundes

Der Datenbestand der Tiefbohrungen ist in den letzten Jahrzehnten im Rahmen des KW-Verbundes der Länder fortwährend digitalisiert worden. Die KW-Datenbank der Länder ist eine Access Datenbank (mit Frontend), die vom LBEG in Zusammenarbeit mit den Ländern des KW-Verbundes und teils anderen Institutionen aufgebaut wurde. Sie enthält sämtliche Metadaten, Abweichdaten, Temperaturdaten, GVM Daten, strat. Kurzprofile und weiteres. In den letzten Jahren wurden relevante Bohrakten (Schichtenverzeichnisse, diverse Bohrakten und Logs) von den SGDs SH und HH gescannt, um den gesamten Bestand digital verfügbar zu machen und für das Land zu archivieren. Darüber hinaus wurden digitale Logdaten von Firmen geliefert. Die gescannten und teils voll digitalen Daten sind nun Teil der Bohrdaten des KW-Verbundes und ergänzen bzw. vervollständigen die Inhalte der KW-Datenbank.

Trotz bereits hohem Digitalisierungsgrad und guter Datenorganisation durch die KW-Datenbank und verlinkten Dokumenten, ist die Aufbereitung der Bohrdaten und die Qualitätssicherung noch unvollständig. Dies ist unter anderem der großen Datenmenge und dem hohen Digitalisierungsaufwand (z.B. geophysikalische Messkurven, lithologische Beschreibungen) geschuldet. Der Fokus der Projektarbeiten lag auf folgenden Themen:

- Bestandsaufnahme und Digitalisierung von Logdaten
- Digitalisierung von Schichtenverzeichnissen mit GeODIN
- Korrektur, Überarbeitung und Aktualisierung der digitalen stratigraphischen Profile
- Überarbeitung der Abweichdaten
- Aufbereitung von Bohrdaten für GOCAD

a) Bestandsaufnahme und Digitalisierung von Logdaten

Die Logdaten der KW-Bohrungen liegen größtenteils in Form von („analogen“) Scans vor. Ein geringer Anteil ist im digitalen Las-Format (Log Ascii Standard) vorhanden. Die Daten stammen aus verschiedenen Zeiten und sind hinsichtlich Umfang und Qualität sehr divers. Das Ziel war zunächst eine Bestandsaufnahme, um zu wissen, welche Logs für welche Tiefenbereiche existieren. Hierfür war auch ein Verständnis der Logkürzel und Messmethoden notwendig, die sich in den letzten Jahrzehnten stetig veränderten und weiterentwickelt wurden. Mittels einer Datenbank wurde jeder Scan katalogisiert. Hierbei wurden unter anderem auch die Qualitäten hinsichtlich Digitalisierbarkeit erfasst. Im Anschluss wurden Redundanzen geprüft. Für die Arbeiten zum Thema Geschwindigkeiten wurden (15) Bohrungen, für die sowohl Sonic- als auch Dichte-Logs in Form von Scans vorlagen, identifiziert und alle Logs dieser Bohrungen digitalisiert.

b) Digitalisierung von Schichtenverzeichnissen mit GeODIN

Ein wichtiger Bestandteil von Bohrdaten sind die lithologischen Beschreibungen der Schichtenverzeichnisse. Per Auftragsvergabe wurde damit begonnen, lithologische Profile mit GeODIN digital zu erfassen. Die Arbeiten werden zukünftig fortgeführt.

c) Korrektur, Überarbeitung und Aktualisierung der digitalen stratigraphischen Profile

Die KW-Datenbank enthält digitale stratigraphische Kurzprofile, die jedoch teils fehlerbehaftet und unvollständig sind. Zudem gibt es für einige Bohrungen neuere Interpretationen, die bisher nicht digital erfasst und mit dem übrigen Datenbestand zusammengeführt wurden. Eine

Schwierigkeit im Umgang mit den Profilen ist die wechselnde Verwendung von Top und Basistiefen, sowie die Existenz von Phantomhorizonten mit 0 m Mächtigkeit.

Für die Arbeiten zu den Themen stratigraphische Profile und Abweichdaten wurde mit Teilen der KW-Datenbank eine neue Datenbank aufgebaut. Unter anderem wurden alle digital verfügbaren stratigraphischen Profile von KW-Bohrungen in die Datenbank kopiert. Im Zuge der Überarbeitung der stratigraphischen Profile wurde zunächst die Neubearbeitung der Oberkreide von Baldschuhn eingegeben. Im Projekt GeotIS-StörTief wurden durch das LLUR eine Reihe von Bohrungen im mittleren Buntsandstein, Rhät und Dogger stratigraphisch überarbeitet. Diese Überarbeitung wurde ebenfalls in die neue Struktur eingepflegt. Dann wurden die digitalen Schichtenverzeichnisse der Bohrungen in denjenigen Bereichen, die keine neuen Interpretationen aufweisen, mit den Original-Unterlagen stratigraphisch abgeglichen und fehlerhafte Einträge korrigiert. Elemente wie z.B. Störungen oder Transgressionshorizonte sind ebenfalls enthalten und wurden zur Unterscheidung von stratigraphischen Einträgen entsprechend markiert. Die Überarbeitung wurde zusätzlich durch Metadaten (z.B. Bearbeiter, Herkunft der Interpretation) und Bemerkungen dokumentiert. Basis- und Top-Tiefen sind in getrennten Spalten konsistent geführt. In den stratigraphischen Profilen ist hinterlegt, in welcher Zone nach GTA eine bestimmte stratigraphische Schicht liegt - so können relevante lithostratigraphische Horizonte oder Zonen für Auswertungen extrahiert werden. Es wurde eine neue stratigraphische Referenztafel angelegt, aus der die Bedeutung jeder Einheit hervorgeht. Die stratigraphischen Begriffe folgen generell der Nomenklatur der KW-Industrie, neuere Interpretationen folgen jedoch teilweise auch dem Symbolschlüssel Geologie (Neubearbeitung Oberkreide) oder wurden eigens neu eingeführt (z.B. „von-bis“ Begriffe wie TE.U-TA.O, entspricht U. Eozän – O. Paläozän).

d) Überarbeitung der Abweichdaten

Von den 1887 Bohrungen im Projektgebiet (inkl. Vertiefungen oder Ablenkungen, Bohrlöcher) existieren für 1117 Bohrlöcher analoge und digitale Abweichdaten. Die mittlere Abweichstrecke liegt bei 1768 m (0 – 8408 m), die mittlere Abweichstrecke ohne Bohrungen aus den Gebieten Mittelplate, Dieksand und Schwedeneck liegt bei 132 m (0 – 1019 m). Zu den Bohrpfeilen von 770 Bohrlöchern sind nach derzeitigem Kenntnisstand keine Informationen bekannt. Dies sind meist sehr alte und weniger tieferreichende Bohrungen. Sie werden mit vertikalen Pfeilen dargestellt.

Die digitalen Abweichdaten der KW-Datenbank sind größtenteils stimmig. Dennoch haben Prüfungen ergeben, dass manche Bohrpfeile fehlerhaft oder (meist geringfügig) zu kurz sind. Die Überprüfung und Korrektur der Abweichdaten ist für einen Teil der Arbeitsgebiete erfolgt. Hierfür wurden die gescannten analogen Bohrkarten herangezogen. Zu kurze Bohrpfeile wurden, wenn nicht anders möglich, im Trend der letzten vermessenen Abschnitte bis zur Endteufe verlängert. In den zentralen und westlichen Arbeitsgebieten wurden die originalen Abweichdaten der KW-Datenbank verwendet.

e) Aufbereitung von Bohrdaten für GOCAD

Für die Definition von Bohrungsobjekten in GOCAD wurde zunächst eine sinnvolle Benennung in der „Stratigraphie und Abweichdaten“ Datenbank definiert. Sie orientiert sich an den Lochnamen, wobei Sonderzeichen durch Unterstriche ersetzt werden. Bei vertieften Bohrungen wurde jeweils der längste Pfeil verwendet und die Namen vereinfacht. Durch Access Abfragen konnten die für den GOCAD-Import notwendigen Daten generiert werden. Es wurden Bohrmarker von allen relevanten lithostratigraphischen Horizonten zwischen der

Basis Zechstein und Basis Quartär erzeugt und importiert. Zusätzlich wurden auch Störungsmarker und Top-Perm Marker integriert. Zur Tiefen-Zeit Konvertierung wurden die GVM Daten importiert. Sonstige Logs wurden, sofern digital verfügbar und notwendig, in den jeweiligen Arbeitsphasen integriert.

3.4 Datenaufbereitung Seismikdaten

Im Projektgebiet existieren etwa 3000 seismische Profile und zwei 3D Surveys. Der Geologische Dienst SH konzentrierte sich in den letzten Jahren zunächst auf die Digitalisierung der neueren nach 1965 gemessenen seismischen Profile (etwa 1000) im festländischen und küstennahen Bereich. Einige Profile wurden von Firmen im digitalen SGY Format geliefert. Der Bestand wurde zunächst gescannt und dann zusammen mit den digitalen Daten sukzessive in einer Datenbank erfasst. Die Daten liegen in unterschiedlichen Qualitäten und Prozessierungsstadien fast ausnahmslos in der Zeit-Domäne vor. Viele Profile liegen ausschließlich als Stapelsektion vor, einige Surveys weisen aber auch migrierte Profile auf. Für Auswertungen im TUNB Projekt wurden die analogen und digitalen Profile für GOCAD aufbereitet.

Analoge gescannte seismischen Profile

Zur räumlichen Darstellung der gescannten seismischen Profile wurde ein Workflow entwickelt. Eine erste sehr wichtige Aufgabe war die Vorbereitung der Profillinien und der Abgleich der Lokationsnummern von gescannten Profilen und digitalen Profillinien. Die Profilgeometrien sind in der UKOOA-Datenbank des KW-Verbundes digital enthalten. Im Rahmen des KW-Verbundes wurde daraus ein Linienshape generiert, das den heutigen Bestand zeigt und Metadaten enthält. Die Lokationsdaten der UKOOA-Datenbank wurden mit den Angaben auf den gescannten Profilen abgeglichen. Da die Profillänge und Anzahl der Lokationspunkte nicht immer identisch ist, erfolgte eine Angleichung der Profillinien, damit die Scans korrekt verortet sind. Die Koordinaten wurden von Gauß-Krüger 3 nach UTM32 umgerechnet. Es erfolgte dann eine erste Entzerrung bzw. Rotation der Bilddatei und der vertikale und horizontale Zuschnitt. Für die nächsten Arbeitsschritte wurden zwei GOCAD Wizards (Workflows zur semiautomatischen Ausführung von Arbeitsschritten) verwendet. Es wurde für das jeweilige Profil eine Profilfläche erstellt. Hierbei wurde die Ober- und Unterkante der Profilfläche entsprechend der Verzerrung des Profilbildes invers vertikal verzogen. Somit wurden die Verzerrungen des Profilbildes minimiert und ausgeglichen. Im letzten Schritt wurde das Profilbild per *UV Texture Mapping* auf die Profilfläche projiziert. Bei dem *UV Texture Mapping* Verfahren wird das Bild nicht orthogonal auf die Fläche projiziert, sondern quasi abgerollt. Das führt zur Passgenauigkeit an den Knicken der Profillinie. Nach Kontrolle der Lagegenauigkeit an Kreuzungspunkten wurden die seismischen Profile im GOCAD Ascii Format exportiert und abgelegt (Profilfläche und 2D-Voxet). Durch die beschriebene Vorgehensweise konnten die im Übermaß (etwa DIN A0, teils mehrere Meter Breite) gescannten Profile entzerrt werden. Sie weisen eine gute Lagegenauigkeit auf.

Digitale seismische Profile

Es wurden seismische Profile im SGY Format von Firmen an den KW-Verbund geliefert. Ein Teil dieser Daten weist Spurkoordinaten im GK3 Koordinatensystem auf, bei einigen Profilen fehlen aber auch die Koordinaten. Existierende und neu bestimmte Spurkoordinaten wurden in das UTM32 Koordinatensystem umgerechnet und in Form von Navigation-Files abgelegt.

Dann wurden die SGY Daten mit den Navigation-Files in GOCAD importiert, kontrolliert und schließlich als SGY exportiert. Beim Export werden die Koordinaten in die SGY Datei geschrieben, sodass beim Re-Import die erneute Verwendung von Navigation-Files nicht mehr notwendig ist.

3.5 GTA Geschwindigkeitsmodell – Jaritz

Für die Modellierung des Untergrundes wurden im TUNB Projekt maßgeblich Daten des GTA aber auch Bohrungen und lokal seismische Auswertungen verwendet. Im GTA Projekt wurde die Zeit-Tiefen Konvertierung der seismischen Auswertungen mit einem Geschwindigkeitsmodell durchgeführt, das von W. Jaritz und Mitarbeitern entwickelt wurde (Jaritz et al. 1991).

Im Rahmen des TUNB Teilprojektes wurde dieses Geschwindigkeitsmodell für die Landesflächen von Schleswig-Holstein und Hamburg rekonstruiert. Durch die Verwendung des GTA-Geschwindigkeitsmodells ist eine Passgenauigkeit zwischen Neuauswertungen und GTA Daten gewährt und es entstehen keine artifizellen Tiefendifferenzen, die lediglich durch verschiedene Geschwindigkeiten bedingt wären. Mit dem rekonstruierten Geschwindigkeitsmodell können GTA basierende Modelldaten oder Originaldaten des GTA in die Zeit-Domäne oder seismische Auswertungen in die Tiefen-Domäne konvertiert werden. Zukünftig ist geplant das GTA-Geschwindigkeitsmodell zu überarbeiten. Das geologische Modell könnte mit dem alten Geschwindigkeitsmodell in die Zeit-Domäne und mit einem neuen Geschwindigkeitsmodell zurück in die Tiefe-Domäne konvertiert werden.

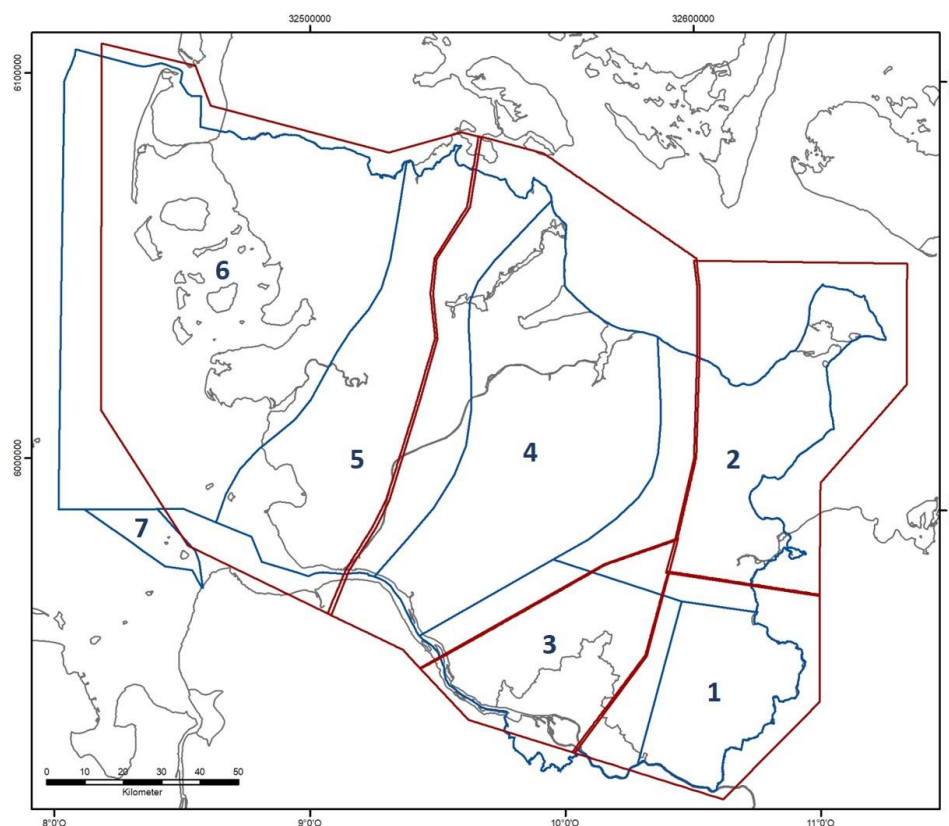


Abb. 5: Gebiete der rekonstruierten GTA-Geschwindigkeitsmodelle (rot), Arbeitsgebiete des TUNB Teilprojektes 1 (blau).

Für die 11 Einheiten (Tertiär bis Zechstein) wurden auf triangulierten Flächen für das gesamte Gebiet Anfangsgeschwindigkeiten interpoliert und Gradienten definiert. Zur Rekonstruktion des Geschwindigkeitsmodells wurde das Projektgebiet in fünf Teilgebiete aufgeteilt (Abb. 5). Überlappungen mit Nachbargebieten sollen Randeffekte vermeiden. In diesen Teilgebieten wurden Modelle des Model3D Typs erstellt. Das Model3D stellt Schichtkörper anhand von triangulierten allseits umhüllenden Flächen dar (Boundary Representation Model, Abb. 6). Zur Konstruktion des Model3D wird ein topologisch konsistentes Grenzflächenmodell benötigt, daher wurde hierfür das Strukturmodell SH 2016 verwendet, das im Rahmen des GeotIS-StörTief Projektes entstand. Vor der Konstruktion des Model3D wurden die Salzdiapire entfernt und die Lücken in den Grenzflächen geschlossen. Durch die hohe Intervallgeschwindigkeit des Zechsteins (konst. 4500 m/s), käme es im Bereich von Überhängen zu verfälschten Werten, wenn aus den Intervallgeschwindigkeiten Durchschnittsgeschwindigkeiten berechnet werden. Dies ist in GOCAD die Voraussetzung für die Zeit-Tiefen (oder Tiefen-Zeit) Konversion. Bei Bedarf könnten die Salzdiapirkörper jedoch im Nachhinein integriert werden. Störungsflächen wurden lediglich bei hohen Versatzbeträgen integriert. Meistens wurden Liegend- und Hangendabrisse durch Flächen verbunden und Lücken somit geschlossen. Nach Berechnung des Model3D wurden die (lateral mitunter getrennten) Schichtkörper (Regions) dem jeweiligen Layer zugeordnet. Mit dem Parameter Editor wurden für jeden Layer Anfangsgeschwindigkeiten und Gradienten definiert sowie die Beziehung zur Berechnung der Intervallgeschwindigkeit ($V_{int} = V_{NN} + g \cdot Z$). Zuletzt erfolgte die Übertragung der Intervallgeschwindigkeiten auf ein 3D-Voxel (Abb. 6).

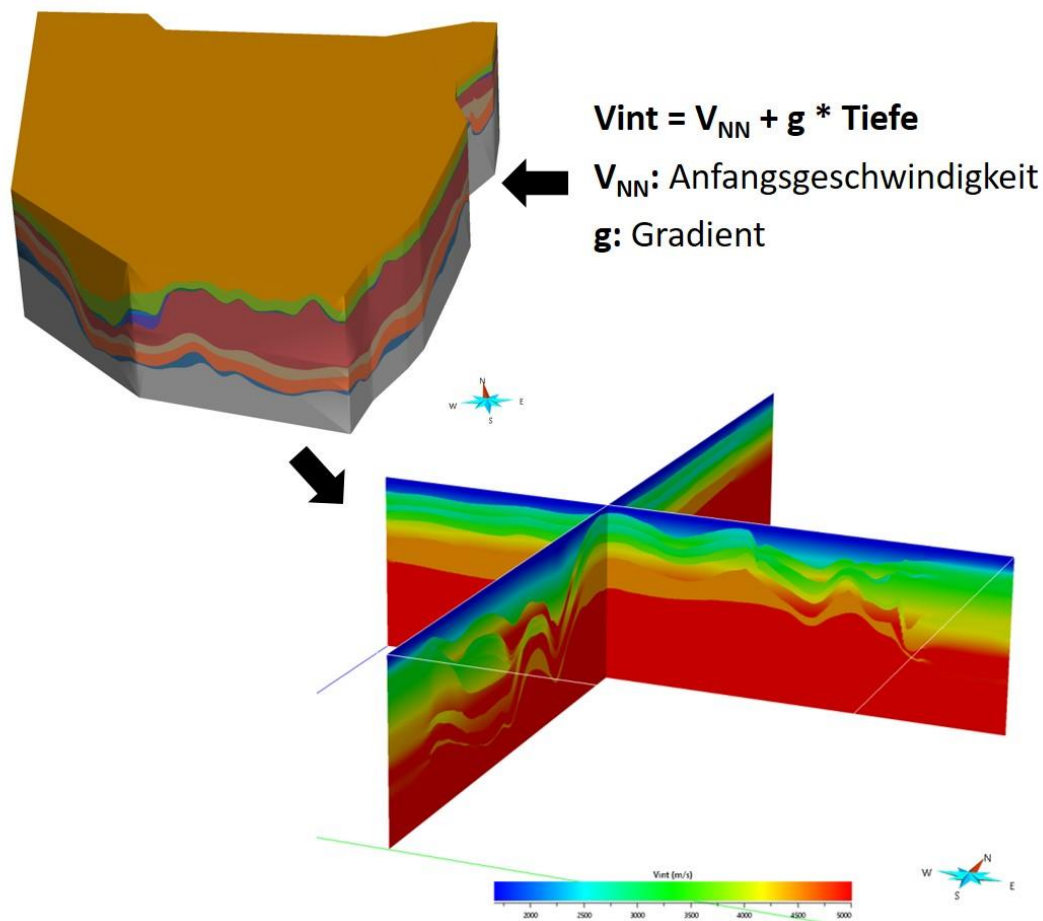


Abb. 6: Rekonstruktion des GTA-Geschwindigkeitsmodells. Es wurden kartierte Anfangsgeschwindigkeiten und Gradienten in Model3D Schichtkörpern definiert und die Intervallgeschwindigkeit mittels angegebener Beziehung berechnet. Die Werte wurden im letzten Schritt auf 3D-Voxets übertragen.

Aus zeitlichen Gründen erfolgte die Rekonstruktion des GTA Geschwindigkeitsmodells schrittweise zunächst für die Arbeitsgebiete 1 und 4 jeweils vor den Modellierungsarbeiten. Im Anschluss entstand der westliche Teil in zwei Phasen jeweils vor Bearbeitung der Arbeitsgebiete 5 (Top bis U. Kreide) und 6 (U. Kreide bis Zechstein). Nach Finalisierung des Modells wurden die restlichen zwei Teile im Bereich der Arbeitsgebiete 2 und 3 erstellt (Abb. 5).

3.6 Seismikinterpretation

Im Zuge des TUNB Teilprojektes wurden die nach 1965 gemessenen seismischen Profile für GOCAD aufbereitet. Die landesweite (Re-) Interpretation dieser Profile war im Projekt nicht vorgesehen und im Zeitrahmen nicht möglich. Vielmehr ging es um qualitative Vergleiche und, sofern möglich, um lokal begrenzten Einbezug von seismischen Interpretationen (Abb. 7). Das GTA Geschwindigkeitsmodell wurde schrittweise rekonstruiert, daher war es nicht für jedes Arbeitsgebiet verfügbar und wurde erst nach Ende der Modellierungsarbeiten fertiggestellt.

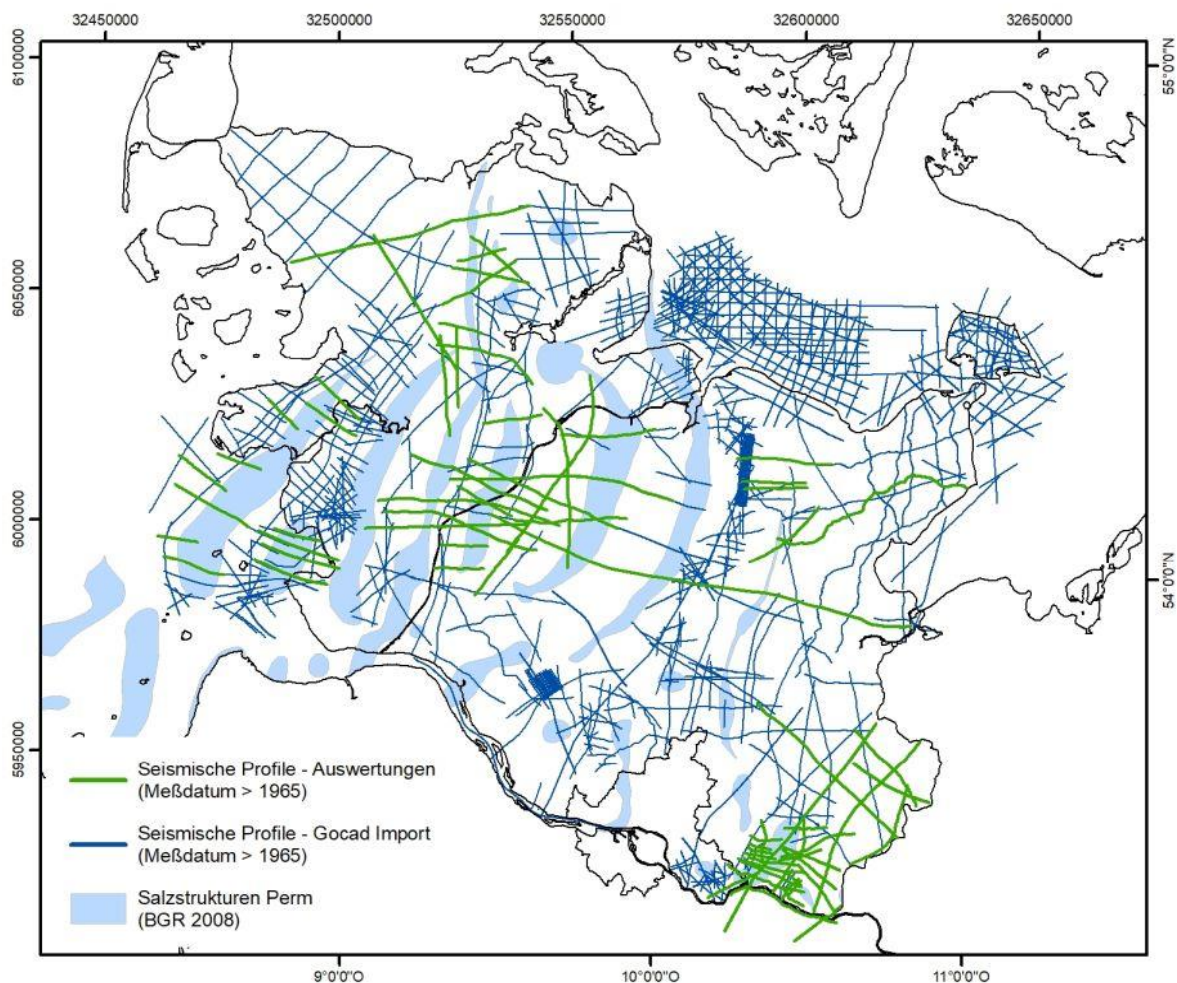


Abb. 7: Seismische Profile wurden mit GTA Daten und Modellen in der Zeit Domäne verglichen (blau und grün), lokal wurden Auswertungen für die Modellierung verwendet (grün).

Für seismische Auswertungen wurden Bohrungen mittels GVM Geschwindigkeiten in die Zeit-Domäne konvertiert. Darüber hinaus wurden Bohrungen ohne GVM Messungen, das Basismodell SH (GTA3D) sowie teilweise das Strukturmodell SH 2016 mit dem rekonstruierten GTA Geschwindigkeitsmodell in die Zeit konvertiert. Für die Zeit-Tiefen Konversion wurde ebenfalls das GTA-Geschwindigkeitsmodell verwendet. Mit Hilfe der Bohrungen und Modellflächen konnten die relevanten Reflektoren identifiziert und ausgewertet werden. Teilweise zeigen die gescannten Profile farbige Anrisse von früheren Auswertungen, vermutlich aus dem GTA Projekt. Die Markierungen stören zwar bei der eigenen Interpretation, halfen jedoch zusätzlich bei der Identifizierung der Reflektoren. In einigen Fällen wurden seismische Auswertungen für die Konstruktion des Störungsmodells verwendet (Lage, Reichweite, Vernetzung, Sprunghöhen). Es ging zudem um die Abgrenzung von Salzdiapiren (Flanken, Dachbereiche), sowie um die Korrektur von lithostratigraphischen Horizonten. Die Abb. 8 zeigt die Bereiche bzw. Strukturzonen, in denen seismische Interpretationen in die Modellierung mit einbezogen wurden.

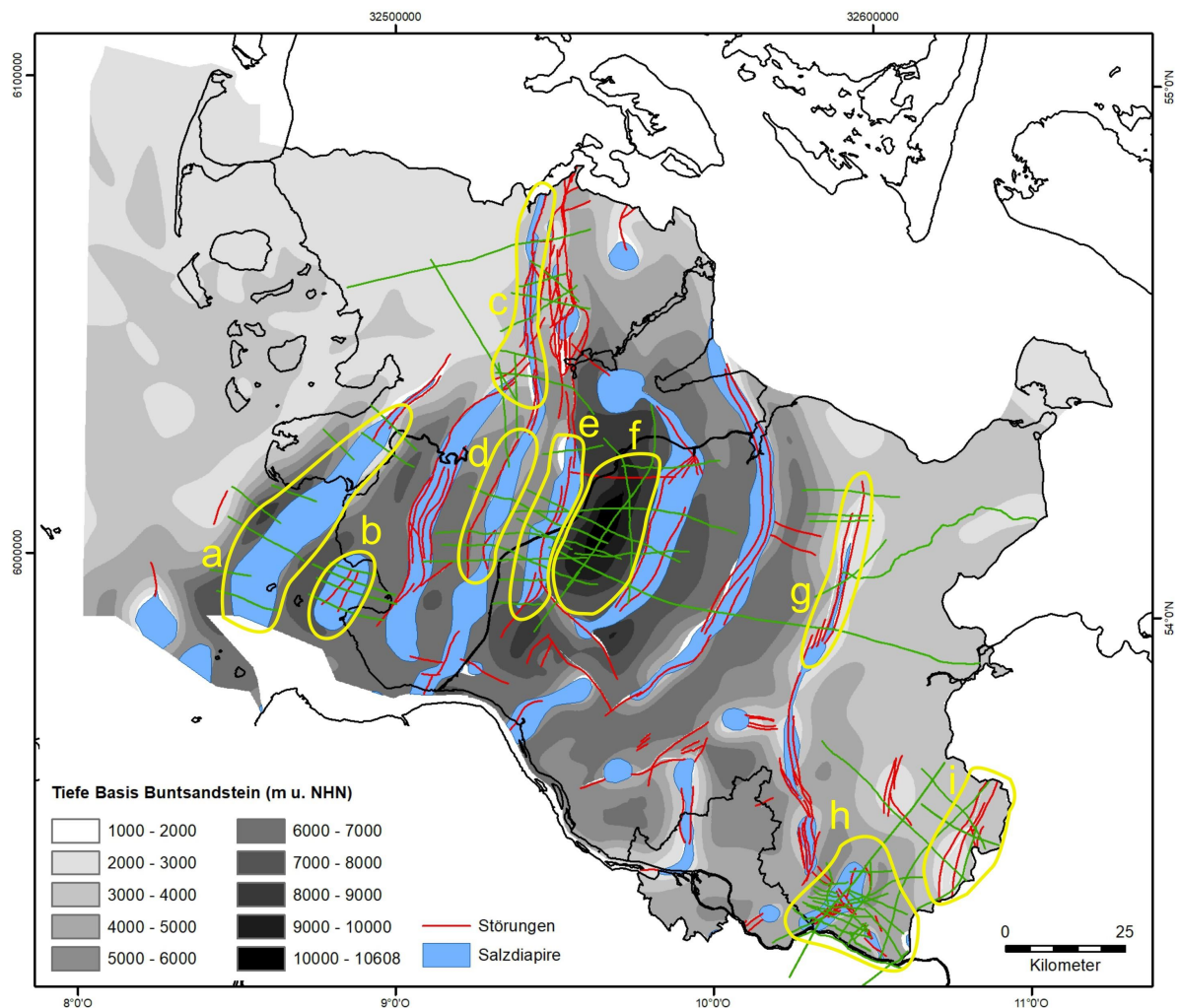


Abb. 8: Strukturübersicht und interpretierte seismische Profile (grün). In den gelb markierten Bereichen wurden seismische Interpretationen in die Modellierung einbezogen.

a) Oldenswort

Vor der Konstruktion bzw. Überarbeitung des Modells der Salzstruktur Oldenswort wurden seismische Profile mit dem Strukturmodell SH 2016 verglichen. Es ließ sich beobachten, dass die Flanken des existierenden Salzstockmodells teilweise noch in reflektiven Bereichen und teils zu weit in den diffusen Bereichen lagen. Es ist bekannt, dass sich Salzstrukturen im seismischen Profil schwer abgrenzen lassen. Die Position der Flanken wurden in den Profilen abgeschätzt, d.h. einige Meter jenseits des klar reflektiven Bereichs markiert. Bei der Neukonstruktion der Hüllfläche wurden diese Markierungen beachtet, größere Datenlücken wurden durch GTA Daten überbrückt.

Nordwestlich der Salzstruktur liegt der Gardinger Trog, Teil des Westholstein Troges, der etwa 5,5 km mächtige tertiäre Abfolgen aufweist. Der Vergleich zwischen der GTA Interpretation und migrierten seismischen Profilen (Abb. 7, blaue und grüne Linien) zeigte teils deutlich Abweichungen des Einfalles und der Krümmung sowie lokal der Tiefenlage der Horizonte. Problematisch ist, dass dort auch die migrierten seismischen Profile untereinander an den Kreuzungspunkten deutliche Diskrepanzen aufweisen (betrifft meist Profile von verschiedenen Surveys). Letztlich wurden die Modellflächen nicht an seismische Anrisse angepasst, sondern hinsichtlich Tiefenlage und Krümmung durch Profile des GTA 1:100.000 korrigiert.

b) Büsum

Der Salzdiapir Büsum liegt südlich zwischen den Salzmauern Oldenswort und Heide-Meldorf-Marne. An der Westflanke befindet sich das Ölfeld Mittelplate, daher ist der Bereich durch teils stark abgelenkte Bohrungen und 3D Seismik gut erschlossen worden. Der Salzdiapir weist einen Scheitelgraben auf, der mittels migrierter Sektionen kartiert wurde. Bei der Modellierung der Störungen wurden die Informationen zur Lage und dem Verlauf, sowie Sprunghöhen berücksichtigt. Die Verwendung des 3D Seismik Datensatzes wurde verworfen, da diese sehr hochauflösenden Informationen eher für ein Detailmodell geeignet sind.

c) Flensburg – Sieverstedt

Die Salzstruktur Flensburg-Sieverstedt ist eine schmale Salzmauer, die im Norden den Westrand des Glückstadt-Grabens markiert. Im Dachbereich entwickelte sich im Norden ein Halbgraben, der südlich in einen Graben übergeht. Die kretazischen und tertiären Abfolgen weisen teils hohe Versatzbeträge auf. Die Struktur wird von mehreren seismischen Profilen abgedeckt, die jedoch nicht alle in migrierter Form vorliegen und daher eingeschränkt nutzbar sind. Soweit möglich wurde die Lage der Salzmauer markiert und für die Neukonstruktion des Modells verwendet. Darüber hinaus wurden Anrisse der Störungen verwendet.

d) Grevenhorst – Pahlhude – Tellingstedt

In südlicher Fortsetzung der Salzmauer Flensburg-Sieverstedt folgen die Strukturabschnitte Grevenhorst – Pahlhude – Tellingstedt. Die im GTA kartierten Scheitelstörungen sind in den seismischen Profilen identifizierbar, weisen jedoch Lageungenauigkeiten auf. Bei der Konstruktion der Störungsflächen wurden Störungsspuren des GTA verwendet. Der Verlauf wurde mit Hilfe der seismischen Auswertungen korrigiert.

e) Föhrden – Hamdorf – Oldenbüttel

Die Salzmauer Föhrden – Hamdorf – Oldenbüttel begrenzt den zentralen Glückstadt-Graben im Westen. Die Struktur wird von Abfolgen der Kreide und des Tertiärs abgedeckt und weist einzelne Abschiebungen im Dachbereich auf. Auf den kreuzenden Profilen sind diese Störungen oft erkennbar, somit konnten die seismische Auswertungen zur Korrektur der GTA Daten verwendet werden.

f) Zentraler Glückstadt-Graben

Der zentrale Glückstadt-Graben erreicht eine Tiefe von etwa 10,5 km und ist damit eines der tiefsten Beckenbereiche. Der Bereich wird von mehreren seismischen Profilen abgedeckt, die in migrierter Form vorliegen. Der Vergleich zwischen GTA Daten und seismischen Profilen zeigt, dass die GTA Horizonte Basis Zechstein und U. Buntsandstein hinsichtlich Krümmung, Einfallen und Tiefenlage von den entsprechenden Reflektoren abweichen. Der zentrale Senkungsbereich weist im GTA eine V-Form auf, in den Profilen eher eine U-Form. Die Reflektoren Basis Zechstein, Basis U. Buntsandstein und M. Buntsandstein wurden digitalisiert und für die Korrektur der entsprechenden Modellflächen verwendet.

g) Plön-Segeberg

Die Plön-Segeberg Störung ist eine Hauptstörung am Ostrand des Glückstadt-Grabens. Sie reicht vom Zechstein bis in jüngste tertiäre Schichtfolgen und wird von sekundären Störungen begleitet. Sie bildet die Verlängerung des Strukturzuges Sülfeld – Segeberg und verläuft einige Kilometer in Richtung NNE. Die Versätze an der Störung können bis zu etwa 1000 m betragen. Die Störungszone ist durch mehrere kreuzende Profile belegt. Da für dieses Gebiet kein GTA Geschwindigkeitsmodell vorlag, wurden die seismischen Daten für (laterale) Lagekorrekturen der Störungsflächen verwendet. Bei der Modellierung von tertiären Horizonten im Nahbereich der Störung und Korrektur von GTA Daten wurden seismische Reflektoren zur Hilfe genommen, um strukturelle Trends einzuhalten.

h) Geesthacht-Hohenhorn / Juliusburg-Lauenburg

Der Salzdiapir Geesthacht-Hohenhorn liegt im Osten des Hamburger Troges und erstreckt sich von der Elbe etwa 17 km in Richtung NE. Der Diapir wird von Abfolgen der Kreide und des Tertiärs abgedeckt, auf den Randbereichen des Daches sind teils allochthone geringmächtigen Schichtfolgen des M. Jura verbreitet. Im südlichen und zentralen Abschnitt weist die Salzstruktur einen komplexen Scheitelgraben auf, der in Richtung NE durch Querstörungen begrenzt wird. Dieser Bereich ist gut durch seismische Daten belegt. Der nordöstliche Teil weist eine einzelne Abschiebung auf und wird von neueren seismischen Profilen nur randlich erfasst. Es wurde eine Neu-Bewertung der seismischen Profile und Bohrungen vorgenommen. Auf dieser Grundlage erfolgte die Modellierung des Störungssystems, der Salzstruktur sowie der lithostratigraphischen Horizonte.

Die Salzmauer Juliusburg-Lauenburg liegt südöstlich der Struktur Geesthacht-Hohenhorn und verläuft in Richtung SE nach Niedersachsen hinein. Seismische Auswertungen dienten der Modellierung der Scheitelstörungen.

i) Gudow

Die Struktur Gudow liegt im Südosten des Landes auf dem Ostholstein Block im Randbereich des südlichen Glückstadt Grabens. Es handelt sich um eine Störungszone, die sich auf einem NE – SW streichenden Kissenzug entwickelte und sich in beide Richtungen nach Mecklenburg-Vorpommern fortsetzt. Es handelt sich hierbei um mehrere Hauptstörungen, die von sekundären Störungen flankiert werden und die sich vom Zechstein bis in die jüngsten tertiären Folgen verfolgen lassen. Seismische Auswertungen sind vor allem für die Modellierung des Störungssystems verwendet worden (Geometrie, Verlauf, Vernetzung). Der Verlauf der Störungen wurde grenzübergreifend mit den Daten aus Mecklenburg-Vorpommern harmonisiert.

3.7 Modellierprozesse

Methodik

Im TUNB Projekt wird die 3D-Modellierungssoftware SKUA-GOCAD (Emerson/Paradigm) eingesetzt. Das Ziel der Modellierung ist die Konstruktion eines konsistenten Grenzflächenmodells, bestehend aus triangulierten Flächen der Störungen, Salzdiapire und Schichtgrenzen. Die Anpassung der triangulierten Flächen an die Eingangsdaten erfolgt in GOCAD durch den iterativen Interpolations- und Approximationsalgorithmus DSI (Discrete Smooth Interpolator, Mallet 1992a, 1992b, 2002). Bei der Anpassung von Flächen mittels DSI werden verschiedene vorher definierte Randbedingungen berücksichtigt (z.B. Tiefenpunkte, Mächtigkeit, Sprunghöhe an Störungen, Bewegung von Flächenrändern), dies ermöglicht eine flexible Modifizierung von 3D-Geometrieobjekten. Alternativ zur manuellen Modellkonstruktion können auch Workflows verwendet werden, die den Nutzer in eher automatisierten Schritten durch den Modellierungsprozess leiten (GOCAD Structural Modelling Workflow, SKUA Structure & Stratigraphy Workflow). Mit SKUA, als Ergänzung zu GOCAD in Form von Workflows implementiert, wurde eine komplett neue Methodik der 3D-Modellierung eingeführt (Mallet 2004, Geochron Model, UVT Transform). Die inhaltlichen Details können dem Artikel von Mallet (2004) entnommen werden und sind in verkürzter Form im SKUA-GOCAD User Manual beschrieben. Im Verlauf des SKUA Workflows werden auf der Grundlage der Eingangsdaten konsistente Grenzflächen erzeugt und zeitgleich ein Volumenmodell berechnet. Der Workflow weist Vor- und Nachteile auf, die in Abhängigkeit von den Eingangsdaten und der geologischen Komplexität in unterschiedlichem Maße bestehen. Von Vorteil sind z.B. zusätzliche Funktionen bei der Modellierung des Störungssystems. Ein Nachteil ist, dass nach Nutzung des Workflows teils umfangreiche Nacharbeiten der Flächenkontakte der lithostratigraphischen Basisflächen notwendig sind. Im Teilprojekt 1 wurde die Modellierung mit den verfügbaren GOCAD Tools und Methoden vorgenommen, also eine manuelle Modellkonstruktion verfolgt.

Abfolge

Es wurden 13 litho- (seismo-) stratigraphische Horizonte von der Basis des Zechsteins bis zur Basis des Rupels für die Modellierung ausgewählt (Abb. 9). Die Basis des Zechsteins bzw. Top Prä-Zechstein Fläche gewährleisten einen lückenlosen unteren Abschluss des Modells. Die Basis Rupel stellt den obersten Horizont unter der Topographie dar. Im Gebiet Schleswig-Holstein und Hamburg sind tertiäre (und ältere) Einheiten teilweise nicht verbreitet. Dies ist vor allem auf Hebungsprozesse und Erosion im Bereich von Salzstrukturen zurückzuführen. Zur korrekten Darstellung der Ausbisse von tertiären und teils älteren Einheiten wurden zusätzlich die Horizonte Basis U. Miozän, Basis M. Miozän und Basis Quartär erstellt. Dies hat auch topologische Gründe, somit kann ein lückenloser oberer Abschluss aller Modellflächen erzielt werden. Diese Horizonte stellen eine notwendige Ergänzung dar und können bei Bedarf bereitgestellt werden. Darüber hinaus wurde zur topologisch konsistenten Darstellung eine geschlossene Version der Basis Rupel erstellt, die sich aus teils jüngeren Flächenteilen zusammensetzt.

Alter	Epoche	Stratigraphische Einheit	Definition nach GTA	Definition nach GPK	abgestimmte TUNB Horizonte
1,8 Ma	Quartär	Quartär			
		Pliozän			
24 Ma	Neogen (Jungtertiär)	Miozän			
		Oligozän	tolR	A1	„tolR/A1“
		Eozän			
65 Ma	Palaogen (Altertertiär)	Oberpaläozän	tpa	T1	„Transgression Känozoikum“
		Dan			
		Maastricht			
		Campan			
		Santon			
		Coniac			
		Turon			
99 Ma	Oberkreide	Cenoman	kro	B2/T2	„Alb-Cenoman-Transgression“
		Alb			
		Apt			
		Barrême			
		Hauterive			
		Valangin			
144 Ma	Unterkreide	Berrias = Wealden	kru	T4'	Basis „Marine Unterkreide“
		Serpulit			
		Munder Mergel			
		Eimbeckhäuser P.-K.			
		Gigas-Schichten			
		Kimmeridge			
		Korallenoolith			
159 Ma	Oberjura (Malm)	Heersumer Sch.	Basis jo +Wealden	berechnet aus E1/E2	„Basis Malm“ (Basis Heersumer Schichten)
		Callovium	juto		
		Bathonium	(Top Posidonien-schiefer / Dörnten-Schiefer)		
180 Ma	Dogger (Mittlerer Jura)	Bajocium		L1	Basis Dogger einschließlich jurensis-aalensis-Schichten
		Aalenium			
		Toarcium			
		Pliensbachium			
206 Ma	Lias (Unterer Jura)	Sinemurium	juhe	in BB und MV berechnet aus K2/T7 in ST Reflektor L4	Basis „Lias“
		Hettangium	(Basis Hettang)		
		Rhat	?	berechnet aus K2/T7	Basis „Rhätkeuper“
		Steinmergelkeuper			
		Oberer Gipskeuper			
		Schilfsandstein			
		Unterer Gipskeuper			
231 Ma	Keuper	Lettenkeuper	k (Basis Lettenkeuper)	M1	Basis Keuper einschließlich Oberer Hauptmuschelkalk
		Ob. Muschelkalk			
240 Ma	Muschelkalk	Mittl. Muschelkalk	so (Basis Salinarrot)	berechnet aus S1- oder S1/S2	Basis Oberer Buntsandstein“ (Basis Salinarrot)
		Unt. Muschelkalk			
	Ob.Buntsandstein	Röt			
		Solling-Folge			
		Hardeggen-Folge			
		Detfuth-Folge			
		Volpriehausen-Folge	berechnet aus Restmächtigkeitskarten des GTA	berechnet aus S3	Basis Mittlerer Buntsandstein“ (Basis Volpriehausen/Quickborn)
		Bernburg-Folge	Reflektor Oberfläche Zechstein Salinar		
251 Ma	Unt. Buntsandstein	Calvorde-Folge		X1	Basis Buntsandstein“ Top Zechstein
		Möln-Zyklus			
		Friesland-Zyklus			
		Ohre-Zyklus			
		Aller-Zyklus			
		Leine-Zyklus			
		Stäufurt-Zyklus	berechnet aus z2Na	berechnet aus Z1	
258 Ma	Zechstein	Werra-Zyklus			
		Oberrotliegend			Basis Zechstein Top Prä-Zechstein

Abb. 9: Stratigraphische Übersicht der TUNB Horizonte.

Workflow

In der ersten Phase der Modellierung wurden alle verfügbaren und relevanten Eingangsdaten wie Bohrdaten / Bohrmarker, seismische Auswertungen, frühere Modelle, Verbreitungs- und Tiefenlinien (GTA oder andere Quellen), Mächtigkeitsdaten und geologische Profile aufbereitet, visualisiert und geprüft. Zu Beginn der Modellierung wurde die Basis Quartär konstruiert, da sie für tiefere Flächen und oberflächennahe Störungen benötigt wird. Es folgte

dann die Konstruktion der Störungsflächen. Im nächsten Schritt wurden zunächst tertiäre Horizonte konstruiert, die für die Dachkonstruktion von Salzdiapiren notwendig waren. Dann wurden die Salzdiapire modelliert, deren Dachbereiche in das Tertiär oder an die Oberfläche reichen. Es folgte die Flächenkonstruktion der Horizonte Basis M. Miozän bis U. Kreide. Anschließend wurden nun alle übrigen Salzstrukturen modelliert, deren Dachflächen meist aus den abdeckenden Horizonten Basis U. Kreide, O. Kreide und O. Paläozän generiert werden. Im weiteren Verlauf der Modellierung erfolgte die Konstruktion der Basisflächen Basis O. Jura bis Basis Zechstein.

Zur Konstruktion der Basis O. Keuper wurde eine Topfläche O. Keuper aus mehreren Flächenteilen zusammengesetzt und Punktdaten mittels den Mächtigkeitsdaten des GTA auf die Basis gerechnet. Die Basis M. Buntsandstein wurde hingegen von der Basis U. Buntsandstein ausgehend aufwärts mit den GTA Mächtigkeitsdaten des U. Buntsandsteins berechnet. Im Zuge der Konstruktion der Basis Zechstein Fläche wurde die Top Prä-Zechstein Fläche erstellt. Hierbei handelt es sich um eine leicht generalisierte Version der Basis Zechstein ohne Lücken (Rotliegendesalz-Durchbrüche). Für die Modellierung wurde das Vorgängermodell aus dem GeotIS-StörTief Projekt übernommen (Strukturmodell SH, Thomsen et al. 2017) und weiterentwickelt, viele Flächen sind komplett neu konstruiert worden. Im Folgenden werden die Modellierungsarbeiten näher erläutert.

Störungen

Im Gebiet des Teilprojektes sind Störungen vor allem Abschiebungen. Aufschiebungen sind im lokalen Maßstab im Randbereich von Salzdiapiren belegt. Bei den Störungssystemen handelt es sich um Scheitelstörungen im Firstbereich von Salzstrukturen sowie um tieferreichende Störungen zwischen und in Verlängerung der Salzstrukturen. Die Störungen wurden horizontübergreifend aus den Strukturkarten des GTA abgeleitet und mit den Befunden aus seismischen Profilen qualitativ abgeglichen. In Teilbereichen wurden seismische Interpretationen in die Modellierung einbezogen. Darüber hinaus sind Informationen aus Bohrungen in die Störungsmodellierung eingeflossen.

Versätze an Störungen sind in den Karten des GTA vertikal dargestellt (Abb. 10). Die Störungsspuren liegen auf halber Sprunghöhe und besitzen im digitalen Datensatz keine Informationen zur Tiefe. Daher wurden die Störungsspuren der 14 GTA Einheiten aus dem Basismodell SH (GTA3D) extrahiert (*fault center lines*, Abb. 10).

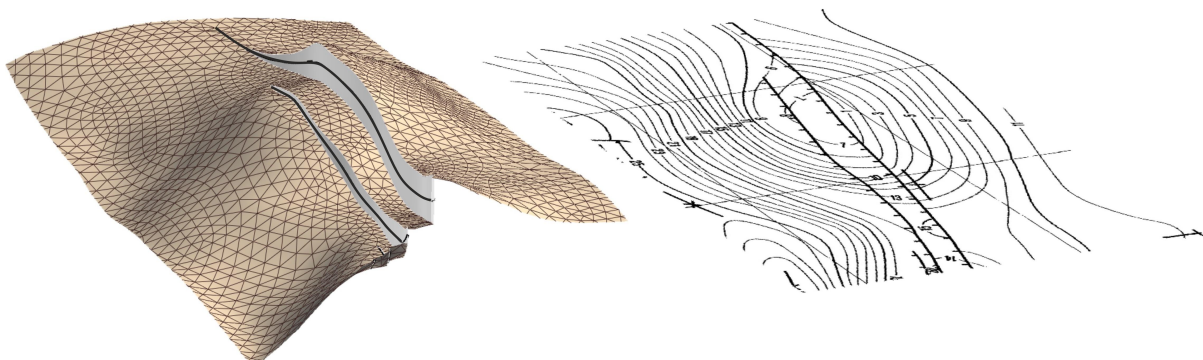


Abb. 10 (aus Thomsen et al. 2017): **Links:** Ausschnitt der Basisfläche O. Buntsandstein aus dem Basismodell SH (GTA3D) zur Darstellung der Störungsspuren. Die Lücken zwischen den Kontakten an Störungen wurden durch vertikale Flächen geschlossen (grau) und *fault center lines* erzeugt (schwarze Linien). **Rechts:** Ausschnitt eines Scans des GTA Tiefenlinienplans O. Buntsandstein. Dargestellt sind Tiefenlinien, Störungsspuren sowie Sattel- und Muldenachsen.

Durch die Extraktion der Tiefenlage der Störungsspuren aus dem GTA Modell können die Störungsspuren in ihrer jeweiligen Tiefenlage dargestellt und für die Ableitung von Störungsflächen verwendet werden. Bei der Flächenkonstruktion wurden diese Linien jedoch nicht direkt verbunden, da laterale und vertikale Ungenauigkeiten ausgeglichen und korrigiert werden müssen (Abb. 11).

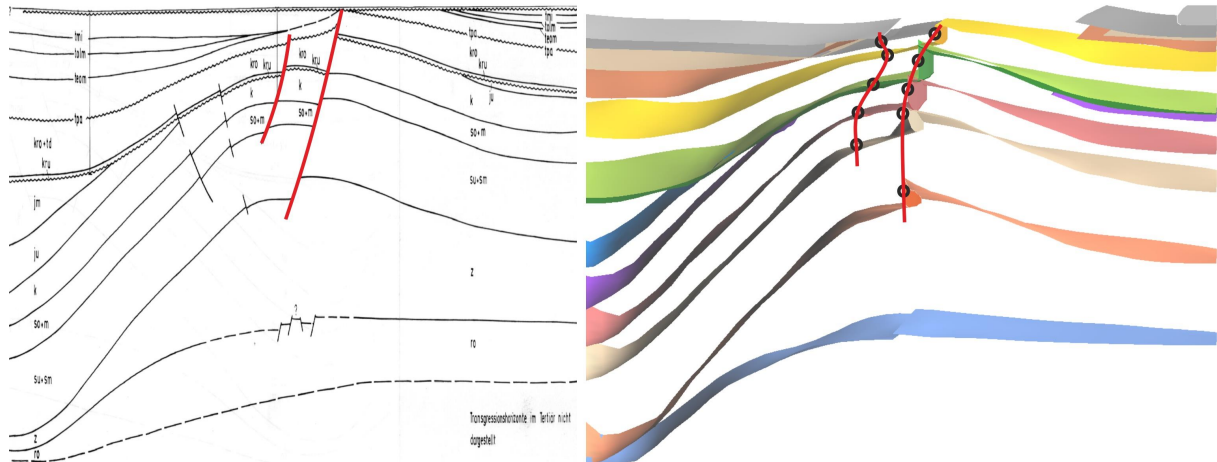


Abb. 11 (aus Thomsen et al. 2017): **Links:** Darstellung von Störungen in einem geologischen Profil des GTA 1.100.000. **Rechts:** Zum Vergleich - vertikaler Schnitt des Basismodells SH (GTA3D). Die direkte Verbindung der Störungsspuren (schwarze Punkte, rote Linien; Plön-Segeberg Störungszone) führt zu unrealistischen Geometrien.

Zur Konstruktion von Störungsflächen wurden auf vertikalen Ebenen von 3D Voxets Störungslinien (*fault sticks*) digitalisiert. Hierbei wurden Störungsspuren des GTA herangezogen (Abb. 12) und Informationen aus geologischen Profilen und seismischen Auswertungen integriert. Falls notwendig wurden auch Bohrmarker einbezogen. Die Störungsspuren des GTA wurden jeweils geprüft und in unterschiedlichem Maße beachtet. In widersprüchlichen Bereichen beispielsweise, die durch geologische Profile (GTA 1:100.000) oder seismische Interpretationen abgedeckt sind, wurden Korrekturen oder komplette Neuinterpretationen vorgenommen (z.B. Scheitelstörungen Geesthacht-Hohenhorn). Lagen zusätzliche Daten nicht vor, wurde eine Generalisierung vorgenommen. Mit Hilfe der Linien wurden Flächen konstruiert, die abschließend leicht geglättet und mit kreuzenden Flächen verschnitten wurden. Sekundäre Störungen geringer Ausdehnung (oder mit Versatz eines Horizontes) wurden nicht modelliert. Die Störungen an der Basis des Zechsteins sind meist durch die Salinare von hangenden Störungen entkoppelt. Hauptstörungen bzw. Sockelstörungen liegen teils unter Salzstrukturen und sind daher oft nur indirekt detektierbar. In wenigen Strukturzonen sind durchlaufende Störungen dokumentiert oder zumindest wahrscheinlich (Langsee Störungszone, Flensburg-Sieverstedter Störungszone, Itzehoe-Loof Störungszone). Bei der Modellierung wurden vor allem Hauptstörungen berücksichtigt. Im GTA sind viele sekundäre Störungen kartiert worden, die sich zum Teil nicht bestätigen lassen und deren Einfallen und Reichweite unbekannt ist.

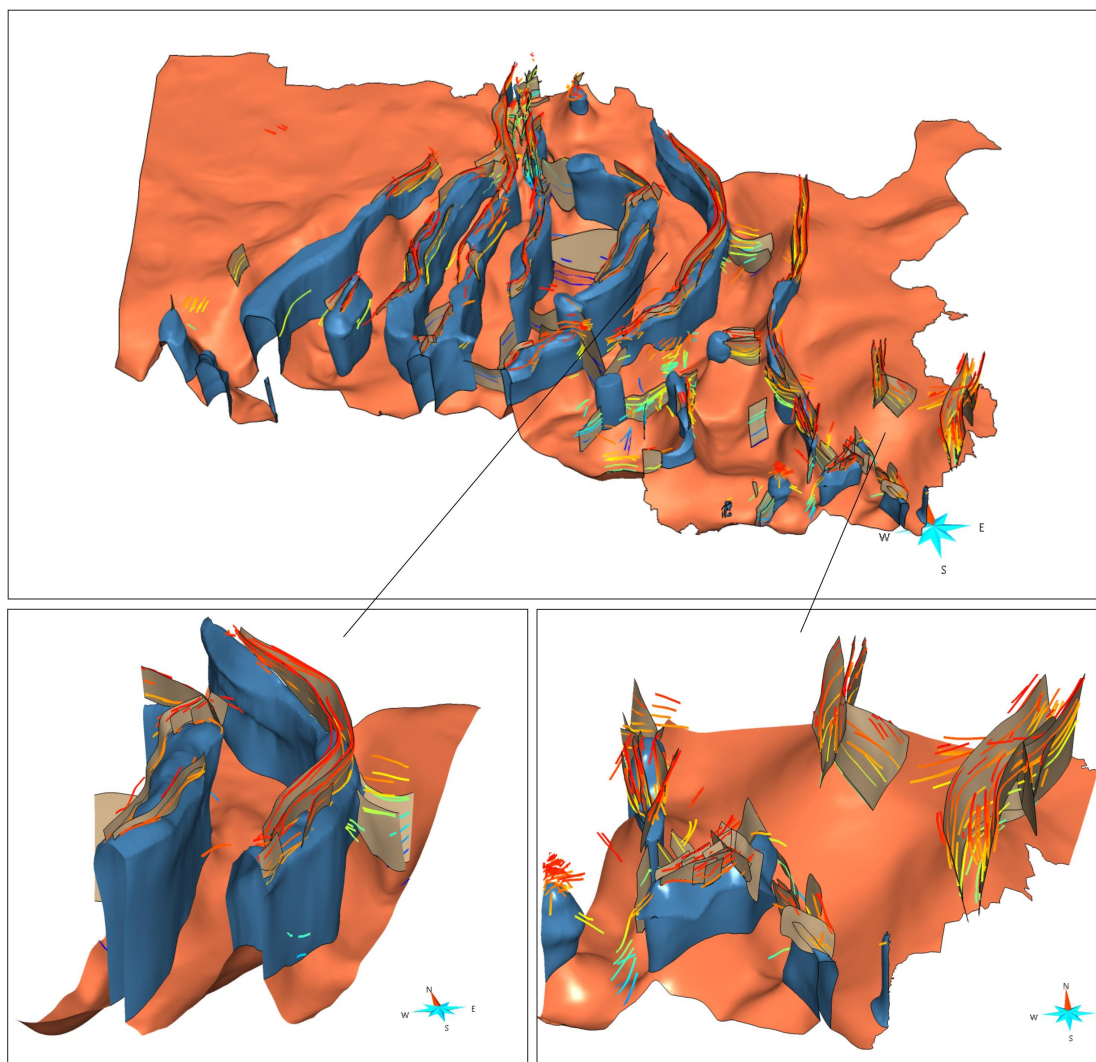


Abb. 12: Störungsspuren des GTA (farbkodiert nach Tiefe) und Störungsflächen des TUNB Modells (beige). Die Basis Buntsandstein (orange) und Hüllflächen der Salzstrukturen (blau) dienen der strukturellen Orientierung. **Unten links:** Störungsflächen im Dachbereich der Salzstrukturen wurden auf Grundlage der GTA Störungsspuren modelliert. **Unten rechts:** In diesem Gebiet erfolgte eine Re-Interpretation von seismischen Profilen (Strukturen im S und E), Störungsspuren des GTA wurden zum Teil verworfen.

Salzstrukturen

Der Glückstadt-Graben weist eine Vielzahl von Salzmauern und Salzdiapiren auf. Es handelt sich in vielen Fällen um Doppelsalinare, bestehend aus Zechstein- und Rotliegendesalzfolgen. Im zentralen Bereich liegen die Dachbereiche in Teufen von etwa 500 – 1500 m, in den jüngeren randlichen Zonen des Grabens (Westholstein-, Ostholstein- und Hamburger Trog) erreichen die Salzstrukturen den oberflächennahen Untergrund und teilweise die Oberfläche. Im 3D-Modell werden Salzstrukturen durch triangulierte Hüllflächen dargestellt, die aus mehreren Teilflächen zusammengesetzt werden und an der Durchbruchposition Basis Buntsandstein abschließen. Sie bestehen aus vertikal undulierenden Flächen der Flanken und Dachflächen, die aus exakten Kopien der abdeckenden Horizonte zusammengesetzt werden (Abb. 13). In speziellen Fällen wurden auch Teilstücke von Störungsflächen direkt in die Hüllflächen integriert (z.B. Langsee). Trotz doppelter Grenzflächen im Dachbereich, haben Tests ergeben, dass aus einem solchen Grenzflächenmodell ein Volumenmodell konstruiert werden kann.

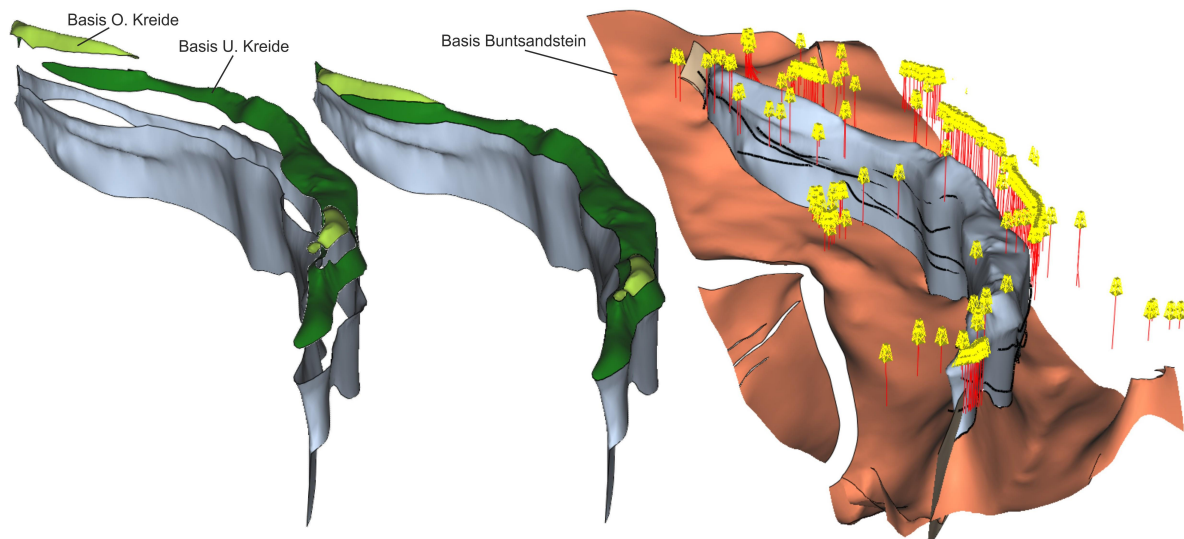


Abb. 13 (aus Thomsen et al. 2017): **Links/Mitte:** Prinzipielle Darstellung der Einzelkomponenten des Modells der Salzstruktur Waabs-Moenkloh (Strukturmodell SH 2016, Versätze an Störungen sind im TUNB Modell enthalten). **Rechts:** Hüllfläche der Salzstruktur Waabs-Moenkloh, Bohrungen und Salzstock - Verbreitungslinien aus dem GTA (Schwarz).

Die Dachflächen der Salzstrukturen sind meist durch seismische Daten und teils durch Bohrungen gut kartierbar und belegt. Sie wurden aus den abdeckenden lithostratigraphischen Grenzflächen abgeleitet und zusätzlich durch Top-Perm Marker der Bohrungen geprüft. Entsprechend der Grenzflächen weisen die Dachflächen Versätze an Störungen auf. Viele Salzstrukturen sind lediglich durch einzelne Bohrungen belegt. Lokal gibt es jedoch auch Bereiche, die eine sehr hohe Bohrungsdichte aufweisen (z.B. Heide - Hemmingstedt) und in denen die Berücksichtigung aller Bohrmarker maßstabsbedingt nicht möglich war. Die Verbreitung der Dachbereiche wurde den Karten des GTA entnommen und ebenfalls durch Bohrungen überprüft. Eine Differenzierung des Caprocks wurde nicht vorgenommen. Dies ist lediglich lokal möglich und erfordert für die räumliche Darstellung eine sehr gute Datenbasis. Für die Darstellung der Flanken wurden die Verbreitungsgrenzen der GTA Strukturkarten des Typs „Kontakt Salzstruktur“ verwendet. Sie wurden aus dem Basismodell SH (GTA3D) extrahiert, um sie in der jeweiligen Tiefenlage visualisieren zu können (Abb. 13, Rechts). Zur Konstruktion der Flächen wurden zunächst Hilfslinien auf vertikalen Ebenen digitalisiert. Auf der Grundlage der Linien erfolgte die Flächenkonstruktion und im finalen Schritt eine leichte Glättung und Optimierung der Vermaschung. Bohrungen im Randbereich sind berücksichtigt worden. In einzelnen Fällen wurde die Position der Flanken der Salzstrukturen durch seismische Profile abgeschätzt. Das Modell der Salzstrukturen des Strukturmodells SH 2016 (Thomsen et al. 2017) wurde im TUNB Projekt weiterentwickelt. Neben der kompletten Neukonstruktion einiger Salzstrukturen wurden die Dachbereiche fast ausnahmslos neu konstruiert.

Lithostratigraphische Grenzflächen

Die Modellierung der lithostratigraphischen Basisflächen erfolgte im Wesentlichen anhand der Strukturkarten des GTA im Maßstab 1:300.000. Die Daten wurden einer Plausibilitäts- und Konsistenzprüfung unterzogen. In Bereichen mit geometrischen Widersprüchen und/oder

inhaltlichen Unklarheiten wurde ergänzend der GTA 1:100.000 in die Bearbeitung einbezogen. Für das Strukturverständnis wurden die Profile des GTA im Maßstab 1:100.000 verwendet.

Für die Basis O. Paläozän, O. Kreide und U. Kreide wurden die Tiefenlinien des GTA 1:100.000 sowie die Verbreitungslinien des GTA 1:300.000 verwendet. Vergleiche zwischen den GTA Datensätzen haben gezeigt, dass der GTA 1:100.000 eine etwas genauere Darstellung erlaubt und dass diese drei Tiefenlinienpläne nicht mehr grundlegend verändert wurden.

Die Basisflächen wurden anhand der Bohrdaten der KW-Industrie verifiziert und überarbeitet und in Teilbereichen mit dem Strukturverlauf auf seismischen Profilen inhaltlich abgeglichen. In oberflächennahen Bereichen wurden außerdem die tieferen stratifizierten Bohrungen der Hydrogeologie mit integriert. Die Modellierung der Basisflächen des Rhäts und mittleren Buntsandsteins erfolgte anhand der Restmächtigkeitskarten des GTA.

Die Arbeitsgebiete wurden um einen 6 km breiten Überlappungsstreifen zu den Nachbargebieten erweitert, um die Passgenauigkeit zu gewähren. Der Zuschnitt auf die Grenzen des jeweiligen Arbeitsgebietes erfolgte nach Abschluss der Arbeiten. Anfangs wurden zunächst die Eingangsdaten überprüft, um Fehler schon lokal korrigieren zu können. Es wurde dann eine grobe, homogen vermaschte Fläche (Knotenpunktabstand in etwa 5 km) in mittlerer Tiefe der Eingangsdaten generiert. Eine erste Anpassung an die Eingangsdaten erfolgte in zwei Durchläufen, zwischen denen eine Teilung der Dreiecke zur Erhöhung der Auflösung vorgenommen wurde. Im Anschluss wurde die Fläche mit dem Störungsmodell, Salzdiapirmodell und Verbreitungsgrenzen von Ausbissen an Diskordanzen verschnitten, überflüssige Flächenteile entfernt und die Triangulation an Flächengrenzen optimiert. Nach Fixierung aller Flächengrenzen wurde eine letzte Dreiecksteilung und Anpassung an Tiefenpunkte vorgenommen. Der Abstand der Knotenpunkte liegt nach dieser letzten iterativen Anpassung bei etwa 300 – 800 m. In der zweiten Phase wurden zunächst sämtliche Flächengrenzen bzw. Ausbisse an Störungen, Salzstrukturen und Diskordanzen angepasst und korrigiert. Die Bearbeitung erfolgte regional und umfasste auch die Nahbereiche der Flächengrenzen. Wichtig hierbei war die Vermeidung von Artefakten (z.B. Spline-Überschwinger, abrupte nicht belegte Änderung von Schichtverläufen), die Korrektur von Horizontüberschneidungen sowie das Erreichen von möglichst realistischen Schichtverläufen und topologischer Konsistenz. Korrekturen durch KW-Bohrungen und hydrogeologische Bohrungen sowie lokal durch seismische Auswertungen wurden im weiteren Verlauf der Arbeiten regional im gesamten Verbreitungsgebiet durchgeführt. Die Versätze an den Störungen wurden individuell auf Grundlage des GTA konstruiert, in Teilbereichen wurden auch seismische Auswertungen verwendet. Bei der Modellierung wurde auf eine möglichst hohe topologische Konsistenz geachtet. Dies bedeutet, dass Flächenkontakte und Tripelpunkte zwischen drei Modellobjekten recht genau passen, sich jedoch nicht gemeinsame Knotenpunkte teilen (abgesehen von Salzstock Anschlüssen an der Basis Buntsandstein und Flächengrenzen an den Landesgrenzen). Die absolute topologische Konsistenz ist bei Bedarf vor bestimmten nachfolgenden Anwendungen herbeizuführen.

3.8 Grenzharmonisierung

Ein wichtiges Ziel des TUNB Projektes war die grenzübergreifende Abstimmung und Angleichung der 3D-Modelle. Die Abstimmungsarbeiten erfolgten an den Grenzen zu Niedersachsen und Mecklenburg-Vorpommern durch mehrere Abstimmungsgespräche. Es wurden Modelldaten ausgetauscht und abgeglichen und schließlich festgelegt, wo und auf welcher Seite der Grenze Änderungen und Anpassungen vorgenommen werden müssen.

Im nördlichen Bereich der Landesgrenze zu Mecklenburg-Vorpommern waren zwischen GTA und GPK (Regionales geophysikalisches Kartenwerk der DDR, Reinhardt et al. 1986-1989) geringe vertikale Horizontversätze festzustellen. Im Süden traten höhere Horizontversätze auf, die lokal bis über 200 m betrugen. Dieser Bereich ist auf Schleswig-Holsteinischer Seite generell schlecht durch Daten aus Bohrungen und Seismik abgedeckt. Die Horizontversätze wurden harmonisiert, indem die Horizonte auf beiden Seiten verbunden und mittels Interpolation geglättet wurden. Die Unterschiede werden vermutlich maßgeblich durch die unterschiedlichen Geschwindigkeitsmodelle und die Zeit-Tiefen Konversion verursacht. Weitere Unterschiede können durch Prozessierung und Interpretation der seismischen Profile entstehen. Eine Angleichung der Horizonte durch Homogenisierung der Geschwindigkeitsmodelle war im Projekt nicht möglich.

Entlang der Landesgrenze zu Niedersachsen basieren die Modelle auf den Daten des GTA, daher waren die Abweichungen der Horizonte eher gering. Größere lokale Abweichungen hatten verschiedene Ursachen. Für die Konstruktion der Basis M. Buntsandstein wurden z.B. verschiedene Mächtigkeitskarten verwendet (NI: M. Buntsandstein, SH/HH: U. Buntsandstein). Darüber hinaus entstehen Abweichungen auch durch die angewandte Methodik und Interpolation (SKUA Workflow vs. GOCAD manuell) sowie durch Interpretation und Generalisierung. Die Flächen wurden verbunden und mittels Interpolation geglättet, Ausbiss- und Störungsverläufe wurden angeglichen. Die finalen Flächen sind an der Grenze topologisch konsistent.

4 Ergebnisse und Auswertung

Mit den Kartenwerken GTA und GPK existieren flächendeckende Interpretationen von seismischen Profilen und Tiefbohrungen im gesamten Gebiet des Norddeutschen Beckens. Frühere und aktuelle Projekte verwendeten bzw. verwenden diese 2D Kartenwerke für Modellierungsprojekte, mit dem Ziel der weiteren Entwicklung dieser Interpretationen. Es stellt sich die Frage, ob eine komplette Neuauswertung aller Primärdaten zu einem besseren Ergebnis führen würde. In Gebieten mit vielen neueren 2D oder 3D Seismik Datensätzen ist dies sicher der Fall. Bedenkt man die Tatsache, dass der GTA in einem Zeitraum von 20 Jahren entstand und gegenwärtige Projekte eine Laufzeit von 3 – 4 Jahren besitzen, ist nachvollziehbar, dass die komplette Neukartierung nicht oder schwer umsetzbar ist. Vergleiche zwischen GTA Daten und seismischen Profilen zeigen, dass die Karten in vielen Bereichen sehr stimmig sind. Darüber hinaus gibt es jedoch Ungenauigkeiten, Widersprüche und Fehler sowie Bereiche, in denen die Interpretation (aufgrund der mäßigen Datenqualität der Seismik) nicht nachvollziehbar ist.

Nach der räumlichen Darstellung des GTA (GTA3D - Basismodell SH, Hese 2012, Rosenbaum et al. 2012) wurde die GTA Interpretation im Rahmen des TUNB Projektes weiterentwickelt und es entstand ein korrigiertes, konsistentes 3D-Modell des tieferen Untergrundes (Abb. 14, Abb. 15, Abb. 16, Abb. 17). Zudem gelang die Rekonstruktion des GTA Geschwindigkeitsmodells, das von Jaritz et al. (1991) erarbeitet und publiziert wurde. Damit ist man nun in der Lage, das Modell regional aufgrund von neuen Befunden / Interpretationen in der Zeit-Domäne weiterentwickeln zu können. Um eine verbesserte und für ganz Norddeutschland harmonisierte Zeit – Tiefen Konversion zu ermöglichen, sollte das GTA Geschwindigkeitsmodell weiterentwickelt werden.

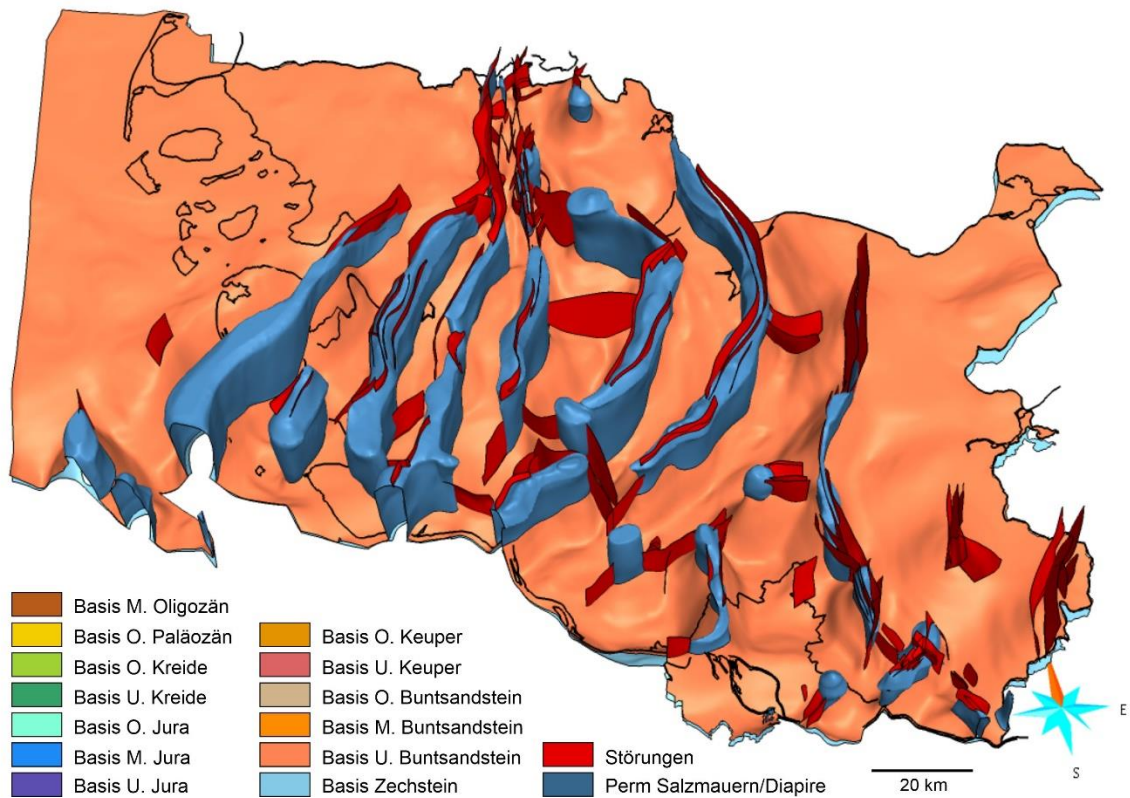


Abb. 14: Geologisches 3D-Modell SH / HH. Basis Zechstein, U. Buntsandstein, Salzstrukturen und Störungen (vert. Überhöhung: x3).

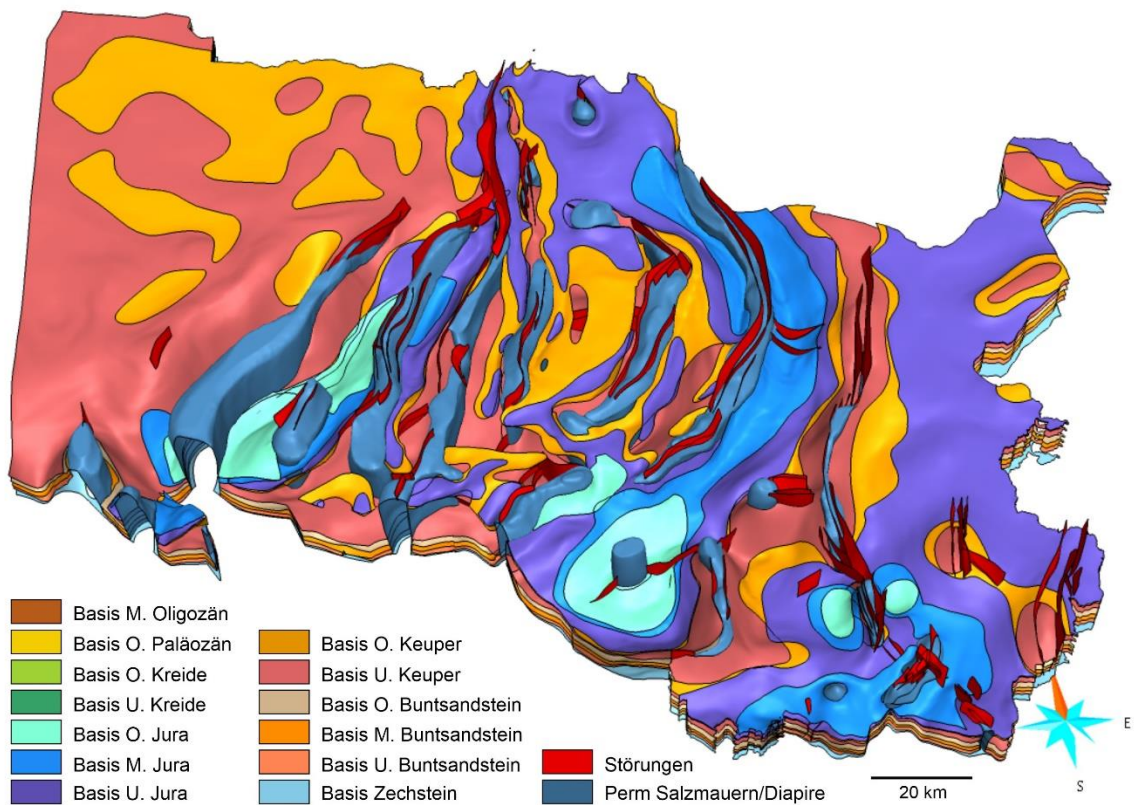


Abb. 15: Geologisches 3D-Modell SH / HH. Basis Zechstein bis Basis O. Jura, Salzstrukturen und Störungen (vert. Überhöhung: x3).

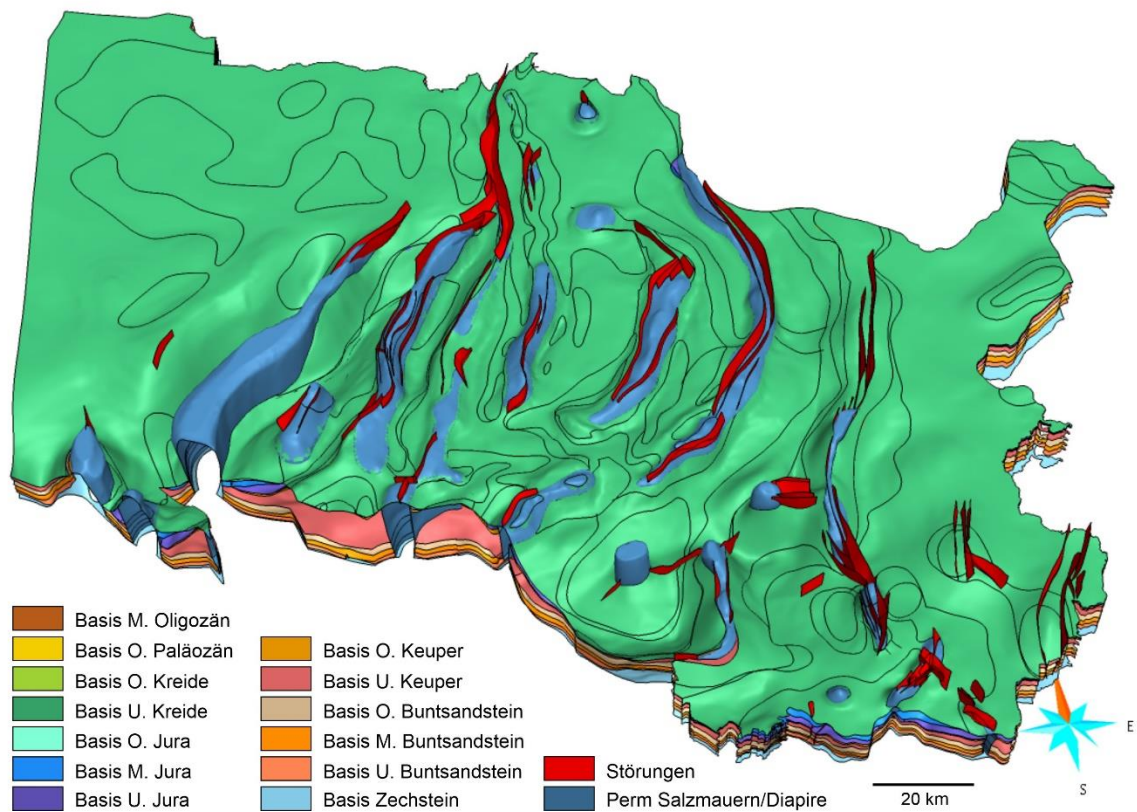


Abb. 16: Geologisches 3D-Modell SH / HH. Basis Zechstein bis Basis U. Kreide, Salzstrukturen und Störungen (vert. Überhöhung: x3).

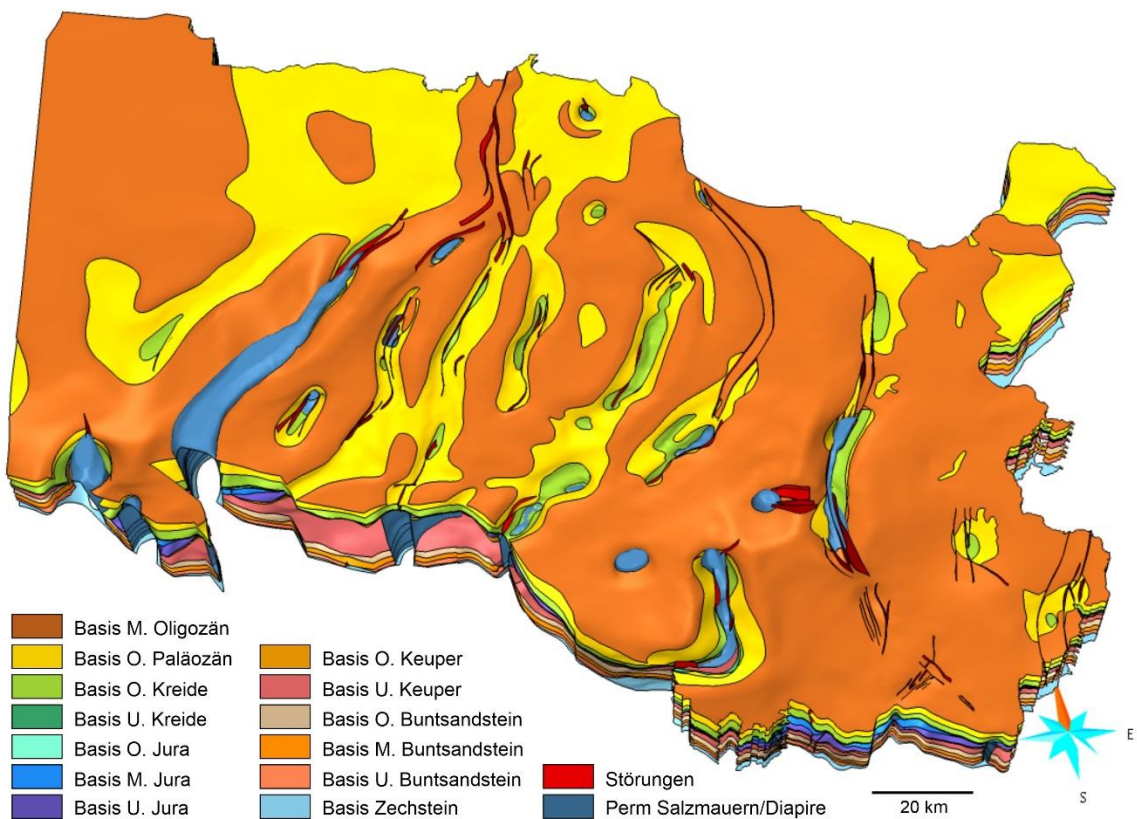


Abb. 17: Geologisches 3D-Modell SH / HH. Basis Zechstein bis Basis M. Oligozän, Salzstrukturen und Störungen (vert. Überhöhung: x3).

4.1 Modellbestandteile

Das Geologische 3D-Modell besteht aus 163 Störungsflächen, 22 Hüllkörpern von intrusiven Salzstrukturen (plus Teilkörper an der Landesgrenze) und 13 lithostratigraphischen Grenzflächen. Zusätzlich wurden Grenzflächen der Horizonte Top Basement, Basis U. Miozän, Basis M. Miozän und Basis Quartär entwickelt.

Ein wichtiger Schritt der Modellierung war die Konstruktion des Störungsmodells, das in vielen Bereichen mit Salzmauern und Diapiren zusammenhängt und eine konsistente Darstellung der Beckenstrukturen erlaubt. Der Westschleswig- und Ostholstein-Block begrenzen den Glückstadt-Graben im Westen und Osten und sind größtenteils störungsfrei. Störungen entstanden hier über Salzkissen in der Nähe der Ränder des Glückstadt Grabens. Sie reichen meist von der Basis des Buntsandsteins (bzw. aus dem Zechstein) bis in das jüngere Tertiär (Abb. 18, unten rechts, Beispiele Gudow, Nusse). Die tiefreichenden Störungen des Glückstadt-Grabens treten oft in Verlängerung von Salzmauern auf und sind N – S bis NNE – SSW orientiert. Darüber hinaus existieren Störungszonen, die quer zu Salzstrukturen W – E bis NW – SE orientiert sind. Untergeordnet sind auch NE – SW orientierte Störungen dokumentiert (Abb. 18, unten links). Im Dachbereich der Salzstrukturen (Kreide, Tertiär) entwickelten sich teils komplexe Scheitelgräben, die sich weit in den oberflächennahen Bereich erstrecken können (Abb. 18, unten rechts: Beispiele Hohenhorn, Siek, Sülfeld). Die Störungen verlaufen linear bis listrisch mit durchschnittlichen Fallwinkeln von 60 – 80°. Es handelt sich hierbei um Abschiebungen, Schrägabschiebungen und Blattverschiebungen. Es existieren bisher noch keine Anzeichen auf Inversionstektonik wie in südlichen Bereichen des Norddeutschen Beckens (Kockel 2003, Maystrenko et al. 2005). Man beobachtet einzelne oder mehrere parallele Abschiebungen, Graben- und Horst-Strukturen, sich kreuzende Abschiebungen, und auch kleinräumig vernetzte Störungen (Abb. 18, oben). In den Blockbereichen sind die Versätze mit 50 – 100 m gering, lokal werden 200 m erreicht. Die Versatzbeträge liegen im Graben meist bei 100 – 500 m, in einigen Bereichen werden 1000 – 2000 m erreicht.

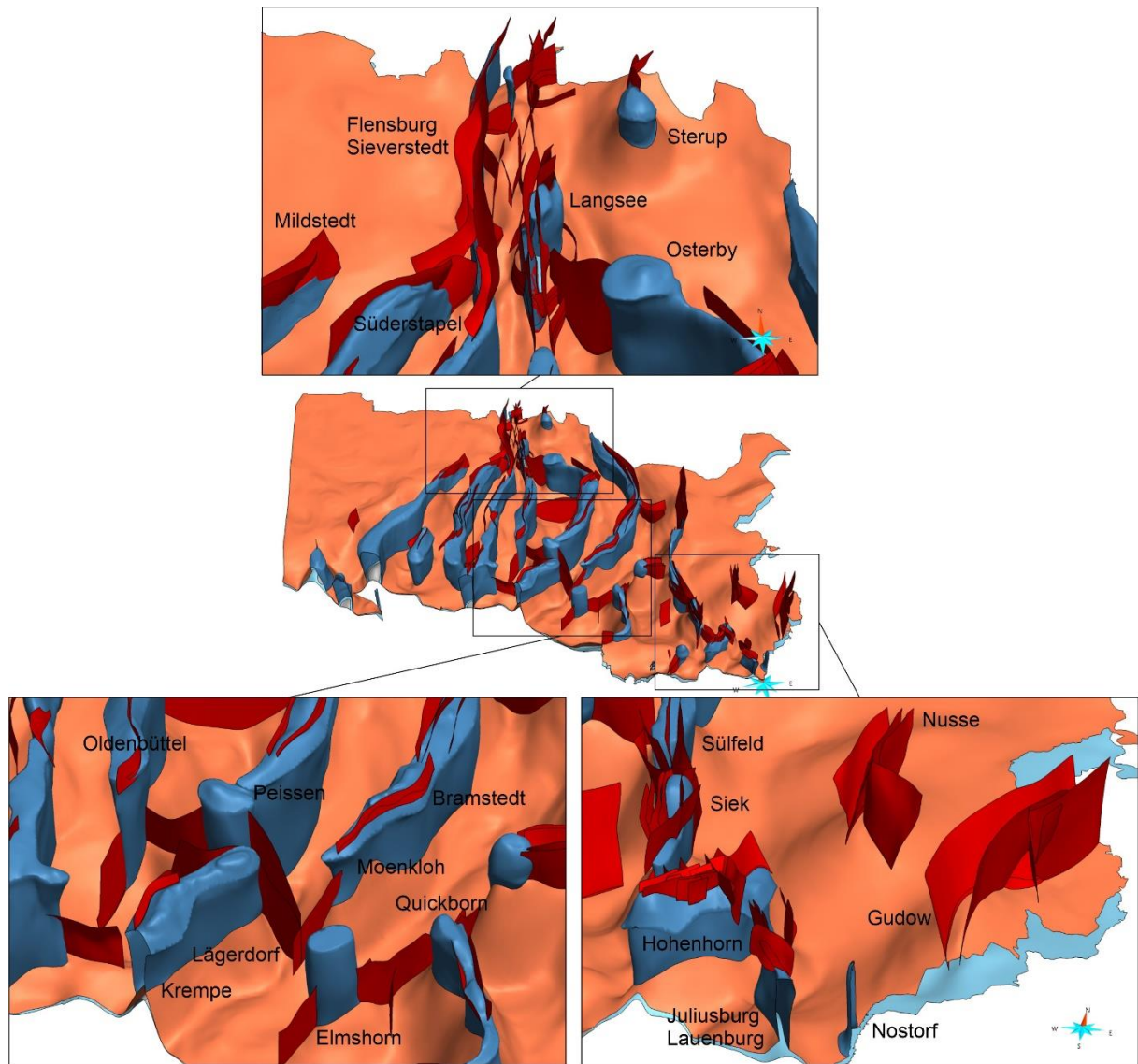


Abb. 18: Basis Zechstein (hellblau), U. Buntsandstein (orange), Salzmauern und Diapire des Perm (blau) sowie Störungsflächen (rot) des 3D-Modells (Überhöhung x3).

Das finale Störungsmuster stellt generalisierte Verläufe der Störungen dar. In der Regel werden mindestens drei Horizonte je Störung versetzt. Im Einzelfall wurde von der Regel abgewichen, wenn es strukturell sinnvoll erschien. Ziel war die Darstellung des Störungsinventars, das im GTA enthalten ist. Aufgrund von seismischen Auswertungen wurden Ergänzungen oder Neukartierungen vorgenommen. Untergeordnete Störungen mit geringen Versätzen wurden meist nicht berücksichtigt. Trotz unterschiedlich klaren Belegen für Störungsverläufe und Versätze konnte die Störungsmodellierung umgesetzt werden. Im Einzelnen ist exemplarisch Folgendes zu benennen:

- Der Vergleich zwischen Daten des GTA und seismischen Profilen zeigt ein heterogenes Bild. Viele Störungen sind gut nachvollziehbar und recht genau kartiert worden, andererseits sind einige GTA Interpretationen der Störungssysteme schlecht belegt und daher nicht nachvollziehbar oder auch nicht korrekt (z.B. falsche Korrelation von Störungen zwischen seismischen Profilen oder auch laterale Abweichungen). Soweit möglich, wurden Korrekturen durchgeführt.

- In den oberflächennahen Bereichen sind die seismischen Sektionen von mäßiger bis schlechter Qualität, sodass eine vom GTA unabhängige Störungs-Interpretation eingeschränkt oder nicht möglich ist. Die Bestimmung der Versatzbeträge an den Störungen gestaltete sich dementsprechend aus Mangel an Informationen ebenso als schwierig. Einzelne oberflächennahe Scheitelstörungen konnten bei geeigneter Datenlage mit Hilfe von hydrogeologischen Bohrungen abgeleitet werden.
- Störungsmuster sind des Öfteren mehrdeutig und schwer zwischen Profilen korrelierbar. Für Auswertungen einer Störungszone stehen meist nur wenige 2D Seismik Profile zur Verfügung – 3D Seismik Surveys liegen nur für zwei kleinere Gebiete vor (Preetz, Mittelplate / Büsum). In manchen Gebieten existieren daher höhere Unsicherheiten bezüglich der Interpretation und der räumlichen Auflösung.
- Einige Störungssysteme sind sehr kleinräumig komplex (z.B. Scheitelstörungen der Strukturen Heide oder Reitbrook, tiefe Störungen der Störungszone Flensburg-Sieverstedt-Langsee) und daher im Maßstab des Modells nur generalisiert darstellbar. Die Komplexität ist in Reitbrook und Heide durch hunderte KW-Bohrungen belegt.

Die Störungen im Bereich der Basis Zechstein sind aufgrund der Salinare meist von hangenden Systemen entkoppelt. Es existieren jedoch auch tiefreichende Störungen des Beckens, die in das Basement (bzw. Rotliegend und tiefer) hineinreichen (z.B. Struktur Langsee, Flensburg-Sieverstedt). In dem Tiefenlinienplan Basis Zechstein des GTA sind Hauptstörungen und sehr viele sekundäre Störungen verzeichnet, die oft nicht bestätigt werden können. Hauptstörungen liegen meist unter den Salzmauern und Diapiren und sind daher in den meisten Fällen nur indirekt seismisch belegt. Das Modell zeigt maßgeblich die Hauptstörungen. Viele sekundäre Störungen sind dagegen nicht enthalten.

Die Entwicklung des Glückstadt-Grabens wurde maßgeblich von halokinetischen Prozessen beeinflusst. Die Salzmauern und Diapire des Perm (Zechstein- und Rotliegend-Salinare) bildeten sich in Schwächezonen bzw. Störungszonen über Basement Störungen und entwickelten sich zunächst in den zentralen Bereichen des Grabens. Die Salzstrukturen werden dort heute von Abfolgen der Kreide, des Tertiärs und des Quartärs abgedeckt. Im Verlauf der Beckenentwicklung griff der Diapirismus zunehmend auf die äußeren Bereiche über. Die im Tertiär entstandenen Salzmauern und Diapire im Bereich des Westholstein-, Ostholstein- und Hamburger Troges sind weit in oberflächennahe Bereiche aufgestiegen (z.B. Oldenswort, Elmsborn, Quickborn) und erreichen zum Teil die Oberfläche (z.B. Segeberg). Diese örtlich und zeitlich unterschiedliche Entwicklung ist untrennbar mit tektonischen Prozessen verbunden. Das Störungsmodell wird daher durch das Modell der Salzstrukturen ergänzt und kann nur im Zusammenhang verstanden werden. Aufgrund der Schwierigkeit der lateralen Abgrenzung von Salzstrukturen im seismischen Abbild ergeben sich mehr oder weniger große Unsicherheiten des Modells. Es gibt Regionen mit hoher Bohrungsdichte in Salzstockrandlage (z.B. Warnau, Abb. 13), in denen genauere Untersuchungen möglich sind. Einerseits ist das Modell durch zusätzliche Daten abgesichert und die Unsicherheit der Lokalisierung geringer, andererseits belegen diese Daten auch eine lokal hohe nicht darstellbare Komplexität der Flankenbereiche. Die seismische Bestimmung der vertikalen Ausdehnung der Salzdiapire ist präziser möglich und teils zusätzlich durch Bohrdaten abgesichert. Einige Salzmauern oder Diapire werden jedoch lediglich randlich oder gar nicht von seismischen Daten überdeckt und sind daher mit höheren Unsicherheiten belegt (z.B. Osterby, Quickborn-Schnelsen-Langfenelde). Vergleiche zwischen dem Salzstockmodell und seismischen Profilen in der Zeit-Domäne zeigen, dass in vielen Bereichen bereits eine zufriedenstellende Genauigkeit der ungefähren Position gegeben ist (soweit durch Seismik bestimmbar). Es gibt jedoch auch noch regional begrenzt Abweichungen. Trotz bereits

durchgeführter Korrekturen, verbleiben noch Anpassungsarbeiten, da eine landesweite Re-Interpretation der Seismik nicht möglich war. Eine besondere Struktur ist der Salzdiapir Nostorf, da sie genau auf der Grenze zu Mecklenburg-Vorpommern liegt und aus GTA Daten nicht rekonstruierbar war. Es gibt Hinweise auf die Existenz, jedoch keine konsistenten Verbreitungslinien in den Strukturkarten. Die Struktur wurde auf der Seite von Mecklenburg-Vorpommern modelliert. Der geringe westliche Teil wurde in das Modell von Schleswig-Holstein und Hamburg integriert. Das Modell der Salzmauern und Salzdiapire erlaubt einen kompletten räumlichen Überblick, verdeutlicht die strukturellen Zusammenhänge (Abb. 19) und ist für zukünftige Anwendungen sinnvoll einsetzbar.

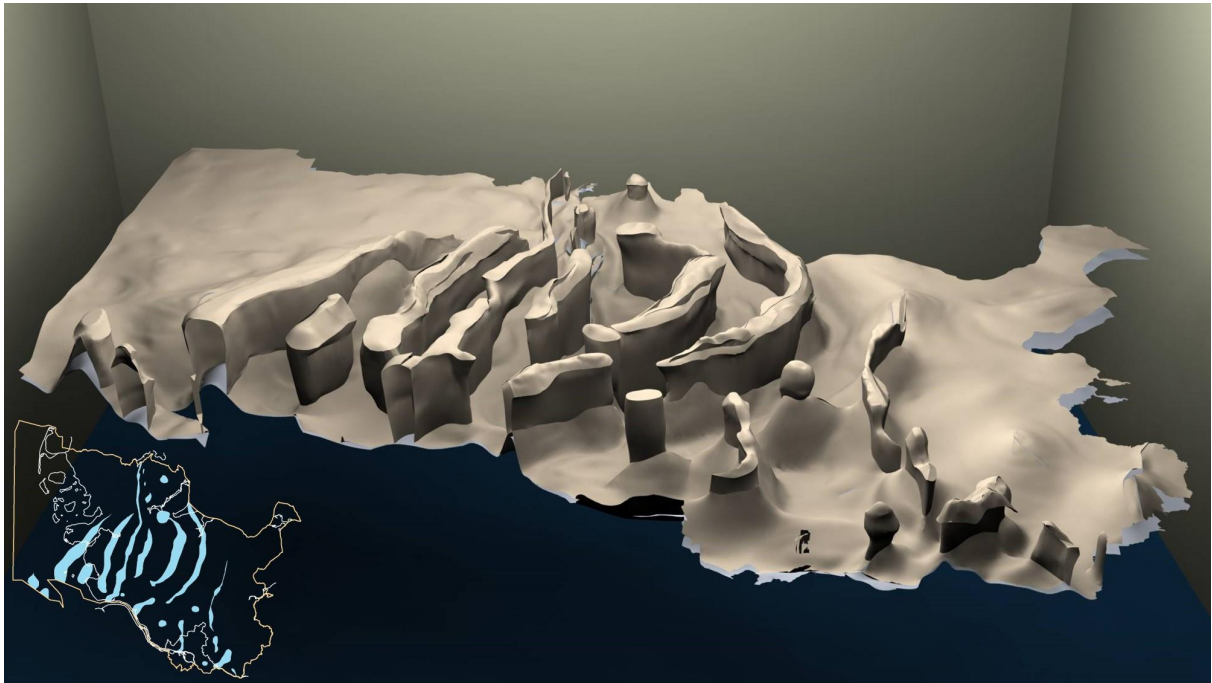


Abb. 19: Top Perm (Basis Buntsandstein und Hüllflächen der Salzstrukturen, beige) und Basis Zechstein (hellblau) des Geologischen 3D-Modells SH/HH. Zur Visualisierung des Modells wurde die 3D Raytracing- und Animations-Software Blender verwendet (www.blender.org).

Das Geologische 3D-Modell besteht aus 13 lithostratigraphischen Grenzflächen zwischen der Basis Zechsteins und der Basis des Rupels. Zusätzlich wurden Grenzflächen der Horizonte Top Basement, Basis U. Miozän, Basis M. Miozän und Basis Quartär konstruiert. Somit gelang eine recht vollständige und räumlich konsistente Darstellung der Schichtenfolge des Norddeutschen Beckens in Schleswig-Holstein und Hamburg.

Das Tertiär wurde durch die Basis des Rupels und die hangenden zusätzlichen Grenzflächen differenziert und je nach geologischer Situation und Datenverfügbarkeit modelliert aus Informationen der vorhandenen Kartenwerke (GTA und Projekt COOSKA), Seismik, sowie Markern aus Tiefbohrungen und hydrogeologischen Bohrungen (Abb. 20). Die Arbeiten zur Überprüfung und Verifizierung der Basisflächen des Tertiärs haben gezeigt, dass die Darstellungen im GTA Widersprüche zu hydrogeologischen Bohrungen aufweisen. Dasselbe gilt für die Informationen aus den Bohrungen und seismischen Profilen der KW-Industrie. Es treten in manchen Bereichen Tiefendifferenzen von bis zu 200 m auf, die zum Teil vermutlich auch durch das verwendete Geschwindigkeitsmodell verursacht werden. Die seismische Bearbeitung ist in vielen Bereichen erschwert, da die tertiären Schichten häufig zu oberflächennah sind und teilweise auch keine Reflektionen ausbilden. Zudem sind die tertiären stratigraphischen Ansprachen in KW-Bohrungen oft ungenau. Deswegen wurden die tieferen

hydrogeologischen Bohrungen herangezogen, die oft sehr detailliert angesprochen und gut belegt sind.

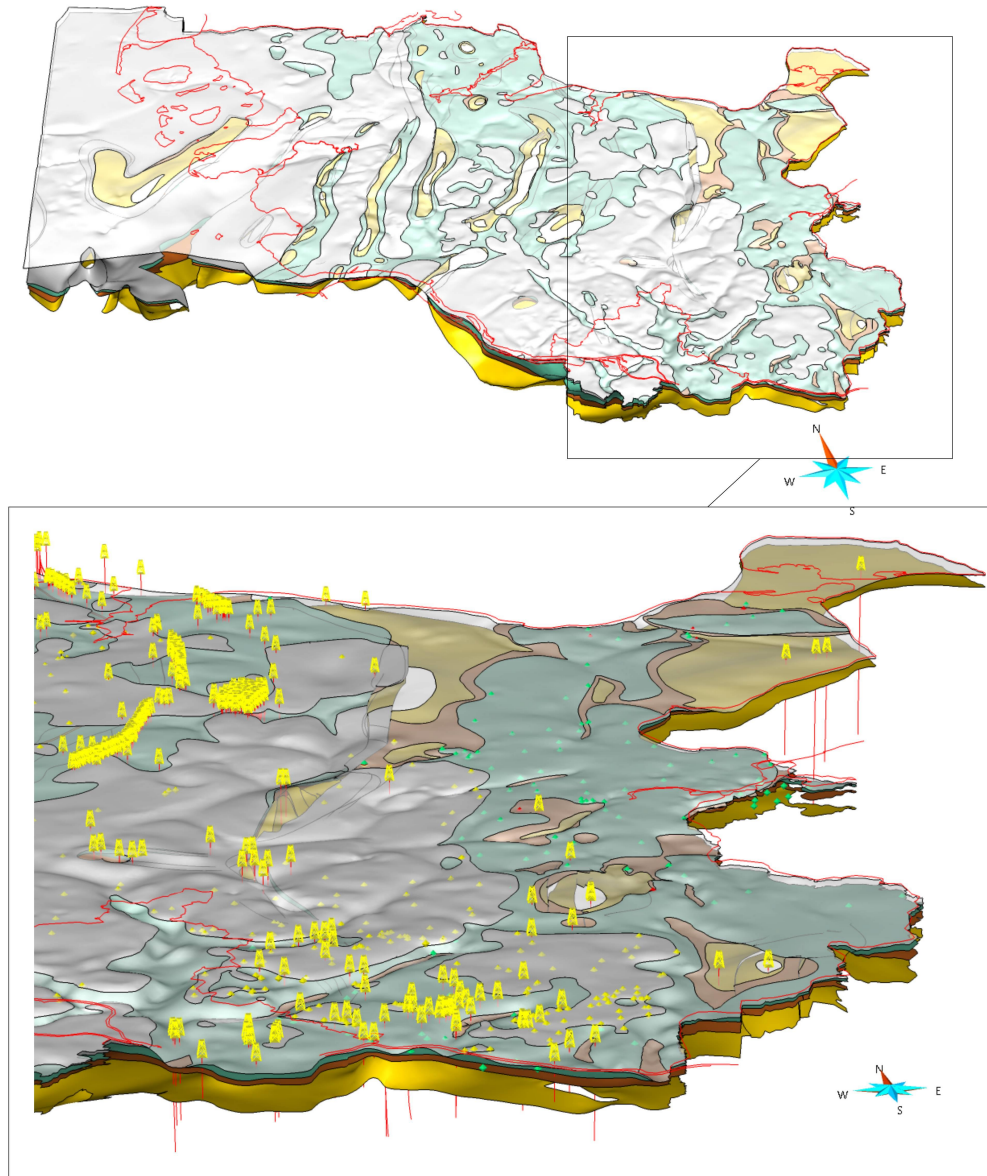


Abb. 20: Tertiäre Modellflächen Basis O. Paläozän (gelb), M. Oligozän (braun), U. Miozän (grün), M. Miozän (grau) und Quartär (halbtransparent). Unten: Ausschnittsvergrößerung des östlichen Teils des Modellgebietes. Tertiäre Modellflächen mit KW-Bohrungen (Bohrtürme) und Bohrmarkern von Hydrobohrungen.

Die neu modellierten Flächen weichen daher teils deutlich von den Darstellungen im GTA bzw. von der stratigraphischen Ansprache der Bohrungen aus der KW-Industrie ab. Dies ist vor allem im Osten der Fall, im Nordwesten sind die Abweichungen geringer und im Südwesten liegen aufgrund der Tiefe der Tröge für das Miozän und den Rupel kaum Marker von hydrogeologischen Bohrungen vor. In diesen Bereichen sind die Horizonte durch Daten der GTA und COOSKA Projekte sowie durch KW-Bohrungen belegt. Im GTA sind deutlich wechselnde und nicht immer nachvollziehbare Ausbissverläufe von mehreren Horizonten an Diskordanzen kartiert worden. Bei der Modellierung wurden die meisten Ausbisse plausibel

und oft aufgrund von Bohrmarkern korrigiert. In Teilbereichen wurden kleinräumig wechselnde Schichtausbisse auch übernommen.

Die Basis der U. Kreide ist eine Hauptdiskordanz in der gesamten Region. Die Kreide deckt die tieferen Formationen nahezu vollständig ab. Sie wird (vor allem in den äußeren Bereichen des Glückstadt-Grabens) von Salzmauern und Diapiren durchörtert und fehlt aufgrund von späteren Hebungsbewegungen in wenigen Bereichen komplett. Die Top- und Basisreflektoren der Oberkreide sind in seismischen Daten recht gut erkennbar. Die genaue Kartierung der Unterkreide kann aufgrund der teils recht geringen Mächtigkeit erschwert sein. Der Reflektor Basis Unterkreide ist meist aufgrund der klaren Diskordanz gut verfolgbar. In Dachbereichen von Salzstrukturen ist eine genaue Differenzierung zwischen Caprock und Unterkreide manchmal nicht möglich. Die Modellflächen basieren auf den GTA Daten und wurden hinsichtlich Verbreitung und Tiefenlage korrigiert. In den GTA Daten gibt es viele Schichtüberschneidungen zwischen Oberkreide und Unterkreide und zwischen Unterkreide und tieferen Einheiten des Jura und Keupers, die korrigiert werden mussten. Im Vergleich mit seismischen Profilen in der Zeit-Domäne zeigten sich aber dennoch größtenteils gute Übereinstimmungen. Größere Abweichungen lassen sich vor allem in den Dachbereichen und den Flanken der Aufwölbungen beobachten.

Die Schichtenfolge des Jura ist in den randlichen Trögen des Glückstadt-Grabens weitgehend erhalten (Westholstein-, Ostholstein- und Hamburger-Trog), dagegen sind im zentralen Bereich und auf den Blöcken lediglich geringmächtige und unvollständige Abfolgen des unteren Jura lückenhaft verbreitet. Die gesamte Abfolge wird landesweit von der Unterkreide diskordant abgedeckt. Der mittlere Jura stand als Reservoirkomplex lange im Fokus der Exploration nach Kohlenwasserstoffen. In verschiedenen Regionen war man fündig – heute ist lediglich die Mittelplate Bohrplattform noch in Betrieb. Aufgrund der Explorationsaktivitäten enden sehr viele Tiefbohrungen im Jura (Abb. 21) – wenige Bohrungen hatten das Ziel tiefere Sandsteine des Rhäts und Buntsandstein bzw. das Prä-Zechstein zu erkunden. Das Modell stellt die Basis Lias, Dogger und Malm dar (Abb. 21). Die Horizonte sind durch orthogonal orientierte seismische Profile meist gut belegt. Die Identifikation der entsprechenden Reflektoren war vielerorts nicht ganz zweifelsfrei möglich, dennoch ergeben die Vergleiche zwischen seismischen Profilen und GTA Interpretationen, dass die Horizonte nachvollziehbar und gut kartiert wurden. Die GTA3D Flächen zeigen jedoch in vielen Bereichen Überschneidungen mit der Unterkreide. Zudem ist der Verlauf der diskordanten Lias Ausbisse mit lateralen Unsicherheiten behaftet. Bei der Konstruktion des geologischen Modells wurden Inkonsistenzen korrigiert und Flächenkontakte an Salzkörpern, der Unterkreide Diskordanz und an Störungen aufeinander abgestimmt. Zudem wurden die Flächen soweit möglich an die Bohrmarker angepasst.

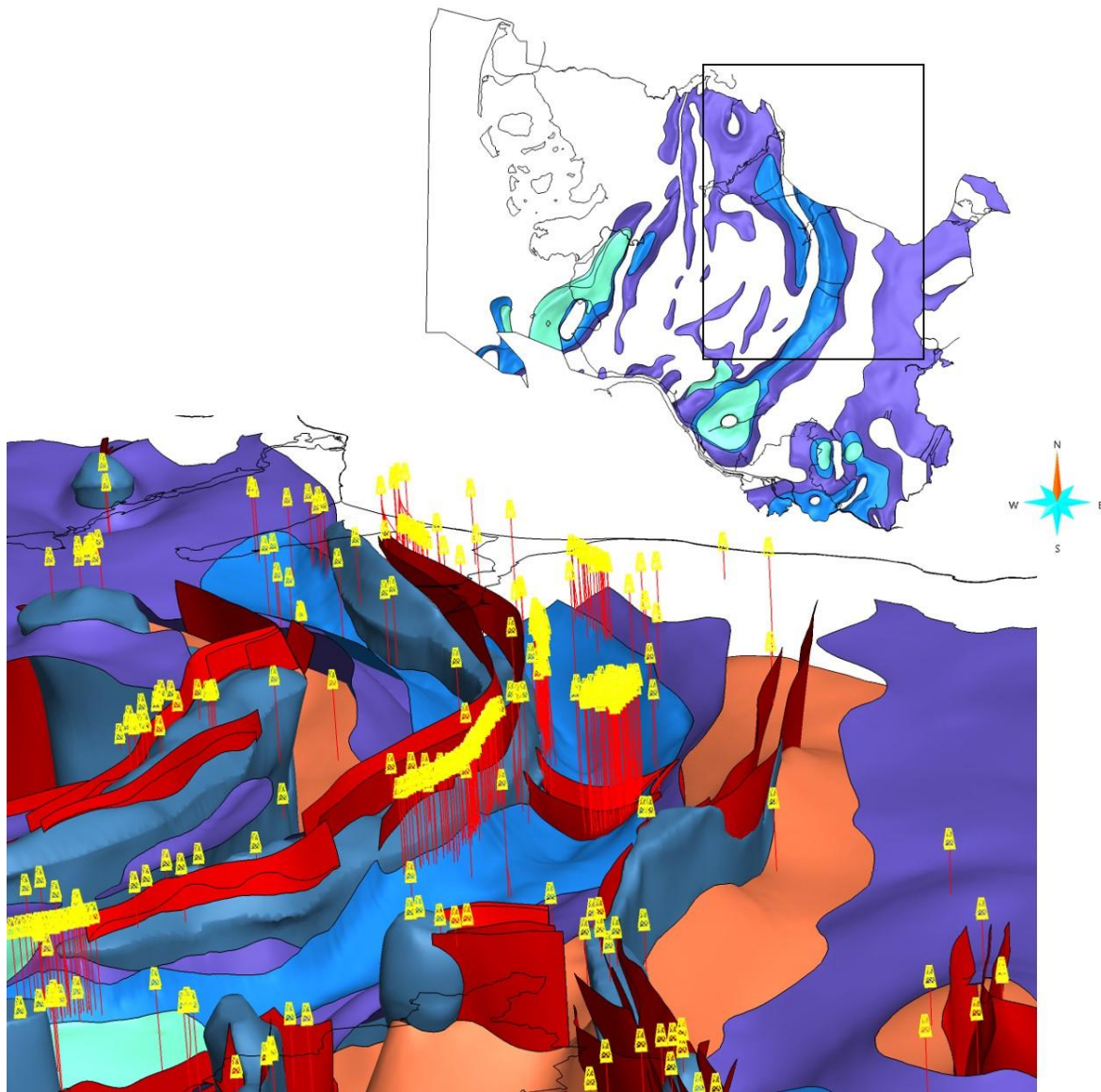


Abb. 21: Modellflächen des Jura (violett, mittelblau, cyan), Salzstrukturen, Störungsflächen und KW-Bohrungen im Bereich des Ostholstein Trog (Basis Buntsandstein im Hintergrund hellorange).

Die Schichtenfolge der Trias und des Oberen Perm bildet den tieferen Teil des Modells und wird durch die Basisflächen O. Keuper, U. Keuper, O. Buntsandstein, M. Buntsandstein, U. Buntsandstein und Zechstein dargestellt. Im Zuge der Modellierungsarbeiten wurden die Flächen korrigiert und Flächenkontakte aufeinander abgestimmt. In Bereichen geringer Mächtigkeit, Flanken von Salzdiapiren, an Diskordanzen und in gestörten Bereichen mussten Durchdringungen korrigiert oder Lücken geschlossen werden. Die Basis des Lias deckt in vielen Bereichen den Reservoirkomplex des O. Keupers ab (Rhät / Exter Formation), der teils unvollständig verbreitet und erhalten ist. Zur Konstruktion der Basis Rhät wurde die Restmächtigkeitskarte des GTA verwendet. Der Abgleich mit Bohrungen zeigte eine überwiegend gute Übereinstimmung und es wurden regional Korrekturen durchgeführt. Die Flächenkontakte sind sehr divers wechselnd (Salzstrukturen, Basis Lias, Dogger und Unterkreide, Störungen) und im Verlauf mit lateralen Unsicherheiten belegt. Lokal auftretende Diskordanzen zwischen Lias und Rhät konnten bisher nicht widerlegt werden. Durch Integration der Basis des O. Keupers wurden Bereiche geringer Mächtigkeit des U. und M. Keupers auffällig. Lokale nicht plausible Mächtigkeitsänderungen wurden in Teilregionen

korrigiert, es verbleiben jedoch Unsicherheiten, die nur durch eine landesweite Re-Interpretation von seismischen Profilen weiter reduziert werden können. Ein möglicher Grund für lokale vertikale Verzerrungen können Fehler der Zeit-Tiefen Konversion bzw. des im GTA Projekt verwendeten Geschwindigkeitsmodells (Jaritz et al. 1991) sein. In Schleswig-Holstein und Hamburg weist der M. Buntsandstein potenziell zur Nutzung geeignete Sandstein Formationen auf und ist daher der dritte, tiefste Reservoirkomplex in der Region. Relevant ist vor allem der Quickborn-Volpriehausen Sandstein an der Basis des M. Buntsandsteins, der jedoch in vielen Regionen des Glückstadt-Grabens sehr tief liegt. Die Basisfläche des M. Buntsandsteins wurde mit Hilfe der Restmächtigkeitskarte U. Buntsandstein berechnet und stimmte schon vor Korrekturen gut mit Bohrdaten überein. Der Quickborn-Volpriehausen Sandstein erzeugt einen deutlichen Reflektor und ist daher in seismischen Profilen gut verfolgbar. Die Vergleiche zwischen den Modellflächen des Buntsandsteins und der Basis Zechstein mit seismischen Daten in der Zeit-Domäne haben in vielen Regionen eine sehr gute Übereinstimmung ergeben. Mehr oder weniger deutliche Unterschiede sind meist in sehr tiefen Bereichen und Bereichen mit starken Krümmungen oder hohen Einfallswinkeln zu beobachten (Tröge, Nahbereiche von Salzstockflanken). In solchen Regionen weisen jedoch manchmal auch sich kreuzende migrierte seismische Profile Unterschiede auf. Lokal wurden Korrekturen durch seismische Auswertungen vorgenommen. Die Basis des Zechsteins bildet den unteren Abschluss des Modells. Im GTA sind unterhalb der Salzstrukturen Durchbrüche des Rotliegend-Salinars verzeichnet. Trotz des sehr ungenauen Kenntnisstandes wurden diese Durchbrüche in der Fläche anhand von Ausschnitten kenntlich gemacht.

Im Rahmen des Projektes (und teils GeotIS-StörTief, Strukturmodell SH 2016) wurden die GTA Tiefenlinienpläne überarbeitet (Abb. 22), so entstand ein konsistentes und, soweit bisher überprüfbar, belastbares Modell. Die Detailgenauigkeit ist wechselnd und aufgrund des zugrundeliegenden Maßstabes (etwa 1:300.000) limitiert. Um die Genauigkeit des Modells besser visualisieren zu können, sollte geprüft werden, wie in Zukunft eine Kartierung der Unsicherheiten umgesetzt werden könnte.

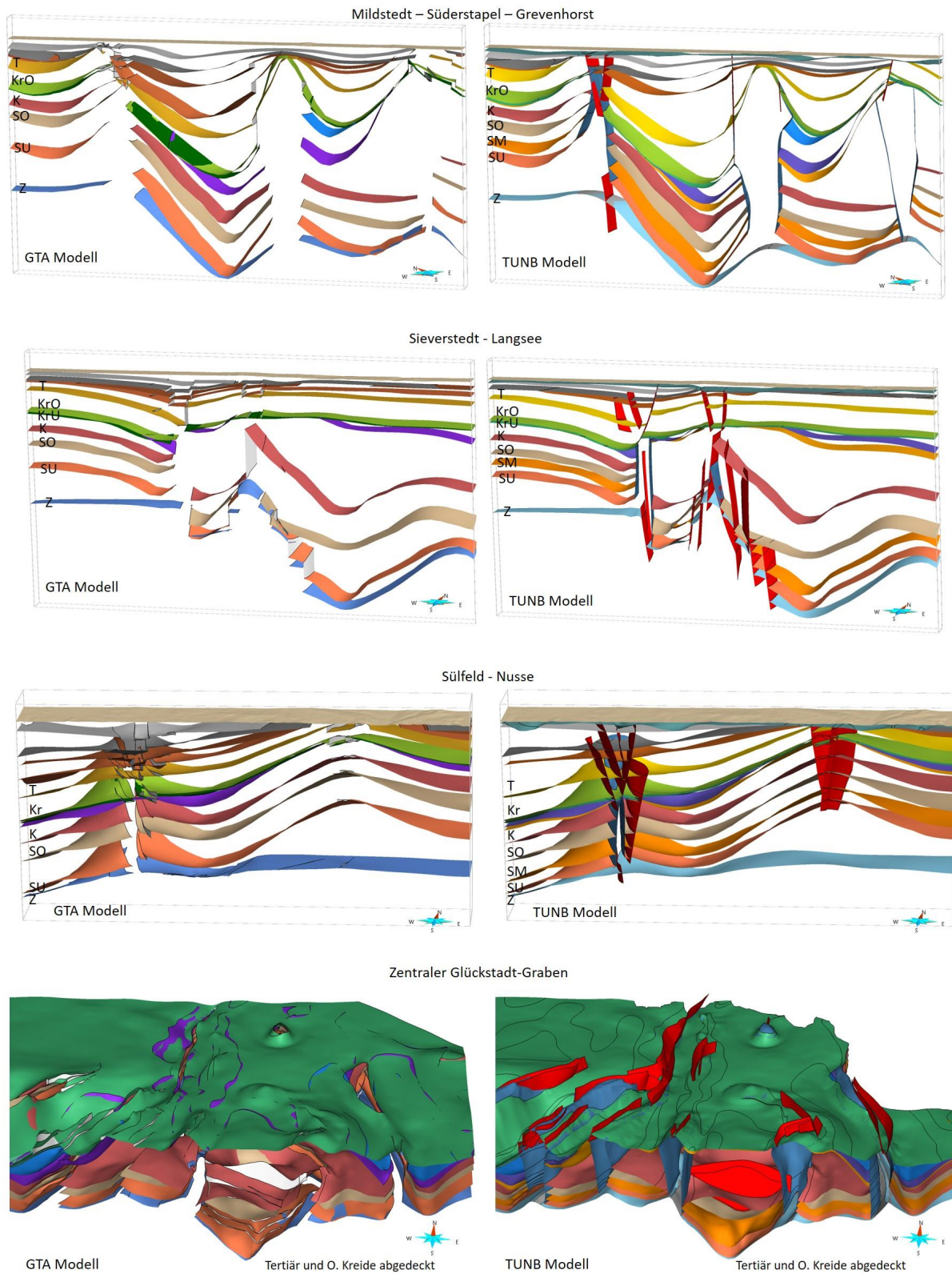


Abb. 22: Vergleiche zwischen GTA Daten (GTA3D Modellflächen) und dem TUNB Modell.

4.2 Statistische Auswertungen

Vergleich Bohrmarker versus 3D-Modell TUNB TP1 und 3D-Modell GTA

Bohrmarker der KW-Bohrungen wurden für die Entwicklung der Strukturkarten des GTA Projekt verwendet. Im Rahmen des TUNB Projektes wurden die digitalen stratigraphischen Profile kontrolliert, korrigiert und aktualisiert. Bei der Modellierung wurden die relevanten Bohrmarker dann ebenfalls berücksichtigt. Bohrdaten sind sehr wichtige Daten, weisen jedoch je nach Alter, Fokus der Messung und Genauigkeit der Aufnahme Unsicherheiten auf. Zudem belegen diese punktuellen Informationen des Öfteren komplexe Bereiche, die im Modell nicht darstellbar sind (z.B. allochthone Schollen in der Nähe von Salzstockflanken, kleinräumige Störungssysteme). Abrupte Tiefenänderungen von nahegelegenen Markern können zum Beispiel auf nicht erkannte Störungen (zwischen seismischen Profilen) hindeuten. Die Anpassung der Modellfläche hätte zwar eine geringere Abweichung in der Statistik zur Folge, aus der Fläche würde aber ein punktueller Peak herausstehen. Zur Berücksichtigung aller Marker müsste daher eine detailliertere Interpretation (Störungssystem, Versatz) in einem anderen Maßstab umgesetzt werden.

Zur Darstellung der Genauigkeit des Modells an Bohrpunkten wurden im TUNB Teilgebiet 1 die Abstände von Bohrmarkern zu Modellflächen des TUNB Modells und des GTA Modells (Basismodell SH 2012) berechnet. Es wurden Bohrmarker herausgenommen, die offensichtlich nicht modellierte allochthone Schichten betreffen oder auch deutlich jenseits des Verbreitungsgebietes eines Horizontes beider Modelle liegen. Die Histogramme der Abweichungen machen deutlich, dass das TUNB Modell im Vergleich zum GTA eine höhere Passgenauigkeit aufweist (Abb. 23, Abb. 24). Im Bereich Tertiär / Kreide liegen die Medianwerte zwischen 8 und 14 m und die Werte des 75 Perzentils zwischen 20 und 29 m (Abb. 23). Erhöhte Abweichungen beobachtet man meist im Nahbereich von Salzstrukturen und Störungssystemen, z.B. im Bereich der Salzstruktur Heide. Diese Salzstruktur weist ein komplexes System von Scheitelstörungen auf und wird von sehr vielen Bohrungen erfasst. Die dichten Cluster der Bohrmarker belegen die Komplexität des Störungssystems, das im Modell dem Maßstab entsprechend generalisiert dargestellt wird. Es können daher nicht alle Bohrmarker präzise berücksichtigt werden. Ein weiterer Grund für Abweichungen ist die teils ungenaue stratigraphische Aufnahme, da der Fokus der Bohrungen in tieferen Bereichen lag. Insbesondere im Bereich des Miozäns sind die stratigraphische Einstufungen in den KW-Bohrungen mit höheren Unsicherheiten belegt.

Die Schichtenfolge des Jura (insbesondere des M. Jura) lag lange im Zentrum der Exploration nach Kohlenwasserstoffen. Die Basis des M. Jura wird jedoch lediglich von 64 Bohrungen erfasst. Größere Abweichungen zwischen Bohrmarkern und Modellflächen befinden sich meist im Flankenbereich der Salzstrukturen. Hierbei handelt es sich oft um allochthone Schollen, die an strukturparallelen und orthogonal verlaufenden Störungen und Scherzonen aufgeschleppt wurden. Recht viele Bohrungen liegen dicht an den Salzstockflanken. Die Abfolge Basis Keuper bis Basis U. Buntsandstein wird noch von 28 bis 12 Bohrungen erfasst. Die Abweichungen sind meist gering (Abb. 24) und lediglich direkt am Schichtausbiss etwas erhöht.

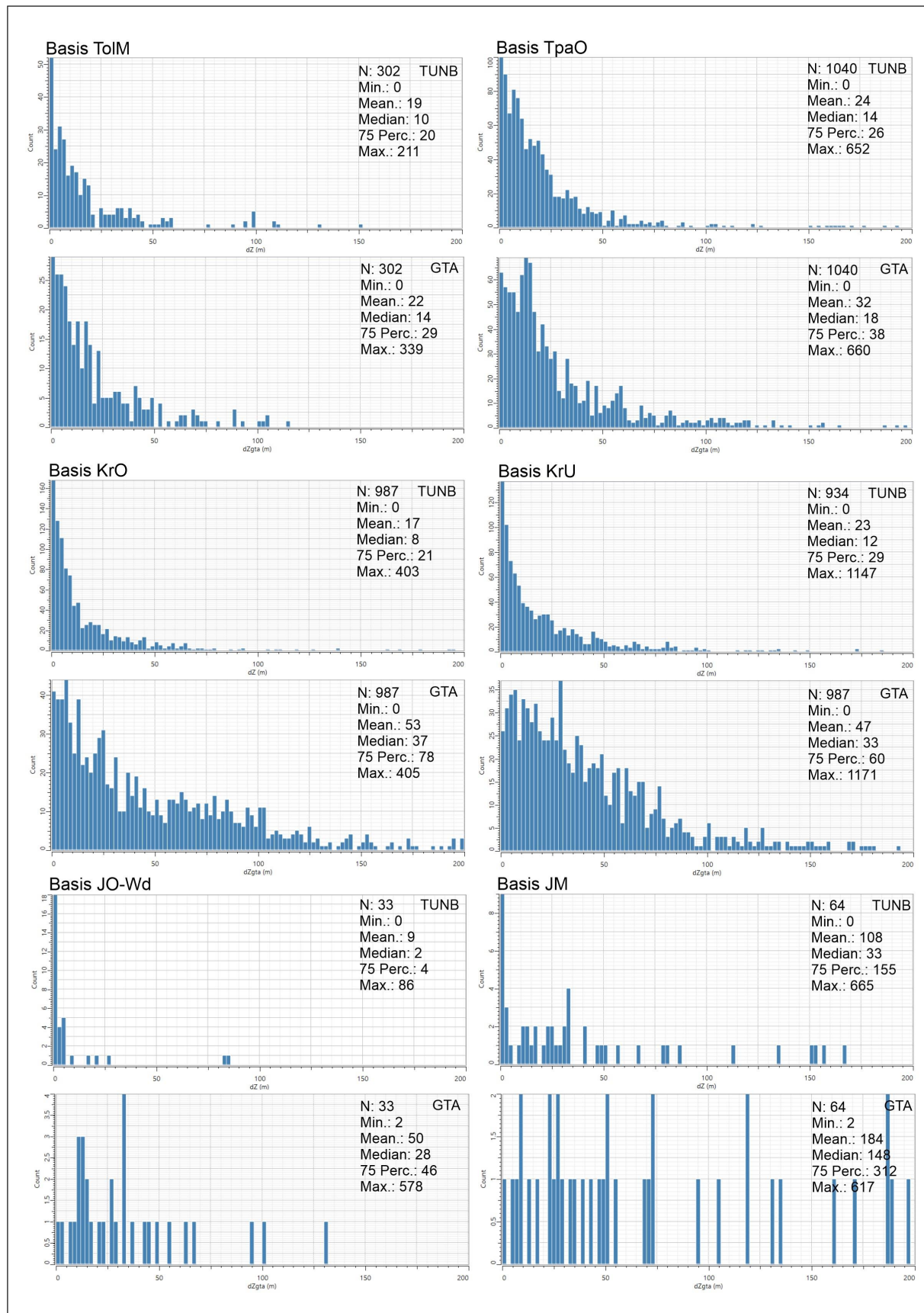


Abb. 23: Abstände zwischen Bohrmarkern und entsprechenden lithostratigraphischen Grenzflächen des TUNB Modells (TP1) und GTA Modells (Wertebereich der X-Achse: 0 – 200 m). Basis ToIM bis Basis JM.

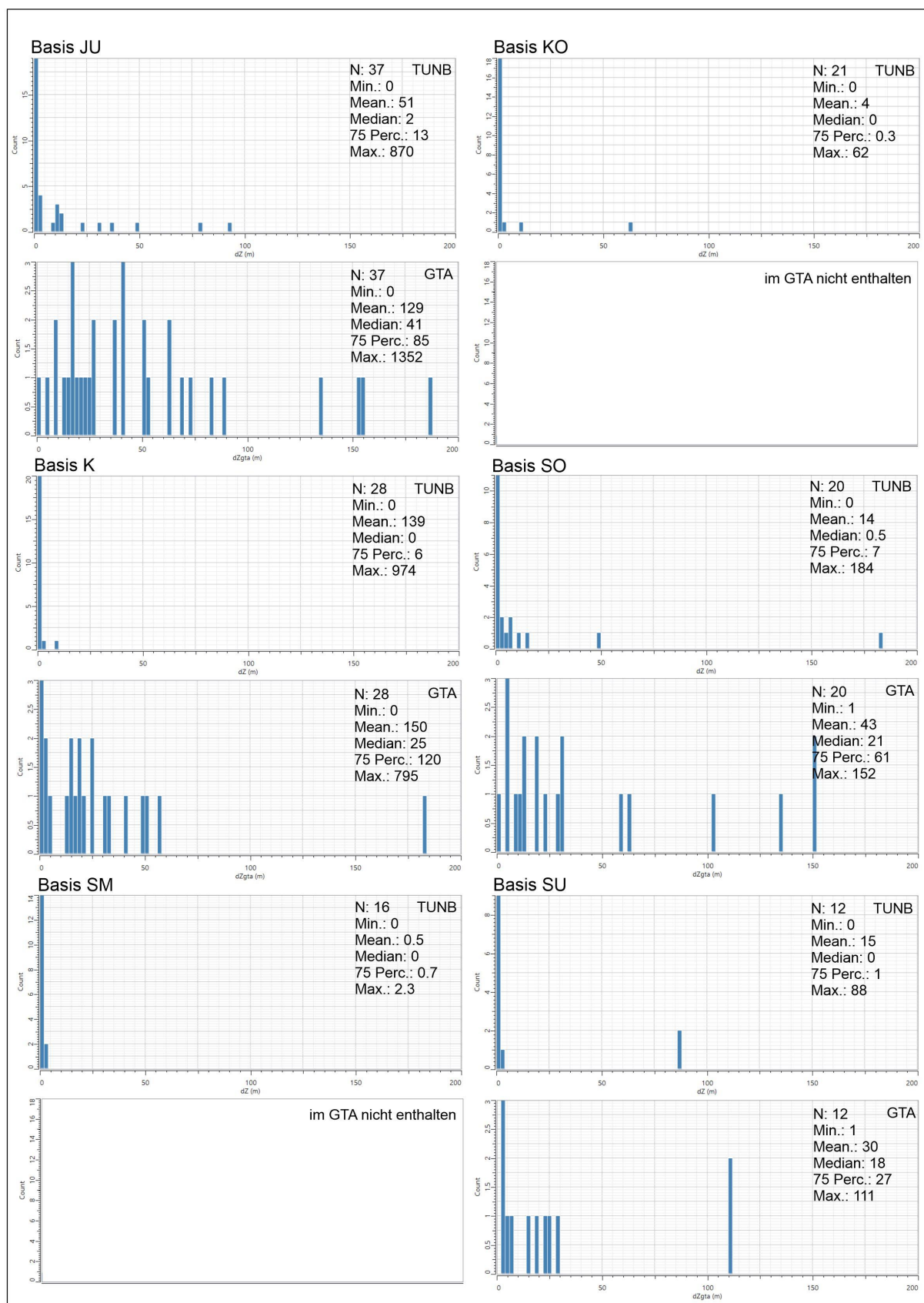


Abb. 24: Abstände zwischen Bohrmarkern und entsprechenden lithostratigraphischen Grenzflächen des TUNB Modells (TP1) und GTA Modells (Wertebereich der X-Achse: 0 – 200 m). Basis JU bis Basis SU.

Volumenberechnung Modelleinheit Zechstein

Aus den Modellflächen Basis Zechstein, Basis Buntsandstein und den Hüllflächen der Salzstrukturen wurde eine geschlossenen Hüllfläche des Zechsteins konstruiert, die aufgrund der Doppelsalinare auch Rotliegend-Salinare umfasst (Abb. 25). Das Zechstein Modell besitzt ein Volumen von $2,47\text{e}+13 \text{ m}^3$ bei einer Grundfläche des Projektgebietes von $2,25\text{e}+10 \text{ m}^2$. Rein statistisch ergäbe sich daraus eine söhlig Zechstein Mächtigkeit von etwa 1100 m (Abb. 25; nur Glückstadt-Graben: etwa 1020 m). Das Modell zeigt für den Westschleswig-Block eine mittl. Mächtigkeit von 1150 m (641 – 2064 m) und für den Ostholstein-Block eine mittl. Mächtigkeit von 1360 m (662 – 2300 m). Im Glückstadt-Graben beträgt die mittl. Mächtigkeit abseits der Salzstrukturen etwa 380 m, liegt aber in vielen Gebieten weit unter 100 m.

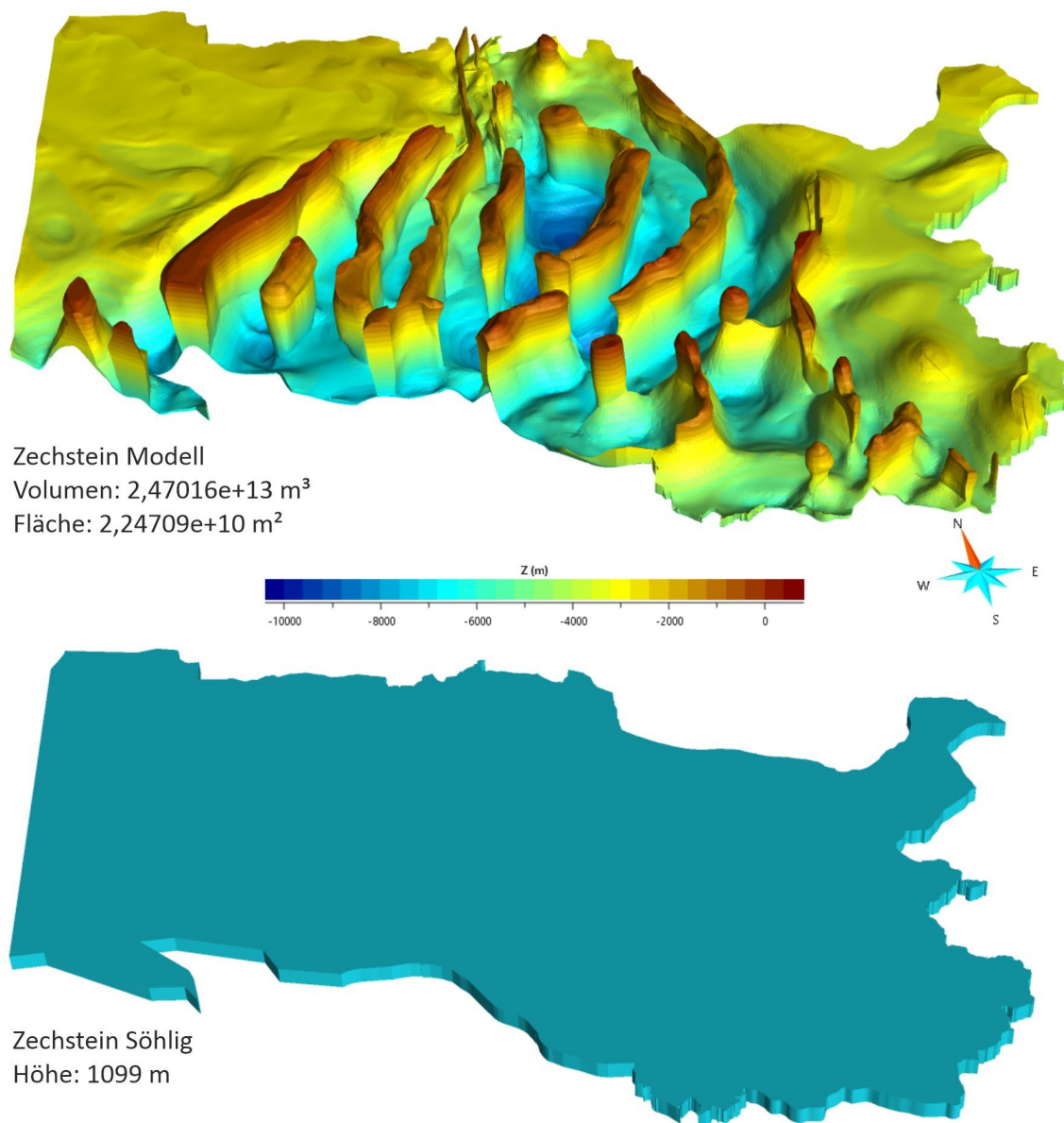


Abb. 25: Aus Top und Basis Zechsteins wurde ein Hüllkörper des Zechsteins konstruiert und das Volumen berechnet (Oben, farbkodiert nach Tiefe). Aus Volumen und Grundfläche ergibt sich eine söhlig Mächtigkeit von etwa 1100 m (Unten).

Die Salzmauern und Diapire des Zechsteins weisen einige Tausend Meter Höhe auf und durchziehen den gesamten Glückstadt-Graben. Die recht einfache Berechnung der söhligen Zechstein Mächtigkeit soll lediglich einen Eindruck des Volumens der Modelleinheit vermitteln. In diesem Fall wird nicht zwischen Salzgestein oder Tonstein unterschieden, das Volumen umfasst die gesamte Abfolge inklusive intrudierter Salzgesteine des Rotliegend.

Eine interessante Frage ist, welche initialen Mächtigkeiten die Salzgesteine des Zechsteins und Rotliegend im Glückstadt-Graben aufwiesen. Die initiale Mächtigkeit von Salzgesteinen des Perm kann mittels *Backstripping* Verfahren abgeschätzt werden. Hierbei müssen einige Faktoren berücksichtigt werden (z.B. Subsidenz, Auflast, Diagenese, Isostasie, Re-Sedimentation, Salzextrusion). Nach Maystrenko et al. (2005a) liegt die Mächtigkeit der Permsalze in den Blockbereichen bei etwa 1300 – 1700 m und im Glückstadt-Graben max. bei etwa 2000 - 3000 m. Bei der Ermittlung der Mächtigkeit werden Salzgesteine des Keupers im Glückstadt-Graben dem Perm zugerechnet. Es wird angenommen, dass die Mächtigkeit der Keupersalze etwa 20% der Gesamtmächtigkeit des Keupers beträgt, im Glückstadt-Graben etwa 600 – 800 m. Verluste von Salzen durch Lösungsprozesse können hierbei nicht berücksichtigt werden. Vergleicht man die söhlige Mächtigkeit des Zechsteinmodells mit diesen Berechnungen für die Permsalze, so sind die hohen Diskrepanzen im Gebiet des Glückstadt-Grabens auffällig. Ein Grund ist sicher, dass bei der Studie von Maystrenko et al. (2005a) Keuper-, Zechstein- und Rotliegend-Salze berücksichtigt wurden und sich durch das Verfahren der Abschätzung realistischere Trends ableiten lassen.

4.3 Probleme, Unsicherheiten, Diskrepanzen

Das 3D Modell basiert auf den GTA Interpretationen der KW-Daten, die in heterogener Verteilung die gesamte Fläche abdecken. Im Rahmen des Projektes wurde diese Interpretation überprüft, korrigiert und lokal aufgrund neuer Auswertungen von seismischen Daten verändert. Ziel ist nicht mehr die 3D Visualisierung des GTA, stattdessen findet zusehends eine Loslösung statt. Dies wird durch die heutige 3D Software und Methodik ermöglicht, die Integration von neuen Daten und die Rekonstruktion des GTA Geschwindigkeitsmodells, das eine Weiterentwicklung in der Zeit-Domäne erlaubt. Mit den Korrekturen, Ergänzungen und Änderungen ging auch die topologische Konsistenz einher. Das Modell ist zwar nicht vollständig im mathematischen Sinne konsistent, es können bei Bedarf jedoch in relativ kurzer Zeit Volumenmodelle erstellt werden.

Ein geologisches 3D-Modell ist grundsätzlich eine mehr oder weniger abstrahierte Darstellung der Natur bzw. des Untergrundes und enthält daher immer Unsicherheiten. Ein Ziel ist die Minimierung der Unsicherheiten. Die Genauigkeit und Aussagekraft des Modells variiert und ist von sehr vielen Faktoren abhängig und daher schwer zu quantifizieren. Die Darstellung der Datenabdeckung ermöglicht die Einschätzung der Detailgenauigkeit des 3D-Modells und ist daher eine sinnvolle und übliche Information. Unsicherheiten sind u.a. abhängig von der Qualität der Daten, der Prozessierung, Interpretation und räumlichen Korrelierung der seismischen Profile, Interpretation der Bohrlogs und lithologischen Aufnahmen, Güte des seismischen Geschwindigkeitsmodells, Methodik der Zeit-Tiefen Konversion, Interpolationsverfahren und letztendlich von dem Bearbeiter des geologischen Modells. Im Projektverlauf wurden GTA Daten und das TUNB Modell in der Zeit-Domäne mit seismischen Profilen verglichen. Da vor der Modellierung der Gebiete das GTA Geschwindigkeitsmodell nicht immer vorlag und auch die landesweite Auswertung von allen seismischen Profilen nicht vorgesehen war, konnte dieser Abgleich nicht vollständig durchgeführt werden. Zu bemerken ist auch, dass viele seismische Profile lediglich als Stapelsektion vorliegen und daher (vor allem im Glückstadt-Graben) mit Ungenauigkeiten behaftet sind.

Eine Erkenntnis ist, dass die Modellflächen in vielen Bereichen recht präzise auf entsprechenden Reflektoren liegen aber lokal durchaus auch Unterschiede im Verlauf auftreten (Abb. 26). Die lokalen Abweichungen treten dann meist in Zonen mit höherem Einfallen oder Krümmungen auf. Die guten Übereinstimmungen sind auch von der Tiefe aber mehr von der strukturellen Situation abhängig. In einigen Regionen des Glückstadt-Grabens sind auch größere Abweichungen zu beobachten, die eher auf einzelne Strukturen begrenzt sind (z.B. Störungsverläufe, Geometrie von Salzstrukturen, aufgeschleppte Basisflächen in den Randbereichen von Salzstrukturen).

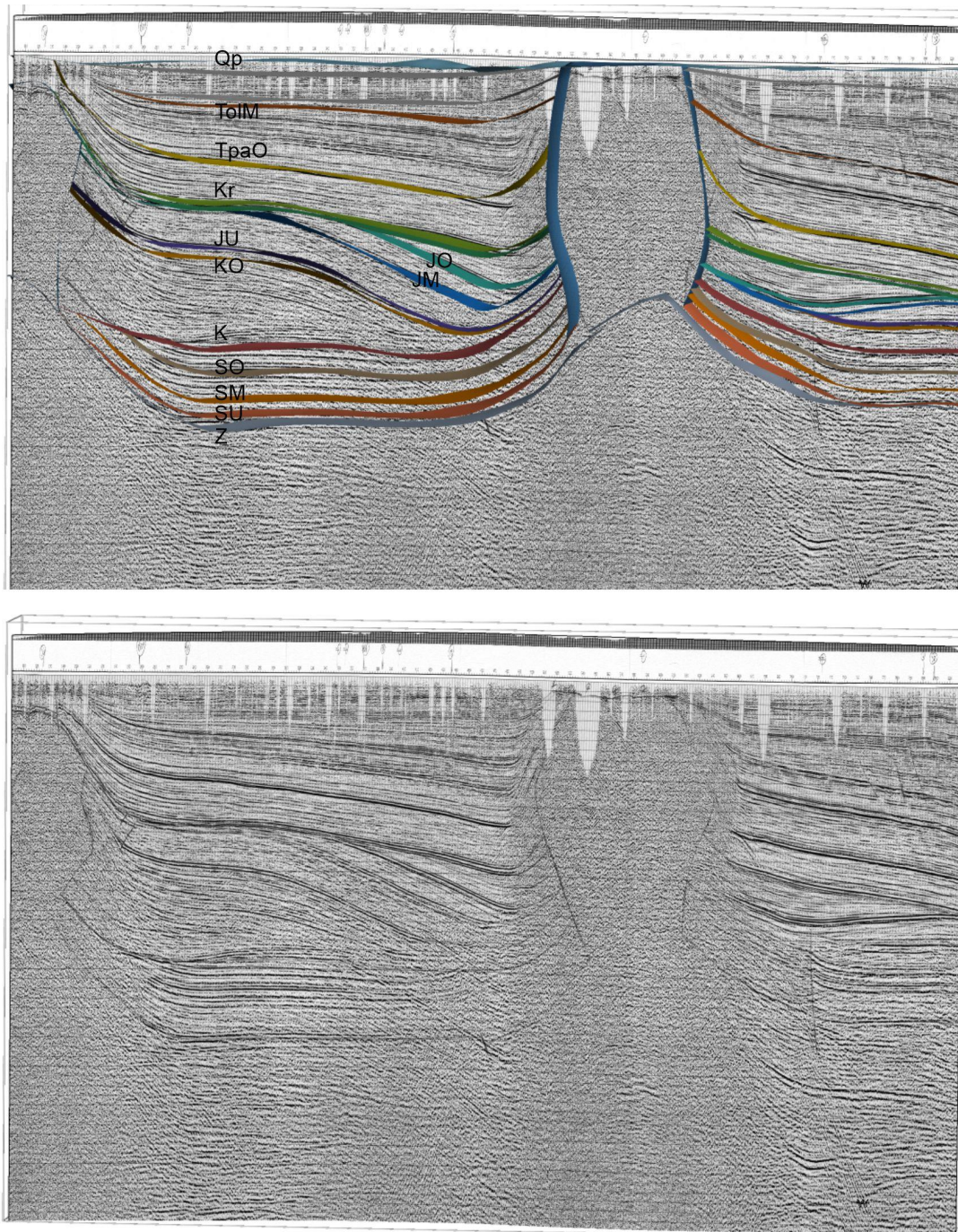


Abb. 26: Seismisches Profil (nicht migriert, Zeit-Domäne) und Anschnitt des 3D Modells im Bereich des Hamburger Troges (Salzstruktur Elmshorn). Die Tiefen-Zeit Konvertierung des Modells erfolgte mit dem GTA-Geschwindigkeitsmodell.

Bei dem Prozess der 3D-Modellierung geht es in großem Maße um den Umgang von Unsicherheiten und um die Lösung von Problemen bzw. Diskrepanzen. Es gab geologische inhaltliche Probleme, z.B. bei der räumlichen Verbindung und Deutung von unterschiedlichen Daten, sowie topologisch geometrische Probleme. Herausforderungen waren die Größe des Gebietes und damit verbunden große zu verarbeitende Datenmengen, die hohe Anzahl von einzelnen Strukturen, deren Komplexität sowie die Bearbeitung und Korrektur von Flächen und das Erreichen der geologischen und topologischen Konsistenz. In Teilbereichen konnten Diskrepanzen bereits minimiert werden, eine vollständige Überprüfung und Weiterentwicklung des Modells in der Zeit-Domäne ist zukünftig anzustreben. Ein limitierender Faktor ist die Tatsache, dass manche Strukturen nur von wenigen Profilen abgedeckt sind und die Qualität nicht immer eine sichere Interpretation zulässt. Zur weiteren Reduzierung von Unsicherheiten sollte auch das GTA Geschwindigkeitsmodell weiterentwickelt werden, um so die Genauigkeit der Tiefenlage zwischen Bohrungen zu erhöhen.

4.4 Fazit - Résumé

Im Rahmen des TUNB Projektes wurde ein konsistentes geologisches 3D-Modell des Untergrundes von Schleswig-Holstein und Hamburg entwickelt. In der ersten Phase wurden alle relevanten seismischen Profile aufbereitet. Es wurden alle lithostratigraphischen Profile der KW-Bohrungen überarbeitet. In den oberflächennahen Bereichen wurden hydrogeologische Bohrungen einbezogen. Dies erforderte eine umfangreiche Sichtung und Qualitätsbewertung und sorgte für eine höhere Genauigkeit im Bereich bis etwa 300 m Tiefe. Wichtiger Bestandteil der Eingangsdaten waren die Daten des GTA 1:100.000 und 1:300.000, die komplett (incl. geologische Profile und Restmächtigkeitskarten) für die Modellierung vorbereitet wurden. Diese Arbeiten waren auf Grund der Datenmengen zeitintensiv und so wichtig wie die Modellierung selbst, da hiermit Ungenauigkeiten und Fehler minimiert wurden. Nach und nach wurde das GTA Geschwindigkeitsmodell rekonstruiert, das in einigen Gebieten genutzt wurde. Diese Arbeiten garantierten zum ersten Mal eine Analyse der GTA Daten in der Zeit-Domäne und es war ein sehr wichtiger Schritt für zukünftige Arbeiten.

Im gegebenen Maßstab liefert das neue Modell eine gute Grundlage für zukünftige Anwendungen, wie z.B. Potenzialstudien, Simulation von Prozessen oder auch Risikoabschätzungen und ist ein wertvoller Beitrag für Informationssysteme. Die differenzierte und konsistente Darstellung des Tertiärs ist nicht nur für Risikostudien relevant, sondern kann auch für hydrogeologische Fragestellungen bzw. Modellierungen als Zusatzinformation eingesetzt werden. Es sollte zukünftig eine intensivere interdisziplinäre Zusammenarbeit erfolgen, damit Modelle des tieferen Untergrundes und (hydrogeologische) Modelle des oberflächennahen Untergrundes besser aufeinander abgestimmt sind.

Die Art und Weise der Visualisierung von Daten bzw. Modellen ist ein sehr relevantes Thema in den Geowissenschaften. Die Darstellung von 3D-Modellen ist heutzutage in verschiedenen Themenbereichen sehr weit entwickelt (z.B. Animationsfilme, 3D-CAD im Ingenieurwesen, Gaming). Die 3D Raytracing- und Animations-Software Blender beispielsweise ermöglicht äußerst realistische räumliche Abbildungen oder Filmsequenzen und wurde daher zur Visualisierung des geologischen 3D-Modells eingesetzt. Dieses Beispiel zeigt, wie Modelle anschaulich zugänglich und der Öffentlichkeit verständlich präsentiert werden können (Abb. 19, Abb. 27).

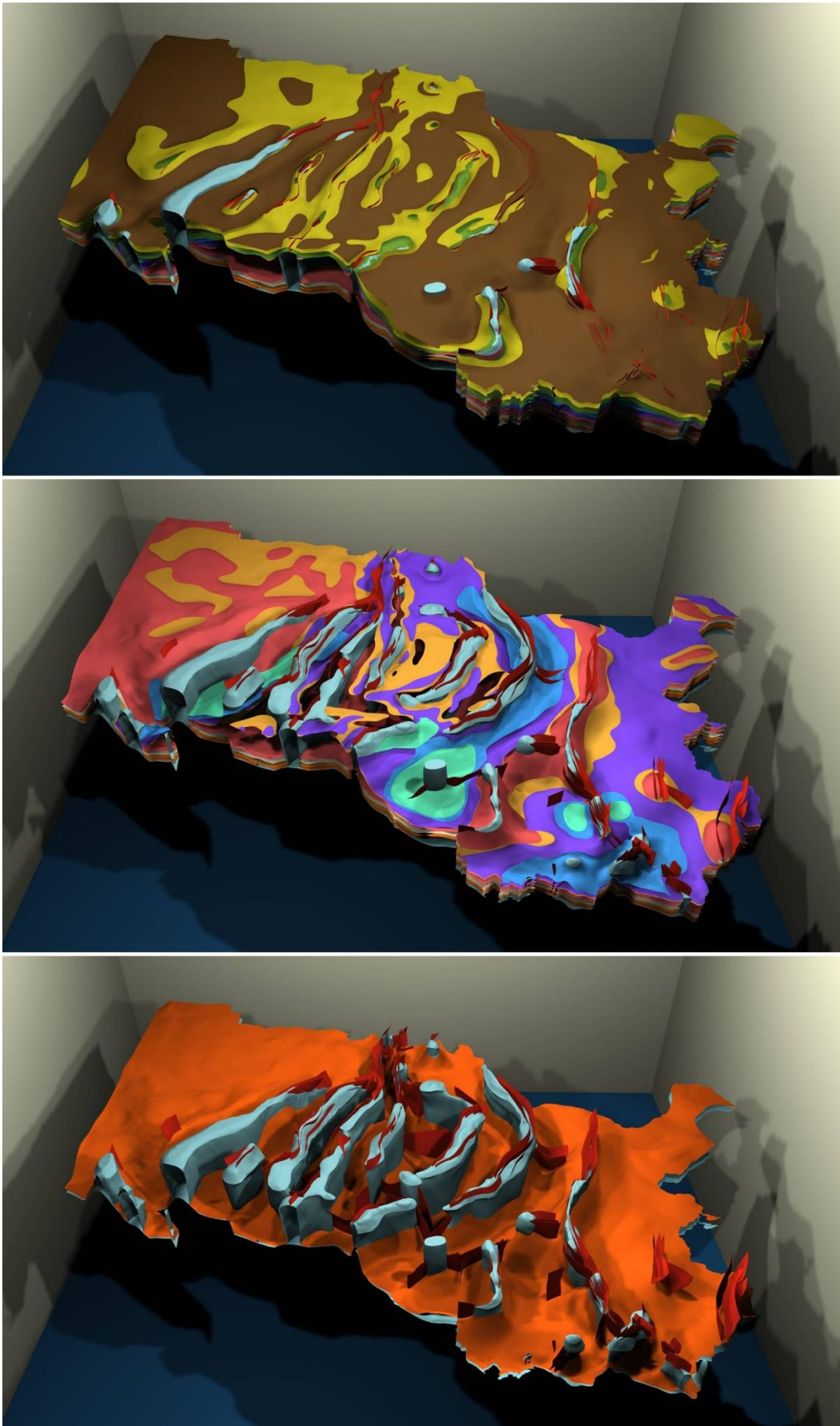


Abb. 27: Geologisches 3D-Modell SH / HH (TUNB-TP1). Die Visualisierung des Modells erfolgte mit der 3D Raytracing- und Animations-Software Blender (www.blender.org).

5 Parametrisierung – seismische Geschwindigkeit

Für die Erstellung des 3D-Untergrundmodells im Rahmen des TUNB-Projekts wurden sowohl Informationen aus dem Tiefenbereich (z.B. Bohrungen oder Tiefenlinienpläne des Geotektonischen Atlas (GTA)) als auch Informationen aus dem Zeitbereich (seismische Profile) genutzt. Ziel ist es daher, ein einheitliches Geschwindigkeitsmodell für das gesamte (Teil-)Projekt zu entwickeln mit dessen Hilfe die Informationen aus dem Zeit- und Tiefenbereich leicht miteinander verknüpft werden können.

In der Industrie und Wissenschaft werden normalerweise lokale, auf ein bestimmtes Untersuchungsgebiet begrenzte Geschwindigkeitsmodelle angewendet. Diese können z.B. durch das Prozessieren seismischer Daten oder das Auswerten geschwindigkeitsbezogener Bohrloch-Messungen ermittelt werden. Bei der Entwicklung eines umfassenden Geschwindigkeitsmodells für die Bundesländer Schleswig-Holstein und Hamburg müssen verschiedene Herausforderungen bedacht werden. Eine Hauptschwierigkeit ist die heterogene regionale Datenverteilung. Tiefbohrungen mit Geschwindigkeitsinformationen befinden sich z.B. überwiegend auf dem östlichen und westlichen Rand des Glückstadt-Grabens, während sie in den Blockbereichen nur vereinzelt vorkommen. Eine weitere Herausforderung sind die Qualitätsunterschiede der vorhandenen Daten. Bei den Daten, welche dem Geologischen Dienst SH zur Verfügung stehen, handelt es sich um eine Mischung aus analogen und digitalen Dateien, die aus verschiedenen Jahrzehnten stammen und somit unterschiedlich aufgezeichnet und ausgewertet wurden. Dies erschwert eine einheitliche Bewertung der Daten. Hinzu kommt, dass z.B. seismische Sektionen häufig nur in bereits prozessierter Form vorliegen, was eine eigene Geschwindigkeitsanalyse schwer möglich macht. Man ist daher auf die Richtigkeit der bereits ausgewerteten seismischen Geschwindigkeiten angewiesen bzw. muss diese kritisch hinterfragen.

Auf Grund der angesprochenen Herausforderungen muss man die Grenzen der Anwendbarkeit eines großskaligen Geschwindigkeitsmodells, wie es im Rahmen des TUNB-Projekts erstellt werden soll, berücksichtigen. Das Modell soll dazu geeignet sein, großflächige Strukturen einheitlich von der Zeit- in die Tiefen-Domäne (und vice versa) zu konvertieren. Dadurch wird es möglich, Geometrien und Strukturen zu erkennen und zu analysieren, die sich über mehrere (hunderte) Kilometer erstrecken. Eine Genauigkeit von wenigen Metern kann dabei jedoch nicht garantiert werden. Um dies zu erreichen, müssen lokale Geschwindigkeitsmodelle entwickelt werden, wofür ein zukünftiges TUNB-Geschwindigkeitsmodell wiederum als Starthilfe nützlich sein kann.

Das Ziel der zweiten Projektphase innerhalb des Teilprojektes 1 war es, erste Ansätze hinsichtlich eines einheitlichen Geschwindigkeitsmodells zu erarbeiten und ihre Durchführbarkeit zu testen. Dies beinhaltete unter anderem die Überführung des GTA-Geschwindigkeitsmodells in ein 3D-Volumenmodell sowie eine erste Evaluierung dieses Modells durch Bohrungsdaten. In einem Testgebiet wurde ein Geschwindigkeitsmodell auf Basis von seismischen Geschwindigkeiten entwickelt, um zu untersuchen, wie das GTA-Geschwindigkeitsmodell zukünftig verbessert oder eine Neuentwicklung erfolgen kann. Diese Arbeiten werden in einem separaten Bericht dargestellt. Die Veröffentlichung erfolgt durch die BGR.

6 Literaturverzeichnis

Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S. Kockel, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. Geol. Jb, Reihe A 153, 1-88.

Doornenbal, H., Stevenson, A. (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area. Houten, Netherlands, European Association of Geoscientists & Engineers.

Hese, F. (2012): 3D-Modellierungen und Visualisierung von Untergrundstrukturen für die Nutzung des unterirdischen Raumes in Schleswig-Holstein. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Jaritz, W. (1969): Epirogenese in Nordwestdeutschland im höheren Jura und in der Unterkreide. Geol Rundsch 59: 114-121, doi:10.1007/BF01824946.

Jaritz, W. (1980): Einige Aspekte der Entwicklungsgeschichte der nordwestdeutschen Salzstöcke. Zeitschr Dt Geol Gesellschaft, 131: 307–408.

Jaritz, W., Best, G., Hildebrand, G., Jürgens, U. (1991): Regionale Analyse der seismischen Anfangsgeschwindigkeiten in Nordwestdeutschland. Geologisches Jahrbuch E 45: 23-57.

Kockel, F. (1998): Die paläogeographische und strukturelle Entwicklung NW-Deutschlands - Band1. Geotektonischer Atlas von NW-Deutschland 1:300.000, BGR.

Kockel, F. (2003): Inversion structures in Central Europe – expressions and reasons, an open discussion. – Netherlands J. Geosci., 82 (4): 367–382, Utrecht (NJG).

Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D., Nelskamp, S. (2008): Dynamics of Complex Intracontinental Basins: The Central European Basin System: 590 S., Berlin/Heidelberg (Springer).

Mallet, J. L. (1992a): GOCAD: A Computer Aided Design Program for Geological Applications. – In: Turner, A.K. (eds.): Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems: 123-142, Dordrecht (Kluwer).

Mallet, J. L. (1992b): Discrete Smooth Interpolation in Geometric Modelling. - Computer Aided Design, 24 (4): 178-192.

Mallet, J. L. (2002): Geomodeling. 599 S., New York (Oxford University Press).

Mallet, J. L. (2004): Space–Time Mathematical Framework for Sedimentary Geology. Mathematical Geology, Vol. 36, No. 1.

Maystrenko, Y. (2005): Evolution and structure of the Glueckstadt Graben by use of borehole data, seismic lines and 3D structural modelling, NW Germany. Dissertation, Freie Universität Berlin.

Maystrenko, Y., Bayer, U., Scheck-Wenderoth, M. (2005a): Structure and evolution of the Glueckstadt Graben due to salt movements. Int J Earth Sci (Geol Rundsch), 94: 799–814.

Reinhardt, H.-G. et al. (1986-1989): Regionales geophysikalisches Kartenwerk der DDR. VEB Geophysik, Leipzig.

Reinhold, K., Krull, P. & Kockel, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands (1:500.000). – BGR, Berlin / Hannover.

Rodon, S. & Littke, R. (2005): Thermal maturity in the Central European Basin system (Schleswig-Holstein area): results of 1D basin modelling and new maturity maps. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 94: 815–833.

Rosenbaum, S., Hese, F., Liebsch-Dörschner, T., Offermann, P., Rheinländer, J., Thomsen, C. (2012): Geologische Modelle der Deck- und Speichergesteine Schleswig-Holsteins. Schlussbericht des Teilvorhabens M6 im Rahmen des Verbundprojektes CO₂-MoPa Modellierung und Parametrisierung von CO₂-Speicherung in tiefen, salinen Speichergesteinen für Dimensionierungs- und Risikoanalysen; Vorhaben: Dimensionierung und Risikoanalysen bei der CO₂-Speicherung - Sonderprogramm GEOTECHNOLOGIEN; 107 S., LLUR SH, Flintbek.

Thomsen, C., Hese, F., Schaller, A., Lademann, K., Rosenbaum, S., Liebsch-Dörschner, T. (2017): Verbundvorhaben StörTief: Die Rolle von tiefreichenden Störungszonen bei der geothermischen Energienutzung, Teilprojekt 1.2 – Erarbeitung eines geothermischen 3D-Strukturmodells für den Glückstadtgraben in Schleswig-Holstein. – Schlussbericht: 66 S., Flintbek (Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein). Technische Informationsbibliothek Hannover.

Warsitzka, M., Kley, J., Jähne-Klingberg, F., Kukowski, N. (2016): Dynamics of prolonged salt movement in the Glückstadt Graben (NW Germany) driven by tectonic and sedimentary processes. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 1-25.