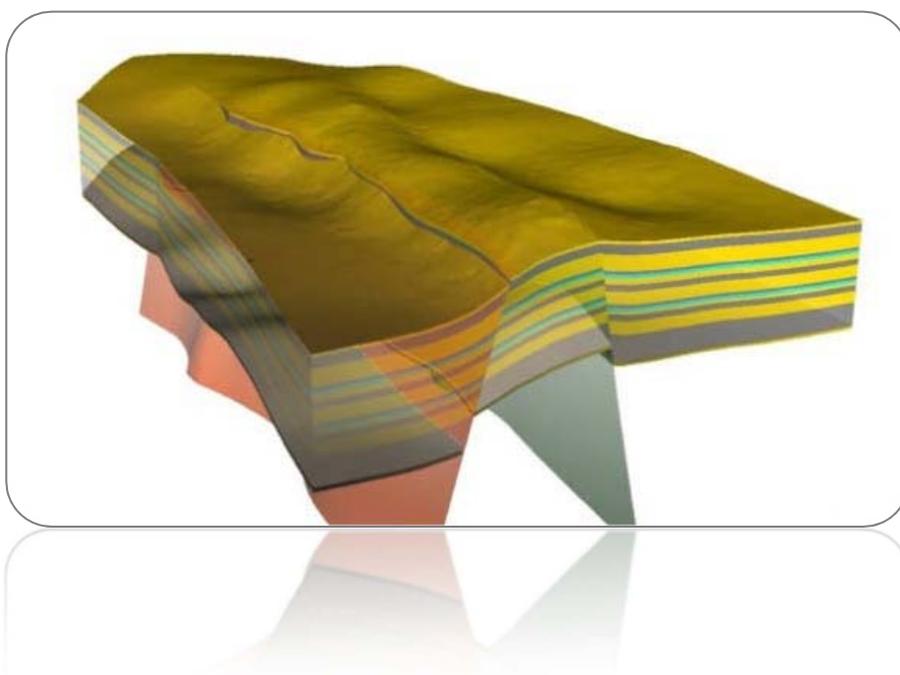


Speicherpotenziale im zentralen deutschen Nordsee-Sektor



**Fabian Jähne-Klingberg, Marco Wolf,
Stephan Steuer, Frithjof Bense,
Dirk Kaufmann und Axel Weitkamp**

November 2014

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Fabian Jähne, Marco Wolf, Stephan Steuer, Frithjof Bense, Dirk Kaufmann und Axel Weitkamp
Titel:	Speicherpotenziale im zentralen deutschen Nordsee-Sektor
Stichwörter:	Speicherpotenzial, Speicherkomplex, Barrierekomplex, zentrale Deutsche Nordsee, Nutzungspotenziale, CO ₂ -Speicherung, Fallstudie, GSN, GPDN

Der tiefere Untergrund der zentralen deutschen Nordsee wurde, ergänzend zu den Onshore-Untersuchungen im Projekt Speicher-Kataster Deutschland, auf sein Potenzial für die Speicherung von Fluiden (Gase und Flüssigkeiten wie z. B. CO₂ oder Erdgas) in salinaren Aquiferen untersucht. Dazu wurde zunächst die stratigraphische Abfolge in Speicher- und Barrierekomplexe unterteilt. In einem Komplex können unterschiedliche Lithologien zusammengefasst sein. So wird zum Beispiel ein Speicherkomplex häufig aus mehreren Horizonten einer für die Speicherung günstigen Lithologie (z. B. Sandstein) aufgebaut. Es wurden insgesamt vier Speicherkomplexe (Oberrotliegend, Mittlerer Buntsandstein, Oberer Keuper, Mitteljura) und vier Barrierekomplexe (Zechstein, Oberer Buntsandstein, Unterjura, Unterkreide) definiert. Auf Basis von Kriterien wurden untersuchungswürdige Gebiete ausgewiesen und in Kartenform dargestellt. Diese Kriterien waren die Mächtigkeit (> 10 m für Speicher- und > 20 m für Barrierekomplexe) und die Mindesttiefe (800 m) der Komplexe.

Im Rahmen einer Fallstudie wurde im Süden der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) eine Region mit möglichen Speicherstrukturen näher untersucht. Diese zeichnet sich durch eine hohe Dichte an verfügbaren geologischen und geophysikalischen Daten (Reflexionsseismik, Bohrdaten etc.) aus. Für die Fallstudie wurde auf Basis einer seismischen Neukartierung ein Vergleich mit bestehenden Strukturinterpretationen durchgeführt und eine detaillierte geologische Charakterisierung der Region vorgenommen. Das erarbeitete Strukturmodell wurde als Grundlage für eine Kapazitätsabschätzung einer exemplarischen Speicherstruktur in der Fallstudienregion verwendet.

Die in dieser Studie vorgestellten Ergebniskarten sind auch im Internet auf dem GPDN-Kartenserver verfügbar (www.gpdn.de).

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Einbindung in das Gesamtprojekt GPDN	1
1.2 Ziel der Speicherpotenzialuntersuchung und vorangegangene Arbeiten.....	1
1.3 Lage des Untersuchungsgebietes.....	2
2. Geologischer Überblick	3
2.1 Lithologie und Paläogeographie.....	3
2.2 Strukturgeologische Entwicklung in der zentralen deutschen Nordsee	5
2.2.1 Gliederung in Strukturräume.....	5
2.2.2 Strukturraumentwicklung	9
2.2.3 Salzstrukturen.....	11
3. Speicherpotenziale in der zentralen deutschen Nordsee	13
3.1 Datengrundlage	13
3.2 Methodik.....	13
3.2.1 Definition Speicher- und Barrierekomplex.....	14
3.2.2 Kriterien für die Ausweisung untersuchungswürdiger Speicher- und Barrierekomplexe	14
3.2.3 Konstruktion der Potenzialkarten	17
3.3 Bewertung potenzieller Speicher- und Barrierekomplexe.....	17
3.3.1 Speicherkomplex Oberrotliegend.....	18
3.3.2 Barrierekomplex Zechstein	20
3.3.3 Speicherkomplex Mittlerer Buntsandstein	22
3.3.4 Barrierekomplex Oberer Buntsandstein	24
3.3.5 Speicherkomplex Rhätkeuper (Oberer Keuper)	26
3.3.6 Barrierekomplex Unterjura	28
3.3.7 Speicherkomplex Mitteljura.....	28
3.3.8 Barrierekomplex Unterkreide	31
3.4 Lagebeziehungen von Speicher- und Barrierekomplexen und daraus resultierende Fallensituationen	33
3.5 Grenzen der vorliegenden Potenzialanalyse.....	40
3.5.1 Unschärfen in der Ausweisung untersuchungswürdiger Speicher- und Barrierekomplexe	41
4. Detailbetrachtung einer ausgewählten Region in der zentralen deutschen Nordsee (Fallstudie)	45
4.1 Einleitung.....	45
4.1.1 Ziele	45
4.1.2 Kriterien zur Auswahl einer Fallstudienregion	46
4.1.3 Überblick über die ausgewählte Fallstudienregion	46

4.2 Ergebnisse.....	49
4.2.1 Geologische Übersichtsprofile	49
4.2.2 Beschreibung und Interpretation des Strukturbaus	50
4.2.3 Mächtigkeitsverteilung der stratigraphischen Einheiten.....	55
4.2.4 Quartäre Rinnen	57
4.2.5 Geologische Detailkarten.....	58
4.2.6 Vergleich der Neukartierung mit dem GTA	71
4.2.7 Verbreitung und Ausprägung von Speicher- und Barrierehorizonten in der Fallstudienregion	76
4.2.8 Kapazitätsabschätzung einer exemplarischen Speicherstruktur.....	79
5. Zusammenfassung und Ausblick.....	85
6. Literaturverzeichnis	87
7. Abkürzungsverzeichnis.....	91
8. Abbildungsverzeichnis.....	92
9. Tabellenverzeichnis	95
10. Anhang.....	97

1. Einleitung

1.1 Einbindung in das Gesamtprojekt GPDN

Der Untergrund der deutschen Nordsee bietet ein vielfältiges geologisches Potenzial. Von besonderem Interesse sind vor allem Energierohstoffe (z. B. Öl und Gas), Speichermöglichkeiten (z. B. für erneuerbare Energien) sowie mineralische Rohstoffe (Sand und Kies) am Meeresboden. Neben einer Nutzung dieser Ressourcen bestehen Nutzungen als Naherholungs- oder Naturschutzgebiet (Wattenmeer) sowie die Nutzungen für Windkraft und Schifffahrt.

Um die geologischen Aspekte dieser verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten zu verdeutlichen und die Bewertung von Geopotenzialen in diesem vielfältig genutzten Wirtschafts- und Naturraum zu unterstützen, wurde die Geologie des gesamten deutschen Nordsee-Sektors vom Meeresgrund bis in mehrere Kilometer Tiefe im Projekt GPDN (Geopotenzial Deutsche Nordsee; siehe www.gpdn.de) erfasst. Dazu wurden neue Daten erhoben und neue Erkenntnisse zu geowissenschaftlichen Fragestellungen in mehreren Teilprojekten erarbeitet. Diese liefern eine Vorstellung über den geologischen Untergrund des gesamten deutschen Nordsee-Sektors. Die im Projekt gewonnenen Daten und Modelle bilden damit eine wichtige Grundlage für umweltbezogene und wirtschaftliche Entscheidungen.

GPDN ist ein Gemeinschaftsprojekt der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), des niedersächsischen Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) und des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH). Das Projekt hatte eine Laufzeit von 5 Jahren (1. August 2008 bis 31. Dezember 2013) und wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, das niedersächsische Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr, das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung sowie Industriepartner finanziert und durch Sachmittel unterstützt.

1.2 Ziel der Speicherpotenzialuntersuchung und vorangegangene Arbeiten

Ziel der vorliegenden Studie ist die Analyse der Untersuchungswürdigkeit des tieferen Untergrundes der zentralen deutschen Nordsee für die Speicherung von Gasen und Flüssigkeiten (Fluiden, beispielsweise CO₂ und Erdgas) in salinaren Aquiferen. Die Ergebnisse dieser Studie sollen als Grundlage für zukünftige, detaillierte Untersuchungen hinsichtlich einer klimafreundlichen, geotechnischen und energetischen Nutzung des tieferen Untergrunds in der zentralen deutschen Nordsee dienen.

In den vergangenen Jahren wurden bereits eine Reihe von Studien zur Klärung der geologischen Anforderungen für eine dauerhafte geologische Speicherung von Fluiden sowie zur Erfassung und Bewertung von Speicherpotenzialen im tieferen Untergrund durchgeführt. So liegen für ausgewählte Regionen in Europa erste Studien zur quantitativen Abschätzung des Speicherpotenzials vor (Holloway et al. 1996). Im Rahmen der EU-Projekte GESTCO (Christensen & Holloway 2004), CO₂STORE (Chadwick et al. 2008) und GeoCapacity (Vangkilde-Pedersen et al. 2009) folgten weitere Pilotstudien zur ersten groben Abschätzung des CO₂-Speicherpotenzials in Europa. Für Deutschland wurden auf Grundlage von ersten Regionalstudien rein volumetrische Abschätzungen der CO₂-Speicherkapazitäten in salinaren Aquiferstrukturen durchgeführt (May et al. 2003, May et al. 2005, Gerling 2008, Knopf et al. 2010).

Bei den genannten Studien zur Bewertung möglicher Speicherpotenziale und Speichervolumina lag der Fokus der Untersuchungen in der Regel auf den Speichergesteinen. Die geologischen Barrieren wurden meist nur nachrangig untersucht.

Für Deutschland wurden derartige Betrachtungen erstmals im Projekt „Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland – eine Grundlage zur klimafreundlichen geotechnischen und energetischen Nutzung des tieferen Untergrundes (Speicher-Kataster Deutschland)“ durchgeführt (Reinhold & Müller 2011). Diese bundesweite Studie basiert auf der Aufbereitung und Neubewertung vorliegender Daten und grenzt auf Basis bundesweit einheitlicher, unter dem Nutzungsaspekt der geologischen Speicherung von Fluiden definierter Kriterien, Regionen mit untersuchungswürdigen Speicher- und Barrieregesteinen ab. Damit stellt das Speicher-Kataster ein Informationssystem der untersuchungswürdigen Einheiten und potenziellen Nutzungsmöglichkeiten des tieferen Untergrundes des deutschen Festlandes dar. Anhand der von Reinhold & Müller (2011) angewendeten Kriterien wird in dieser Studie der Bereich der zentralen deutschen Nordsee auf Speicher- und Barrierepotenziale untersucht. Im Unterschied zu vorangegangenen Studien und Untersuchungen werden hierfür erstmals 3D-Modelle des tieferen Untergrundes als Grundlage genutzt. Dies ermöglicht neben einer verbesserten räumlichen Erfassung potenzieller Speicher und Barrieren auch weiterführende Detailuntersuchungen, beispielsweise über deren räumliche Lagebeziehungen, den strukturellen Bau und die daraus resultierenden Fallensituationen.

Zusätzlich zu der überregionalen Ausweisung von Speicherpotenzialen des tieferen Untergrundes ist im Rahmen einer Fallstudie eine Region näher betrachtet worden. Hierfür wurde ein repräsentatives Gebiet im Süden der deutschen Nordsee ausgewählt und dessen struktureller Bau anhand einer seismischen Neukartierung analysiert. Die dort vorhandenen Speicher- und Barrielithologien wurden hinsichtlich ihrer Untersuchungswürdigkeit untersucht sowie ihre strukturellen und lithologischen Charakteristika bestimmt. Für eine exemplarische Speicherstruktur im Oberrotliegend der Fallstudienregion wurde die mögliche Speicherkapazität ermittelt.

1.3 Lage des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet umfasst mit einer Fläche von ca. 36.500 km² die zentrale Deutsche Nordsee (**Abbildung 1**). Es wird geographisch durch die Grenzen des deutschen Hoheitsgebietes mit Dänemark im Norden und den Niederlanden im Westen begrenzt. Im Osten bildet der Verlauf der nordfriesischen und im Süden der ostfriesischen Küste die Grenze. Im Nordwesten begrenzt das Hauptabschiebungssystem des Zentral-Graben das Untersuchungsgebiet.

Für das nordwestlich davon anschließende Gebiet des sogenannten „Entenschnabels“ bestand zum Zeitpunkt der Durchführung dieser Studie keine ausreichende Datengrundlage. Aus diesem Grund wurde der Entenschnabel im Rahmen der vorliegenden Studie, wie auch in den vorhergehenden Studien und Tiefenkartenwerken (z. B. Kockel 1995, Baldschuhn et al. 2001) sowie der darauf aufbauenden 3D-Umsetzung (Bombien et al. 2012), nicht betrachtet. Vorarbeiten im Gebiet des Entenschnabels für eine entsprechende Speicherpotenzialbetrachtung und lithofazielle Modellierung wurden parallel zur dieser Studie ebenfalls im Rahmen des GPDN-Projektes durchgeführt (www.gpdn.de).

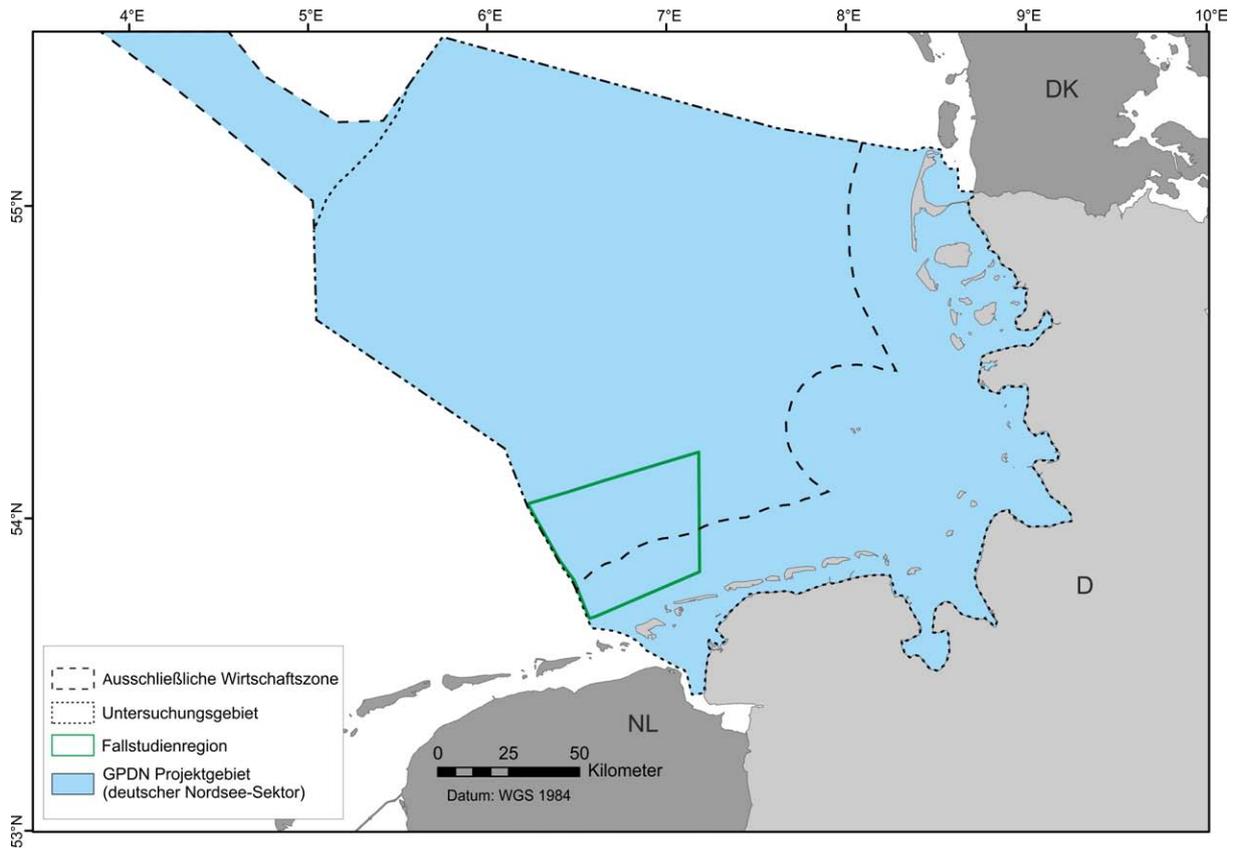


Abbildung 1: Übersicht über den deutschen Nordsee-Sektor und die Lage der Fallstudienregion.

2. Geologischer Überblick

2.1 Lithologie und Paläogeographie

Das Untersuchungsgebiet unterlag in seiner geologischen Entwicklung einschneidenden Veränderungen. Der Einfluss dieser Veränderungen auf die Bildung der Sedimente und deren lithologische Eigenschaften ist vielfältig und wird im Folgenden kurz beschrieben. Eine Übersicht der stratigraphischen Abfolge ist in **Tabelle 1** (Seite 16) dargestellt.

Die ältesten im Rahmen der vorliegenden Studie untersuchten Sedimentgesteine stammen aus dem Perm. Im Verlauf des Rotliegend bildete sich im Bereich des heutigen Nordseeraumes ein bedeutender Akkumulationsraum (das südlichen Perm-Becken), der die Ablagerungsgeschichte innerhalb des Untersuchungsgebietes bis in die Kreide hinein grundlegend prägte (Doornenbal & Stevenson 2010). Die Ablagerungsbedingungen wechselten innerhalb des Beckens mehrfach zwischen kontinental-arid und marin.

Die Gesteine des Unterrotliegend sind vorwiegend aus Vulkanoklastika aufgebaut. Dagegen besteht das Oberrotliegend aus einer Wechsellagerung von in ariden Verhältnissen abgelagerten, meist feinklastischen und evaporitischen Sedimenten (Plein 1995). Besonders im basalen Abschnitt des Oberrotliegend treten teils mächtige Sandsteine auf, mit denen im angrenzenden niederländischen Nordseeraum größere Erdgaslagerstätten verbunden sind (Doornenbal & Stevenson 2010, Kombrink et al. 2012).

Dem Rotliegend folgt das Zechstein, das aus mehreren evaporitischen Zyklen aus mächtigen Salzablagerungen sowie geringer mächtigen Karbonaten und Sulfaten aufgebaut wird. Diese Sedimentationszyklen wurden durch Meeresspiegelschwankungen und großtektonische Bewegungen mit den daraus resultierenden Ingressionen/Transgressionen verbunden mit starker Verdunstung hervorgerufen. Im deutschen Nordseeraum kam es dadurch zur

flächendeckenden Ablagerung von 1000 – 2000 m mächtigen Evaporiten, bei denen Steinsalz den größten Teil der Abfolge ausmacht (Doornenbal & Stevenson 2010). Diese Salzablagerungen können aufgrund ihrer geringen Permeabilität als gute Barrieren angesehen werden (Warren 2006).

Die Germanische Trias wird stratigraphisch in die Gruppen Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper unterteilt. Die Trias ist lithologisch sehr heterogen aufgebaut und bietet sowohl Abfolgen typischer Speicher- als auch Barriereolithologien. Die lithologische Ausprägung des Buntsandstein im Untersuchungsgebiet weist auf eine beckenzentrumsnahe Fazies hin. Im Unteren Buntsandstein dominieren im zentralen deutschen Nordsee-Sektor feinklastische Sedimente. Die Formationen des Mittleren Buntsandstein sind jeweils aus mehreren Sohlbankzyklen („*fining upward*“ Zyklen) mit teils grobklastischen Sandsteinbänken an der Basis aufgebaut (Röhling & Gast 1991), die als potenzielle Speichergesteine angesehen werden. Im Oberen Buntsandstein (Röt) wurden vorwiegend tonige und evaporitische Gesteine, insbesondere Steinsalz und Anhydrit, abgelagert. Barrierepotenzial im Röt bieten vorwiegend Tonsteine und Steinsalze. Die Kombination von potenziellen Speicherhorizonten im Mittleren Buntsandstein und potenziellen Barrierehorizonten im Oberen Buntsandstein lassen signifikante Nutzungspotenziale erwarten.

Im Unteren Muschelkalk wurden in einem flachmarinen Becken vorwiegend mikritische Karbonate, mit wenigen Einschaltungen bioklastischer oder oolithischer Bänke, abgelagert. Diese Ablagerungen deuten auf eine subtidale oder lagunäre Fazies in einem subtropischen Epikontinentalmeer hin (Wellenkalk; Feist-Burkhardt et al. 2008). Im Mittleren Muschelkalk war der Frischwasseraustausch mit dem angrenzenden Ozean eingeschränkt, sodass oft Bedingungen bis zur Übersättigung und Ausfällung von Halit auftraten. Unter den flachmarinen Ablagerungsbedingungen einer epikontinentalen Karbonatplattform bildeten sich im Bereich des Norddeutschen Becken Dolomite, Mergel, dolomitische Kalke bis hin zu Anhydriten, Gips und Salzgesteinen (Feist-Burkhardt et al. 2008). Die evaporitischen Anteile sind jedoch heute nicht mehr vorhanden. Im Oberen Muschelkalk herrschten im Vergleich zum Mittleren Muschelkalk, durch verstärkten Wasseraustausch mit dem offenen Meer, wieder überwiegend marine Bedingungen, unter denen fossilführende Kalke und Dolomite abgelagert wurden.

Der Keuper ist in seiner faziellen und lithologischen Ausprägung sehr heterogen. Der Untere Keuper (Erfurt-Formation) ist durch einen stetigen Wechsel von lakustrinen, fluviatilen mit marinen Sedimenten geprägt (Beutler 2005). Große Teile des Mittleren Keuper (Gipskeuper) werden durch eine Abfolge evaporitischer Ablagerungen vor allem Gips und Steinsalz sowie feinklastische Sedimente gebildet. Lokal kann mit dem Schilfsandstein auch ein mächtiges Sandsteinpaket ausgebildet sein. Im obersten Keuper, dem sogenannten Rhätkeuper (Exter-Formation), sind ebenfalls teils mächtige Sandsteine ausgebildet (Beutler 2005), die als Speicherlithologie in dieser Studie betrachtet werden (***Tabelle 1***).

Der Übergang vom Oberen Keuper zum Jura ist im deutschen Nordsee-Sektor nur in wenigen Bohrungen angetroffen worden. Küstennahe Bohrdaten zeigen eine Abfolge von marinen Ton- und Siltsteinen, die auf eine rasche marine Transgression hinweisen (Doornenbal & Stevenson 2010). Der Unterjura (Lias) besteht aus marin abgelagerten, organikreichen Tonsteinen, die lokal Barrierehorizonte bilden können (***Tabelle 1***). Sandsteineinschaltungen im Dogger lassen auf küstennahe Ablagerungsbedingungen schließen. Im Malm dominieren Kalksteine, die, nach den Kriterien dieser Studie (Kapitel 3.2.2), kein Speicher- oder Barrierepotenzial aufweisen. Die Ablagerungen der Unterkreide werden im Untersuchungsgebiet überwiegend von marinen Ton- und Tonmergelsteinen dominiert (Jeremiah et al. 2010), die Barrierehorizonte bilden können (siehe Kapitel 3.3.8). Ab der

Oberkreide werden im Untersuchungsgebiet vorwiegend Coccolithen führende Kalksteine (Plänerkalk- und Schreibkreide) abgelagert.

Vom frühen bis mittleren Paläozän setzte sich die Karbonatsedimentation unter tropischen Klimabedingungen fort. Vom späten Paläozän bis zum frühen Eozän änderten sich durch eine einsetzende Transgression die Sedimentationsbedingungen, sodass es vermehrt zu Ton- und Siltablagerungen im Beckenzentrum kam (Doornenbal & Stevenson 2010). Das Oligozän ist durch die Ablagerung mariner feinklastischer Sedimente geprägt. Vor allem ist hier der weit verbreitete Rupelton von Interesse, da er im Festlandsbereich häufig die Barriere zwischen süßwasser führenden Gesteinseinheiten und salinaren Aquiferen darstellt (u. a. Gast et al. 2012). Die neogenen Sedimentabfolgen im Hangenden der Mittel-Miozän-Diskordanz wurden während der Deltaentwicklung des baltischen Flusssystemes (Eridanos-Delta) abgelagert (Overeem et al. 2001, Thöle et al. 2014). Die Untersuchung der Entwicklungsgeschichte dieses Deltasystems war ein Teilprojekt des GPDN-Projektes (siehe www.gpdn.de).

2.2 Strukturgeologische Entwicklung in der zentralen deutschen Nordsee

Die Ausführungen zu den nachfolgend beschriebenen Strukturräumen, ihrer strukturellen Entwicklung und zum Aufbau sowie der Entwicklung von Salzstrukturen im deutschen Nordseeraum basieren auf den Ergebnissen des GTA (Kockel 1995, Baldschuhn et al. 2001). Neben einer allgemeinen geologischen Einführung in das Untersuchungsgebiet wurde auf Basis dieser grundlegenden Arbeiten und 3D-Umsetzungen (GTA-3D, Bombien et al. 2012; GSN, Kaufmann et al. 2014) für diese Studie eine Untergliederung der zentralen deutschen Nordsee in geologisch unterschiedliche Strukturräume (siehe **Abbildung 2**) vorgenommen. Diese Untergliederung wurde in Hinblick auf die strukturellen Einflussfaktoren (Ausprägung und Verbreitung), der in Kapitel 3.2.1 definierten Speicher- und Barrierekomplexe durchgeführt.

2.2.1 Gliederung in Strukturräume

In dieser Studie wurde die zentrale Deutsche Nordsee in neun charakteristische Strukturräume unterteilt (**Abbildung 2**). Diese zeichnen sich durch Besonderheiten im Strukturaufbau, durch ein spezifisches Tiefenniveau und durch ein charakteristisches stratigraphisches Profil aus. Dabei ist besonders der Einfluss von verschiedenen großräumigen erosiven Ereignissen und der Genese von Salzstrukturen auf die Entwicklung dieser Strukturräume zu beachten. Diese Einflussfaktoren spiegeln sich in der Verbreitung und Ausprägung der untersuchten Speicher- und Barrierekomplexe wider. Die neun Strukturräume lassen sich den folgenden tektonischen Großstrukturen zuordnen:

- 1.) **Graben- und Beckenbereiche** (Subsidenzzentren, u. a. Horn-Graben, westliche Ausläufer des Glückstadt-Graben und Teile des nördlichen nordwestdeutschen Becken), in denen ein Großteil der ursprünglichen stratigraphischen Abfolge erhalten ist und die Basis Zechstein teils über 9000 m tief versenkt wurde. Die Abfolgen des Jura sind lokal in Salzstrukturrandsenken erhalten.
- 2.) **Plattformgebiete** (G- und L-Plattform, Westschleswig-Block), auf denen Ablagerungen der Unteren und teilweise auch der Mittleren Trias vollständig erhalten sind, jedoch die Sedimente des Jura komplett erodiert sind und die sedimentäre Überlieferung erst wieder in der Unterkreide einsetzt. Die Basis des Zechstein verläuft etwa in einer Tiefe von 4000 m. Zudem weisen diese Gebiete nur eine geringe Beeinflussung durch Störungen auf.

- 3.) **Hochlage** (Schillgrund-Hoch), auf der ein Großteil der mesozoischen Ablagerungen erodiert wurde und oberster Oberjura sowie Unterkreide auf residualen Unteren Buntsandstein, Zechstein oder sogar dem paläozoischen Grundgebirge aufliegen. Die Basis des Zechstein, wenn erhalten, liegt meist deutlich oberhalb von 4000 m.
- 4.) Teils stark gestörte **Übergangsbereiche**, die als „Terrassen“ (Bruchstufen) oder weniger stark versenkte Becken- und Grabenbereiche, zwischen den zuvor beschriebenen Strukturformen, bezeichnet werden können (**Abbildung 2, Abbildung 3**). In den Zentren der zuzuordnenden Grabenstrukturen und in Randsenken von Salzstrukturen sind meist noch Teile der Abfolgen des Mittleren Keuper erhalten. Der Strukturraum „nördliches nordwestdeutsches Becken und Pompeckj-Block“ stellt den Übergang zum Glückstadt-Graben und zum zentralen nordwestdeutschen Becken dar und ist tiefer versenkt als die übrigen Übergangsbereiche.

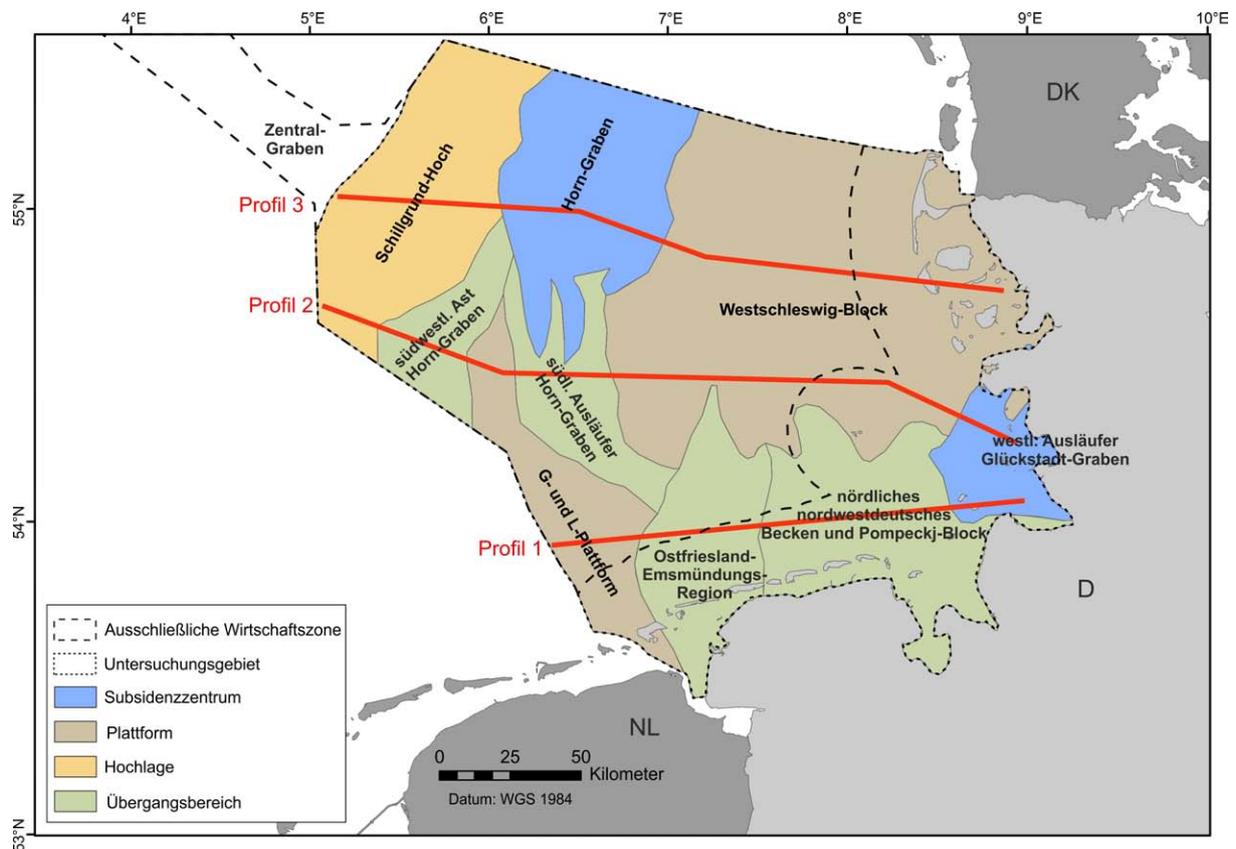


Abbildung 2: Die Abbildung zeigt die Lage und Zuordnung der neun Strukturräume zu tektonischen Großstrukturen (Blau: Graben- und Beckenbereiche, Braun: Plattformgebiete, Gelb: Hochlage, Grün: teils stark gestörte Übergangsbereiche). Der Verlauf der drei geologischen Übersichtsprofile aus **Abbildung 3** ist zusätzlich dargestellt.

Anhand von drei, ungefähr E-W verlaufenden geologischen Profilen, die auf Basis der 3D-Modelle des GSN und des GTA-3D erstellt wurden, werden die Charakteristika dieser Strukturräume dargestellt (**Abbildung 3**). Die untersuchten Speicher- und Barrierekomplexe sind farblich hervorgehoben. Die in **Abbildung 2** dargestellte Einteilung spiegelt weitgehend die von der Trias bis zur Unterkreide etablierten Großstrukturen wider. Vorangegangene, oder sich ab der Oberkreide entwickelnde, Strukturmuster werden durch diese Einteilung, aufgrund ihrer teils deutlich unterschiedlichen strukturellen Zusammenhänge, aber nur ungenügend dargestellt. Da ein Großteil der bewerteten Speicher- und Barrierekomplexe (siehe Kapitel 3.2.1) jedoch in den Zeitraum von der Trias bis zur Unterkreide fallen, ist diese Einteilung für die Zwecke dieser Studie ausreichend.

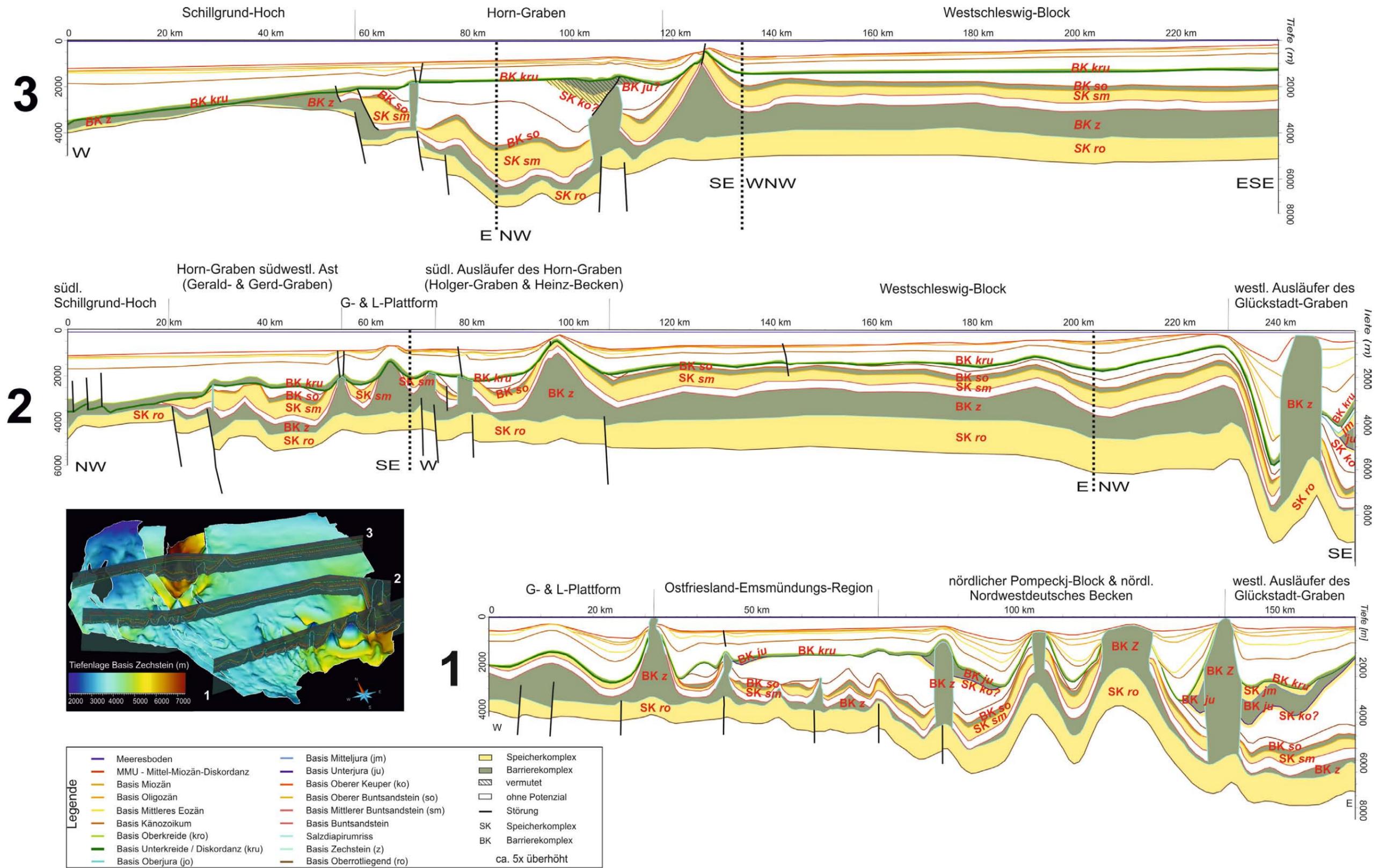


Abbildung 3: Geologische Profile auf Basis des GSN und GTA-3D. Profile 1, 2 und 3 verlaufen jeweils über das südliche, zentrale und nördliche Untersuchungsgebiet in etwa von Westen nach Osten. Eine 3D-Ansicht (unterhalb von Profil 2) der Basis Zechstein (basierend auf GSN) und der Profilverläufe dient zur Korrelation der in den Profilen dargestellten Strukturen. Die Anzahl der untersuchten Komplexe nimmt nach Westen deutlich ab. Die Profile verdeutlichen weiterhin den Einfluss der Salzstrukturentwicklung auf den Strukturbaue des Deckgebirges. Die Unterkreide-Diskordanz, im Liegenden des Barrierekomplex Unterkreide (BK kru), schneidet nach Westen zunehmend in die liegenden frühtriassischen bis paläozoischen Abfolgen (Profile 2 und 3). Weitläufige Trends in der Mächtigkeit der Komplexe sind aus den Profilen zu entnehmen (nach Osten Mächtigkeitzunahme des SK ro; Profile 1 und 2). Auffallend ist, dass es sowohl Gebiete gibt, die tief versenkt wurden und stark gestört sind (z. B. Horn-Graben) als auch kaum gestörte Plattformgebiete (z. B. Westschleswig-Block).

2.2.2 Strukturraumentwicklung

Im Perm sind die meisten der heute den Untergrund der deutschen Nordsee dominierenden Großstrukturen und Strukturräume noch nicht oder nur teilweise angelegt. Große Teile des Norddeutschen Becken sind nach Gast (1988) zu Beginn des Rotliegend durch ein etwa N-S orientiertes Horst- und Grabensystem mit relativ geringen Versätzen (maximal wenige hundert Meter) gekennzeichnet. Für den deutschen Nordseeraum sind ähnliche Strukturmuster zu vermuten. Im Oberrotliegend und Zechstein ist aufgrund großflächiger Beckentrends bei der Mächtigkeitenverteilung und bei geringen faziellen Variationen von einer nur geringen tektonischen Aktivität auszugehen. In erster Näherung ist der deutsche Nordseeraum zu dieser Zeit durch ein E-W bis ESE-WNW streichendes Becken ohne ausgeprägtes strukturelles Relief geprägt (Doornenbal & Stevenson 2010). Auch die geringe Schwankungsbreite in der Mächtigkeit des Unteren Buntsandstein (Röhling 1988, Jähne et al. 2013) deutet auf eine tektonisch ruhige Phase hin. Nur in Richtung der heute am tiefsten versenkten Gebiete im Zentral-Graben, im Horn-Graben und im nördlichen nordwestdeutschen Becken, lassen stetige Mächtigkeitenzunahmen des Unteren Buntsandstein auf bis zu ca. 600 m in den Grabenzentren auf eine erhöhte Subsidenzrate zu dieser Zeit schließen. Das heutige Strukturbild des Horn-Graben sowie des Glückstadt-Graben wurde hauptsächlich während des Mittleren Buntsandstein angelegt (**Abbildung 2, Abbildung 3**, Profil 1 & 2). So wurden im Mittleren Buntsandstein innerhalb von nur ca. 5 Ma im Horn-Graben bis zu 4000 m Sedimente abgelagert (Jähne et al. 2013). Das entspricht einer für intrakontinentale Systeme sehr hohen gemittelten Sedimentationsrate von ca. 800 m pro Mio. Jahre. Nach der Ablagerung der Hardegsen-Formation kam es in großen Bereichen des deutschen Nordseeraums zur Erosion (H-Diskordanz, Röhling 1988) von großen Teilen der zuvor abgelagerten Buntsandstein-Formationen. Die als H-Diskordanz bezeichnete Erosionsdiskordanz ist in Norddeutschland und in der deutschen Nordsee die ausgeprägteste einer Vielzahl basaler Diskordanzen im Buntsandstein. Insbesondere entlang der NE-SW streichenden Borkum-Schwelle und auf der westlichen Schulter des Horn-Graben erfolgte der erosive Einschnitt bis tief in die Abfolgen des Mittleren und Unteren Buntsandstein (**Abbildung 4**, Röhling 1988). Durch die Halokinese der Zechstein-Salinare, die ab dem Muschelkalk stellenweise und im Keuper großflächig einsetzt, entstand ein komplexes, lokal stark variierendes Muster aus Hebungs- und Senkungsgebieten (Kockel 1995). So ist in den Randsenken der Salzstrukturen häufig eine deutliche Mächtigkeitenzunahme der Abfolgen des Keuper zu beobachten (**Abbildung 3**). Die Sedimente des oberen Mittleren Keuper und des Oberen Keuper sind, aufgrund späterer regionaler erosiver Ereignisse, überwiegend nur in solchen Randsenken erhalten.

Mit Ausnahme des südöstlichen Untersuchungsgebietes sind Aussagen zur strukturellen Entwicklung während des Jura, bedingt durch die weitflächige Erosion jurassischer Sedimente, nur eingeschränkt und nur über indirekte Methoden möglich (z. B. Vitrinit-Reifedaten, Subsidenz- und Kompaktionsanalysen). In den südöstlichen Strukturräumen sind, insbesondere in Randsenken von Salzstrukturen, teils vollständige jurassische Abfolgen mit synkinematischen Ablagerungen erhalten (**Abbildung 5**). Das lässt darauf schließen, dass in diesen Bereichen, zumindest während des Jura, Halokinese die Strukturentwicklung im Deckgebirge entscheidend beeinflusst hat.

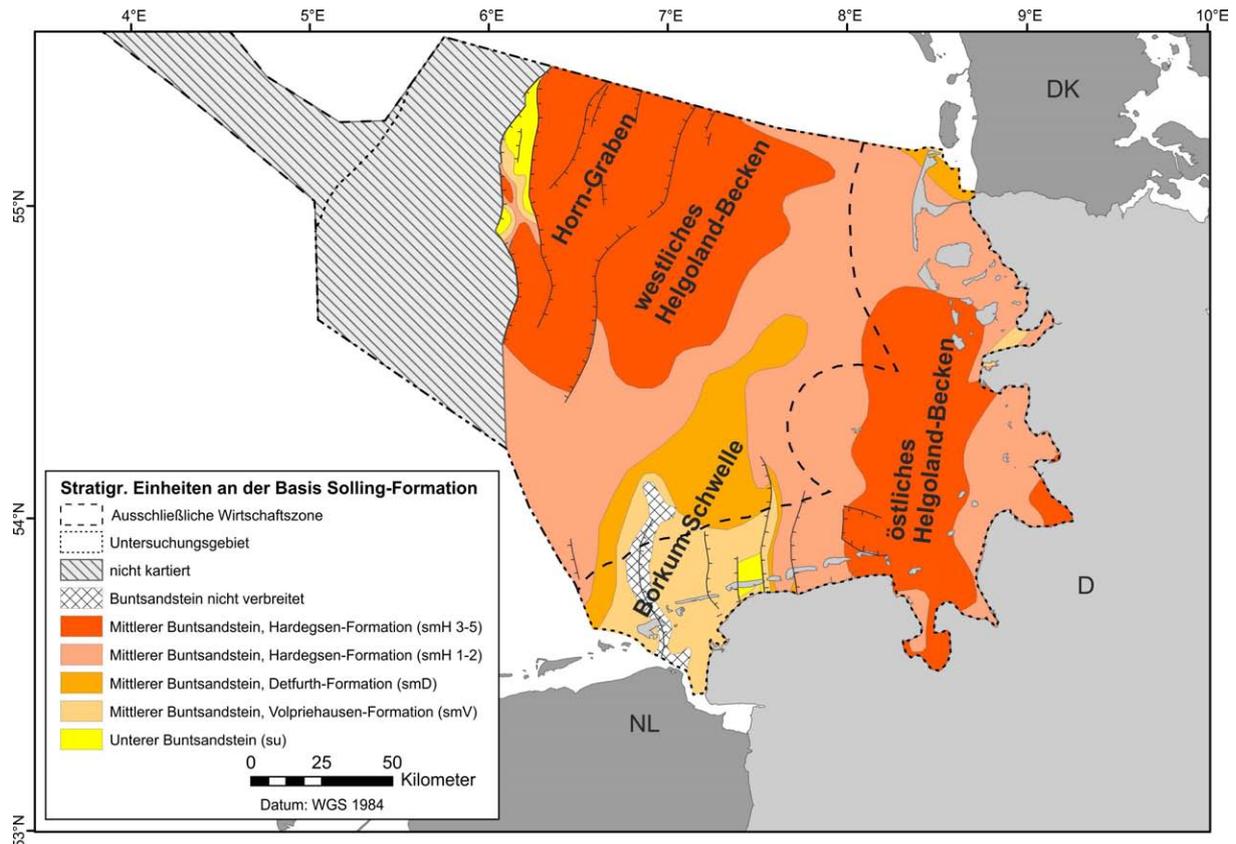


Abbildung 4: Darstellung der an der Basis der Solling-Formation ausstreichenden Abfolgen (verändert nach Röhling 1988).

Durch die in der Unterkreide vorherrschenden klimatischen Bedingungen, sedimentären Prozesse und durch die geringe tektonische Aktivität kam es zu einem fast vollständigen Stillstand der Salzbewegungen im Bereich vieler Salzstrukturen. So weist die Mehrheit der Salzdiapire in der zentralen deutschen Nordsee unter- bis oberkreidische Sedimente an ihrem Top auf (**Abbildung 3**). Darüber hinaus sind als weiteres Indiz für die Abnahme der Salzbewegungen nur geringe Mächtigkeitsschwankungen in den Ablagerungen der Unterkreide zu beobachten.

Synkinematische Mächtigkeitsschwankungen und strukturbezogene Erosionsdiskordanzen in der Oberkreide deuten auf die Reaktivierung einiger Salzstrukturen insbesondere in der südlichen deutschen Nordsee hin (**Abbildung 22**, Seite 53).

In der Oberkreide unterliegt das Schillgrund-Hoch (**Abbildung 2**, **Abbildung 5**) erstmals wieder deutlicher Subsidenz. Dies ist im engen Zusammenhang mit der kompressiven Beanspruchung des westlich anschließenden Zentral-Graben zu sehen (Vejbaek & Andersen 1987, 2002, Vejbaek et al. 2007). Eindeutige Anzeichen für eine kompressive Beanspruchung von Strukturen, wie sie beispielsweise im niedersächsischen Becken und entlang des Zentral-Graben auftreten, sind in den Oberkreideablagerungen in der zentralen deutschen Nordsee jedoch nicht zu beobachten. Durch die fortschreitende Öffnung des Nordatlantiks und durch die Vorgänge der alpidischen Orogenese ergibt sich ab dem Paläogen eine deutliche Änderung im Spannungsfeld, das ein völlig neues Strukturmuster und anders gerichtete großräumige Sedimentationstrends zur Folge hat.

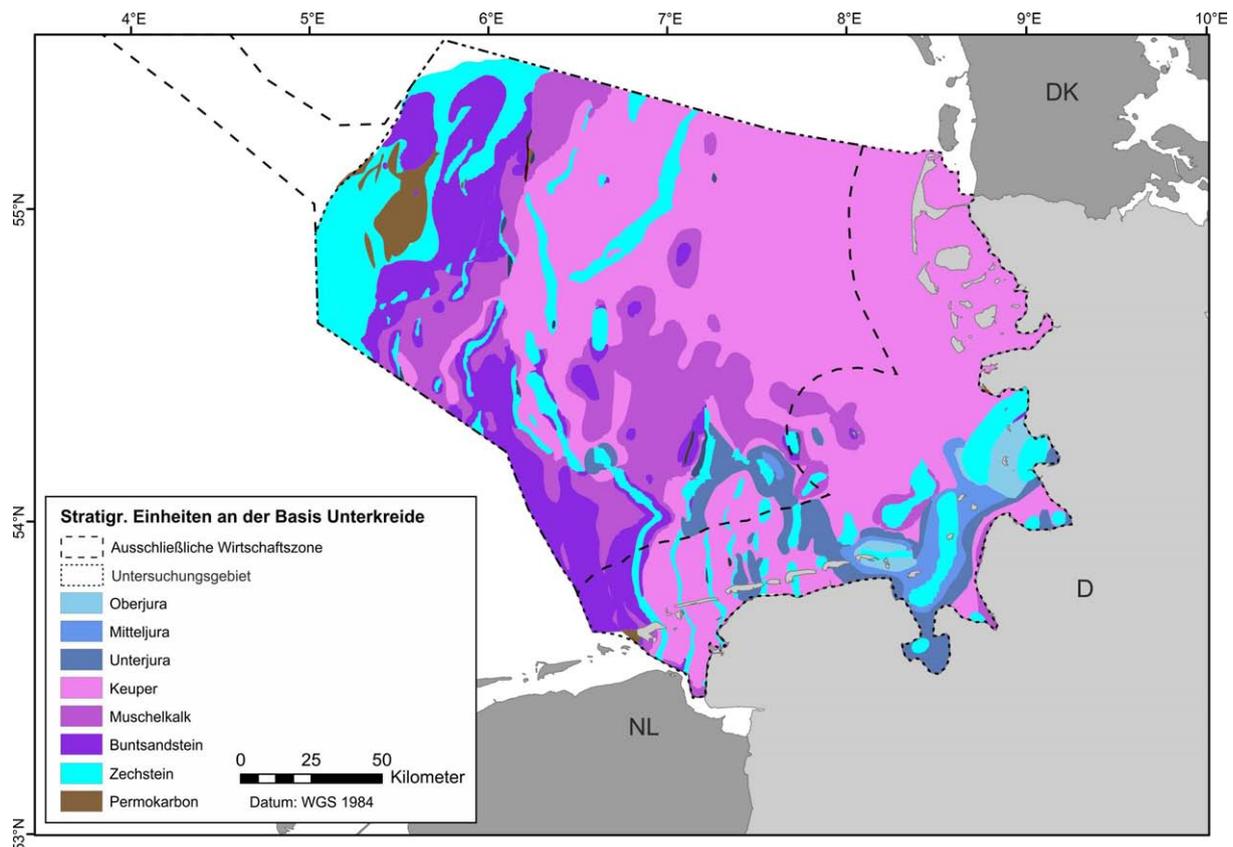


Abbildung 5: Darstellung der an der Basis Unterkreide ausstreichenden Abfolgen (verändert nach Baldschuhn et al. 2001). Die Variabilität der anstehenden Einheiten verdeutlicht den nach Westen zunehmenden Einfluss der Unterkreide-Diskordanz.

Daraus folgt eine stetige Mächtigkeitzunahme der känozoischen Sedimente zum zentralen Nordseebereich hin (Doornenbal & Stevenson 2010). Infolge dieser großräumigen Änderungen setzt erneut zunehmende Halokinese mit teilweiser Reaktivierung von bestehenden Salzstrukturen ein (Kockel 1995). Diese erneute Episode des Salzaufstiegs wird durch ein erosives Ereignis, miozänen bis pliozänen Alters, an vielen Salzstrukturen abrupt beendet (Mittel-Miozän-Diskordanz). Nur einige Salzstrukturen zeigen danach noch aktiven Salzaufstieg und noch weniger durchstoßen aktiv neogene Sedimentabfolgen (Kockel 1995).

2.2.3 Salzstrukturen

Schon die Strukturentwicklung deutet auf den engen Zusammenhang der Entwicklung der tektonischen Großstrukturen (z. B. Gräben und Plattformen) mit der Genese, Geometrie und Orientierung von Salzstrukturen hin (**Abbildung 3, Abbildung 6**). Je nach dem Strukturbaueiner Region können folgende Muster in der Ausprägung und Verteilung von Salzstrukturen beobachtet werden:

- 1.) In und entlang von **Graben- und Beckenbereichen** (Subsidenzzentren) sind vorwiegend Salzmauern ausgebildet, die sich teilweise an größeren Versätzen im Grundgebirge orientieren. Im Horn-Graben, im Bereich des Glückstadt-Graben und auch in Teilen des nordwestdeutschen Beckens kam es im Verlauf der Salzstrukturgenese neben der Mobilisierung der Zechstein-Salinare auch zur Mobilisierung der Oberrotliegend-Salinare.
- 2.) Das mesozoische Deckgebirge ist auf den **Plattformen** überwiegend durch schwach aufgewölbte Salzkissen geprägt.

- 3.) Auf **strukturellen Hochlagen** (Schillgrund-Hoch) sind aufgrund der tiefgreifenden Erosion, hervorgerufen durch triassisch bis jurassische Hebung, keine klaren Hinweise auf eine Kissenbildung oder Diapirgenese vorhanden. Da jedoch die vergleichbaren Plattformgebiete der Nordsee Kissenstrukturen aufweisen und die angrenzenden Gebiete durch eine sehr stark ausgeprägte Halotektonik charakterisiert sind, ist auch für das Schillgrund-Hoch zumindest eine spät-triassische Kissenbildung anzunehmen.
- 4.) Innerhalb der **Übergangsbereiche** (z. B. im südwestlichen Ast des Horn-Graben) ist eine große Formenvielfalt der Salzstrukturen zu verzeichnen. Die Diapire und Salzmauern sind häufig schmaler als in den Graben- und Beckenbereichen und treten in Verbindung mit ausgeprägten Antiklinalstrukturen auf.

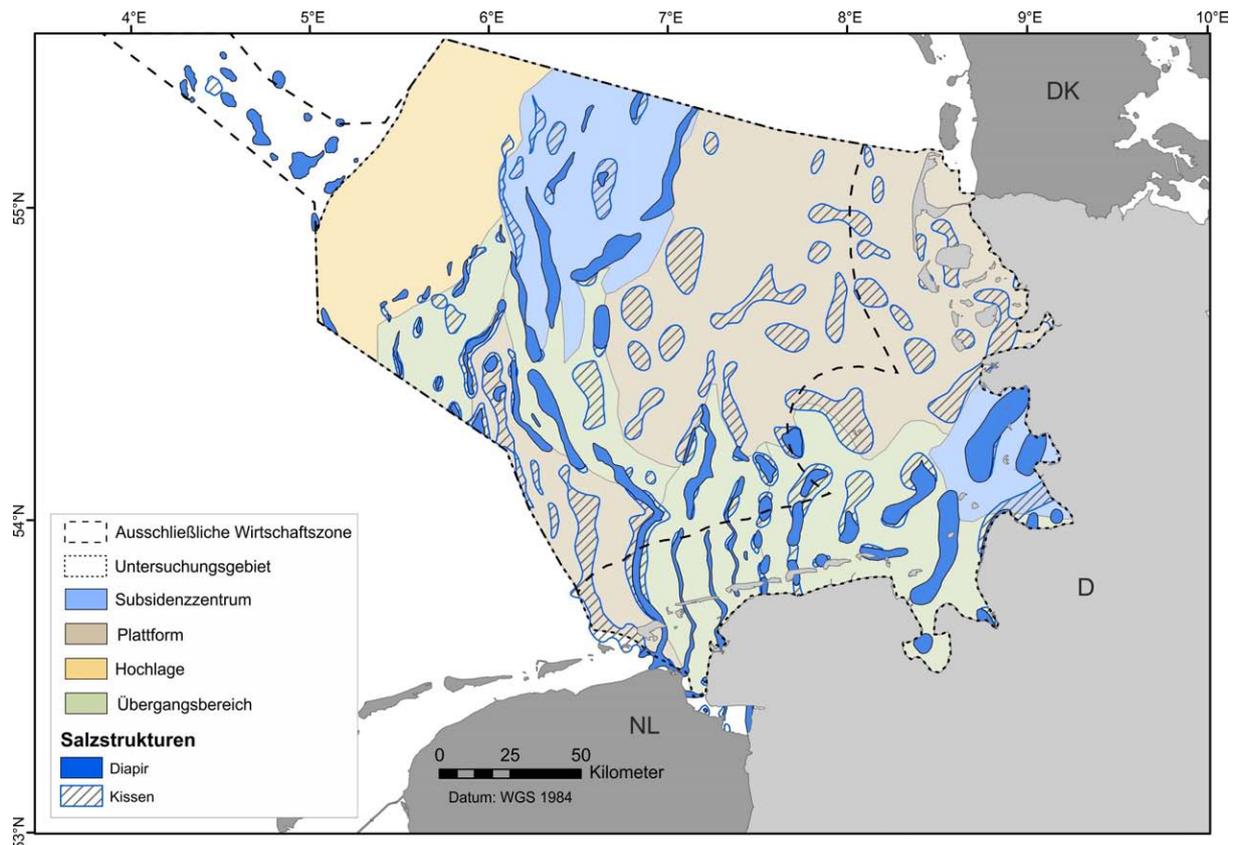


Abbildung 6: Salzstrukturen im Untergrund der deutschen Nordsee (Reinhold et al. 2008). Bezogen auf die dargestellten Strukturräume unterscheiden sich die Strukturrichtung, Genese und Geometrie von Salzstrukturen teilweise deutlich.

Die Auswirkungen der Halokinese der Zechstein-Salinare auf den Strukturbau des Untersuchungsgebietes zeigen sich besonders im Bereich der großen Grabenstrukturen (Horn-Graben und Glückstadt-Graben). Mehrere 10er km lange Salzstrukturen (u. a. Salzmauern) durchziehen dort das mesozoische Deckgebirge (**Abbildung 6**). In diesen Bereichen kann ein komplexer Wechsel zwischen Ablagerung und Erosion festgestellt werden. So ist der Untergrund der deutschen Nordsee, neben den großräumigen Erosionsereignissen (Basis Unter- und Oberrotliegend, Basis Solling-Formation (H-Diskordanz), Basis Unterkreide, Mittel-Miozän-Diskordanz), vor allem durch eine Vielzahl kleinräumiger Erosionsdiskordanzen entlang der verschiedenen Salzstrukturen gekennzeichnet (**Abbildung 3**).

3. Speicherpotenziale in der zentralen deutschen Nordsee

Im folgenden Kapitel werden die Datengrundlage, Methodik und Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten zur Analyse des Speicherpotenzials im tieferen Untergrund der zentralen deutschen Nordsee beschrieben. Die untersuchten Speicher- und Barrierekomplexe werden hinsichtlich ihrer Verbreitung, Tiefenlage, Mächtigkeit und Untersuchungswürdigkeit in Kartenform dargestellt und erläutert sowie ihre strukturellen Lagebeziehungen untersucht.

3.1 Datengrundlage

Die Datengrundlage dieser Studie besteht vorwiegend aus geologischen (über 50 Tiefbohrungen) und geophysikalischen Daten (Bohrlogs, Seismiken) des tieferen Untergrundes (**Abbildung 7**), 3D-Modellen (GTA-3D und GSN) und Literatur (u. a. Röhling 1988, Baldschuhn et al. 2001, Doornenbal & Stevenson 2010). Durch Nutzungsvereinbarungen für industrieeigene Daten konnten im Rahmen des GPDN-Projektes ausgewählte Daten und speichergeologisch relevante Informationen genutzt werden. Nähere Informationen sowie eine Auflistung der freigegebenen Daten sind in Arfai et al. (2011) enthalten.

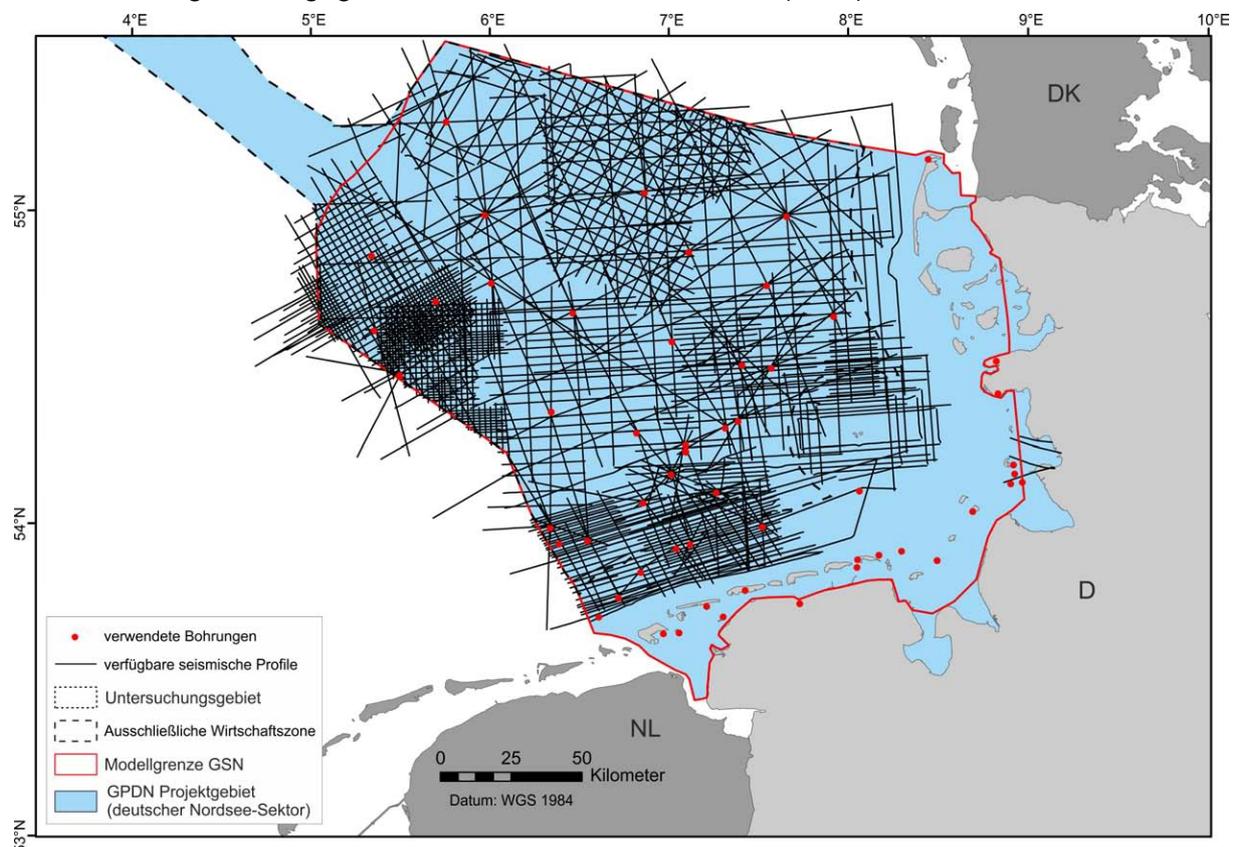


Abbildung 7: Lage der im Projekt GPDN verwendeten seismischen Linien und Tiefbohrungen.

3.2 Methodik

Als Grundlage für die Untersuchung des Speicherpotenzials des tieferen Untergrundes der zentralen deutschen Nordsee dienen Flächenkonstruktionen von der Basis Rotliegend bis zur Mittel-Miozän-Diskordanz. Als Vorarbeit für die Analyse wurden Informationen zur Tiefenlage und Mächtigkeit einzelner Horizonte und Formationen aus einem bestehenden 3D-Modell (Geotektonischer Atlas 3D; Bombien et al. 2012) mit Literaturdaten (u. a. Kockel 1995, Baldschuhn 1996), neuen Erkenntnissen aus der Interpretation von Tiefbohrungen sowie geophysikalischen Daten (Seismik und Logdaten) ergänzt, harmonisiert und in Form

eines generalisierten und erweiterten Strukturmodells des zentralen deutschen Nordsee-Sektors (GSN) zusammengeführt. Die Beschreibung der Methodik zur Aufbereitung bestehender Karten- und Modelldaten und der Erstellung des GSN wird in Kaufmann et al. (2014) beschrieben.

Für einen lückenlosen Anschluss an das Speicher-Kataster Deutschland wurde für die küstennahen Abschnitte des Arbeitsgebietes, die nicht durch das GSN abgedeckt werden, die Ausweisung der Untersuchungswürdigkeit konsistent vervollständigt (s. Kapitel 3.3).

3.2.1 Definition Speicher- und Barrierekomplex

In der vorliegenden Studie werden die Begriffe Speichergesteinskomplex (kurz Speicherkomplex; SK) und Barrieregesteinskomplex (kurz Barrierekomplex; BK) entsprechend der Definitionen von Reinhold & Müller (2011) verwendet. Demzufolge werden unter dem Begriff „Komplex“ Formationen oder Gesteinsschichten zusammengefasst, die eine räumlich abgrenzbare Einheit innerhalb eines ehemaligen Sedimentationsraumes bilden.

Komplexe enthalten Gesteinsschichten, die aufgrund ihrer lithologischen Zusammensetzung, beziehungsweise ihrer petrophysikalischen Eigenschaften, potenziell als Speicher oder Barriere geeignet sein können. Die mögliche Eignung der Gesteinskomplexe wird anhand von definierten Kriterien festgelegt (Chadwick et al. 2008, Reinhold & Müller 2011).

Speichergesteine weisen hohe Porositäts- und Permeabilitätswerte auf. Typischerweise handelt es sich dabei um klastische, poröse (Porenspeicher), geklüftete (Kluftspeicher) oder kavernöse Gesteine. Darüber hinaus müssen sie eine bestimmte Mindestmächtigkeit und eine signifikante flächige Verbreitung aufweisen, um ein hinreichend großes Speichervolumen zu bieten. Das nutzbare Speichervolumen eines Gesteins wird jedoch neben der primären lithologischen Zusammensetzung und den Bedingungen während seiner Ablagerung, hauptsächlich von der späteren geologischen Entwicklung beeinflusst (siehe auch Kapitel 3.5). So können sekundäre Prozesse wie Zementation und Kompaktion das nutzbare Porenvolumen des Gesteins reduzieren. Barrierehorizonte isolieren hydrodynamisch die darunter liegenden Speichergesteine (horizontal und vertikal). So gewährleisten sie deren sichere und langfristige geologische Abdichtung (Hoth 2007). Die petrographischen, petrochemischen und strukturellen Eigenschaften dieser Gesteine bestimmen ihre Wirkung als Barriere. Im Fokus stehen dabei besonders Ton- und Salzgesteine, die eine sehr geringe Durchlässigkeit und ein günstiges Bruch- und Deformationsverhalten besitzen (Warren 2006, Hoth 2007).

3.2.2 Kriterien für die Ausweisung untersuchungswürdiger Speicher- und Barrierekomplexe

Um die Ergebnisse des Speicher-Kataster Deutschland mit dieser Studie um den zentralen deutschen Nordseebereich zu erweitern, wurden für die Ausweisung von untersuchungswürdigen Speicher- und Barrierekomplexen ebenfalls die von Chadwick et al. (2008) definierten Kriterien verwendet. Dazu wurden die Speicherkomplexe im Untersuchungsgebiet nach den Parametern Tiefenlage und Nettomächtigkeit kategorisiert. Die Grundlage hierfür war der Geotektonische Atlas von Nordwestdeutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor (Baldschuhn et al. 2001) und darauf basierende 3D-Modelle. Folgende Kriterien wurden angewendet:

- Mächtigkeit: Nettomächtigkeit der untersuchungswürdigen Speicherhorizonte in den jeweiligen Speicherkomplexen > 10 m
- Tiefenlage: Top des Speicherkomplexes > 800 m unter NN

Die Mächtigkeiten einzelner Speicherhorizonte (z. B. Sandsteinbänke) wurden auf Basis der Angaben in den Schichtenverzeichnissen von Bohrungen aufsummiert, um die Nettomächtigkeit der Speicherlithologien innerhalb eines Speicherkomplexes zu bestimmen. Diese wurde teils durch weitere Indikatoren (z. B. Kernuntersuchungen, Logdaten, Literaturdaten) ergänzt. In dieser Studie wurden jedoch, im Vergleich zu Teilgebieten des Speicher-Kataster Deutschland, in denen auch Kluftspeicher (Bsp. Zechsteinkarbonate für Thüringen (Huckriede & Zander 2011)) betrachtet wurden, nur Porenspeicher auf ihre Untersuchungswürdigkeit analysiert.

Analog zu den Speicherkomplexen wurden Barrierekomplexe folgendermaßen kategorisiert:

- Mächtigkeit: Mindestmächtigkeit geeigneter Barrierehorizonte im jeweiligen Barrierekomplex > 20 m
- Tiefenlage: Basis des Barrierekomplexes > 800 m unter NN

Die Identifikation und Ausweisung der untersuchten Speicher- und Barrierekomplexe beruht auf der Auswahl und generalisierten Zusammenfassung stratigraphischer Einheiten, die aufgrund ihrer Lithologie, Mächtigkeit und Tiefenlage als Speicher- oder Barrierehorizonte dienen können.

Folgende Einheiten wurden als Speicherkomplexe definiert (**Tabelle 1**):

- Oberrotliegend
- Mittlerer Buntsandstein
- Rhätkeuper
- Mitteljura

Folgende Einheiten wurden als Barrierekomplexe definiert:

- Zechstein
- Oberer Buntsandstein
- Unterjura
- Unterkreide

In dieser Studie werden Salz- und Tongesteinshorizonte als geologische Barrieren betrachtet. Wie auch im Projekt Speicher-Kataster Deutschland, wurden nachrangig Tonmergelsteine als Barrirelithologie berücksichtigt. Da diese möglicherweise ungünstigere Barriereigenschaften aufweisen als Ton- und Salzgesteine, werden Gebiete, in denen Tonmergelsteine zur Erreichung der Mindestmächtigkeit beitragen beziehungsweise beitragen könnten, gesondert ausgewiesen. Dies betrifft die Barrierekomplexe Unterjura und Unterkreide (**Abbildung 13, Abbildung 15**).

Die getroffene Auswahl und die stratigraphische Zuordnung der ausgewiesenen Speicher- und Barrierekomplexe (**Tabelle 1**) deckt sich überwiegend mit den untersuchten Einheiten der Speicherpotenzialbewertung der Festlandbereiche von Niedersachsen (Knopf 2011) und Schleswig-Holstein (Hable et al. 2011).

Stratigraphische Einteilung			DNS		NI		SH		
			SK	BK	SK	BK	SK	BK	
Quartär									
Tertiär	Pliozän								
	Miozän								
	Oligozän	Chatt							
		Rupel							
	Eozän								
Paläozän									
Kreide	Oberkreide	Maastricht							
		Campan							
		Santon							
		Coniac							
		Turon							
	Unterkreide	Cenoman							
		Alb							
		Apt							
		Barrême							
		Hauterive							
		Valangin							
Berrias / "Wealden"									
Jura	Oberjura (Malm)	Tithon							
		Kimmeridge							
		Oxford							
	Mitteljura (Dogger)	Callov							
		Bathon							
		Bajoc							
	Aalen	Aalen							
		Toarc							
		Pliensbach							
Unterjura (Lias)	Sinemur								
	Hettang								
Trias	Keuper	O Rhätkeuper							
		Steinmergelkeuper							
		Oberer Gipskeuper							
		Schilfsandstein							
		Unterer Gipskeuper							
	U Lettenkeuper								
	Muschelkalk	Ob. Muschelkalk							
		Mittl. Muschelkalk							
		Unt. Muschelkalk							
	Buntsandstein	O Röt							
		M Solling-Formation	Solling-Formation						
			Hardegsen-Formation						
			Detfurth-Formation						
Volpriehausen-Fm.									
Quickborn-Formation									
U Bernburg-Formation		Bernburg-Formation							
	Calvörde-Formation								
Perm	Zechstein	Fulda-Formation							
		Friesland-Formation							
		Ohre-Formation							
		Aller-Formation							
		Leine-Formation							
		Staufurt-Formation							
		Werra-Formation							
	Rotliegend	Oberrotliegend							
		Unterrotliegend							

Tabelle 1: Die Tabelle zeigt die stratigraphische Abfolge und die Ausweisung von Speicher- und Barrierekomplexen in der zentralen deutschen Nordsee (DNS), Niedersachsen (NI) und Schleswig-Holstein (SH). Die Unterschiede resultieren aus landesspezifischen Annahmen.

Erläuterung:

☐ Vorkommen von potenziellen Speicherhorizonten

■ Vorkommen von potenziellen Barrierehorizonten

SK Speicherkomplex

BK Barrierekomplex

DNS dt. Nordsee-Sektor

SH Schleswig-Holstein

NI Niedersachsen

▨ Aufgrund der unzureichenden Datengrundlage wurden das Oberrotliegend und das Zechstein in SH nur summarisch abgeschätzt

3.2.3 Konstruktion der Potenzialkarten

Für die Erstellung der Potenzialkarten wurden die zu untersuchenden Speicher- und Barrierekomplexe nach ihrer Mindest- beziehungsweise Nettomächtigkeit und Tiefenlage klassifiziert. Die Informationen über die Netto- und Mindestmächtigkeiten sowie über die lithologische Zusammensetzung wurden aus den Schichtenverzeichnissen verfügbarer Tiefbohrungen übernommen (**Abbildung 7**) und in eine ArcGIS-Datenbank (v10.2, ESRI) importiert. Dabei wurden nur Bohrungen ausgewertet für die eine Saigermächtigkeit beziehungsweise Saigerteufe der entsprechenden Lithologien berechnet werden konnte. Bohrungen, die einen Komplex nicht vollständig durchteuft haben (z. B. im Staßfurt-Karbonat enden), aber ausreichende Mächtigkeiten erbohrt haben, wurden ebenfalls zur Potenzialabschätzung hinzugezogen. Alle aufgeführten Angaben zu den Mächtigkeiten einzelner Lithologien beziehen sich jedoch nur auf solche Bohrungen, die den betreffenden Komplex vollständig durchteuft haben.

Nachdem die lithologische Ausprägung einer geeigneten Speicher- beziehungsweise Barrierylithologie bestimmt sowie deren Mindest- oder Nettomächtigkeit auf Basis der Bohrungsbefunde berechnet wurde, wurde das Kriterium der Mindesttiefenlage (Kapitel 3.2.2), mithilfe der Modellierungssoftware gOcad (v2011.3, Paradigm), auf das GSN angewendet. Die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse in Form von Potenzial-, Tiefenlage- und Mächtigkeitskarte erfolgte mittels ArcGIS. Eine Bewertung der möglichen Speichergesteine hinsichtlich Porosität und Permeabilität wurde aufgrund der sehr heterogen verteilten Datengrundlage nicht durchgeführt.

Die im Folgenden aufgeführten Ergebnisse für die Abgrenzung untersuchungswürdiger Gebiete sind im Übersichtsmaßstab 1:1 000 000 dargestellt. Die gewählte Darstellung der Ergebnisse orientiert sich am Speicher-Kataster Deutschland (Reinhold & Müller 2011). Entsprechend werden Bereiche eines Komplexes, die als untersuchungswürdig bestimmt wurden, grün hervorgehoben. Bereiche, die aufgrund des Nichterfüllens des Mächtigkeitskriteriums als nicht untersuchungswürdig gelten, sind rot dargestellt. Bereiche, in denen der Speicher- oder Barrierekomplex nur das Tiefenkriterium nicht erfüllt, sind in gelb gekennzeichnet (u. a. **Abbildung 11**). Neben den Potenzialkarten wurden zur weiteren Charakterisierung der Speicher- und Barrierekomplexe Tiefenlage- und Mächtigkeitskarten der Komplexe erstellt. Zusätzlich wurden die für den jeweiligen Komplex prägendsten Störungen auf Basis des GSN dargestellt. Diese Vorgehensweise erlaubt eine flächenhafte Bewertung der Speicherpotenziale im zentralen deutschen Nordsee-Sektor. Standortsspezifische Aussagen sind jedoch nur auf Basis weiterführender Detailuntersuchungen möglich.

3.3 Bewertung potenzieller Speicher- und Barrierekomplexe

Die folgende Bewertung potenzieller Speicher- und Barrierekomplexe in Kartenform ist zusätzlich über eine Kartenserveranwendung verfügbar (www.gpdn.de). Es werden jeweils die Tiefenlage, die Mächtigkeit und die daraus abgeleitete Ausweisung der Untersuchungswürdigkeit dargestellt. Tiefen- und Mächtigkeitslinien der Komplexe wurden auf Basis des GSN-Modells erstellt. Ihre Darstellung erfolgte nur für die untersuchungswürdigen Gebiete. Für einen lückenlosen Anschluss an das Speicher-Kataster Deutschland wurde für die küstennahen Abschnitte des Arbeitsgebietes, die nicht durch das GSN abgedeckt werden, unter Berücksichtigung der Speicherpotenzialstudien für Niedersachsen (Knopf 2011) und Schleswig-Holstein (Hable et al. 2011) sowie auf Basis der Horizontverbreitungsgrenzen nach Baldschuhn et al. (2001) die Ausweisung der Untersuchungswürdigkeit konsistent vervollständigt.

3.3.1 Speicherkomplex Oberrotliegend

Das Top des Oberrotliegend liegt weitflächig mehr als 4000 m unter NN. Im Horn- und Glückstadt-Graben sinkt die Tiefenlage lokal auf > 9000 m unter NN. Nach Westen in Richtung des Schillgrund-Hoch steigt die Tiefenlage teils auf weniger als 3000 m unter NN an (**Abbildung 8A**). In einigen Bereichen des Schillgrund-Hoch wurde das Rotliegend durch jurassische bis kretazische Erosion (Unterkreide-Diskordanz) abgetragen. Die Mächtigkeit der Sedimente zeigt im Untersuchungsgebiet einen eindeutigen NW-SE Trend. So steigt die Mächtigkeit von ca. 200 bis auf ca. 1800 m im Bereich der Nordfriesischen Inseln an. Lokale Maxima von bis zu 1400 m befinden sich zudem an der Südspitze des Horn-Graben (**Abbildung 8B**).

Im Nordwesten unterschreiten die Nettomächtigkeiten der Speichergesteine den erforderlichen Mindestwert. Entsprechend den Kriterien ist im Großteil der zentralen deutschen Nordsee aber die Untersuchungswürdigkeit gegeben (**Abbildung 8C**). Im Beckenzentrum ändern sich die Ablagerungsbedingungen von einem klastisch geprägten zu einem evaporitischen Milieu (Geluk 2005, Doornenbal & Stevenson 2010). Dadurch sind in diesem Bereich, trotz allgemein hoher Mächtigkeiten des Oberrotliegend von deutlich über 500 m, nicht überall Sandsteine in ausreichender Mächtigkeit vorhanden. Dies wird auch durch die Befunde der Bohrung J-5-1 gestützt, die für das Oberrotliegend keine relevanten Sandsteinlagen erteuft hat. Die Bohrung Westerland 1 (WSTL 1) im Nordosten des Untersuchungsgebietes erbohrte 525 m sedimentäres Oberrotliegend in einer Beckenrandfazies, mit dominant tonigen bis tonmergeligen Ablagerungen. Sandige Lithologien erreichen dort ebenfalls nicht die für Speicherkomplexe erforderliche Nettomächtigkeit von > 10 m. Weitere Bohrungen entlang der östlichen AWZ (S-1, J-10-1, J-11-1) weisen wiederum Speicherlithologien mit teils hohen Mächtigkeiten auf. Die Abgrenzung der verschiedenen Lithofaziesbereiche und damit der unterschiedlichen Nutzungspotenziale ist anhand der vorhandenen paläogeographischen Karten (Doornenbal & Stevenson 2010, Ziegler 1990) und der geringen Bohrungsdichte in dieser Region nicht sicher durchführbar. Da jedoch sowohl die Gesamtmächtigkeit des Oberrotliegendkomplexes meist deutlich über 500 m beträgt und das Tiefenkriterium in dieser Region immer erfüllt ist, wird für eine Betrachtung in diesem kleinen Maßstab eine summarische Untersuchungswürdigkeit ausgewiesen. Ergänzend wurde für die Darstellung der Untersuchungswürdigkeit des Oberrotliegend im Bereich der östlichen AWZ, im Übergang zum niedersächsischen und schleswig-holsteinischen Küstenbereich eine Schraffur gewählt, die sowohl die geringe Bohrungsbelegdichte als auch die schwierig zu korrelierende lithofazielle Ausprägung berücksichtigt (Wechsel zw. Beckenrand-, klastischer und evaporitischer bzw. salinärer Fazies).

Das nicht-salinare Rotliegend wurde wegen einer ungenügenden Datenbasis in Schleswig-Holstein und Hamburg (Hable et al. 2011) nur im Rahmen einer summarischen Abschätzung für eine einheitliche Kartendarstellung im Speicher-Kataster Deutschland behandelt und ist in dem Detaillierungsgrad der Bearbeitung mit den benachbarten Bundesländern und der deutschen Nordsee nicht vergleichbar. Daher weicht die hier gewählte Übersignatur von der für das Speicher-Kataster Deutschland gewählten Übersignatur ab.

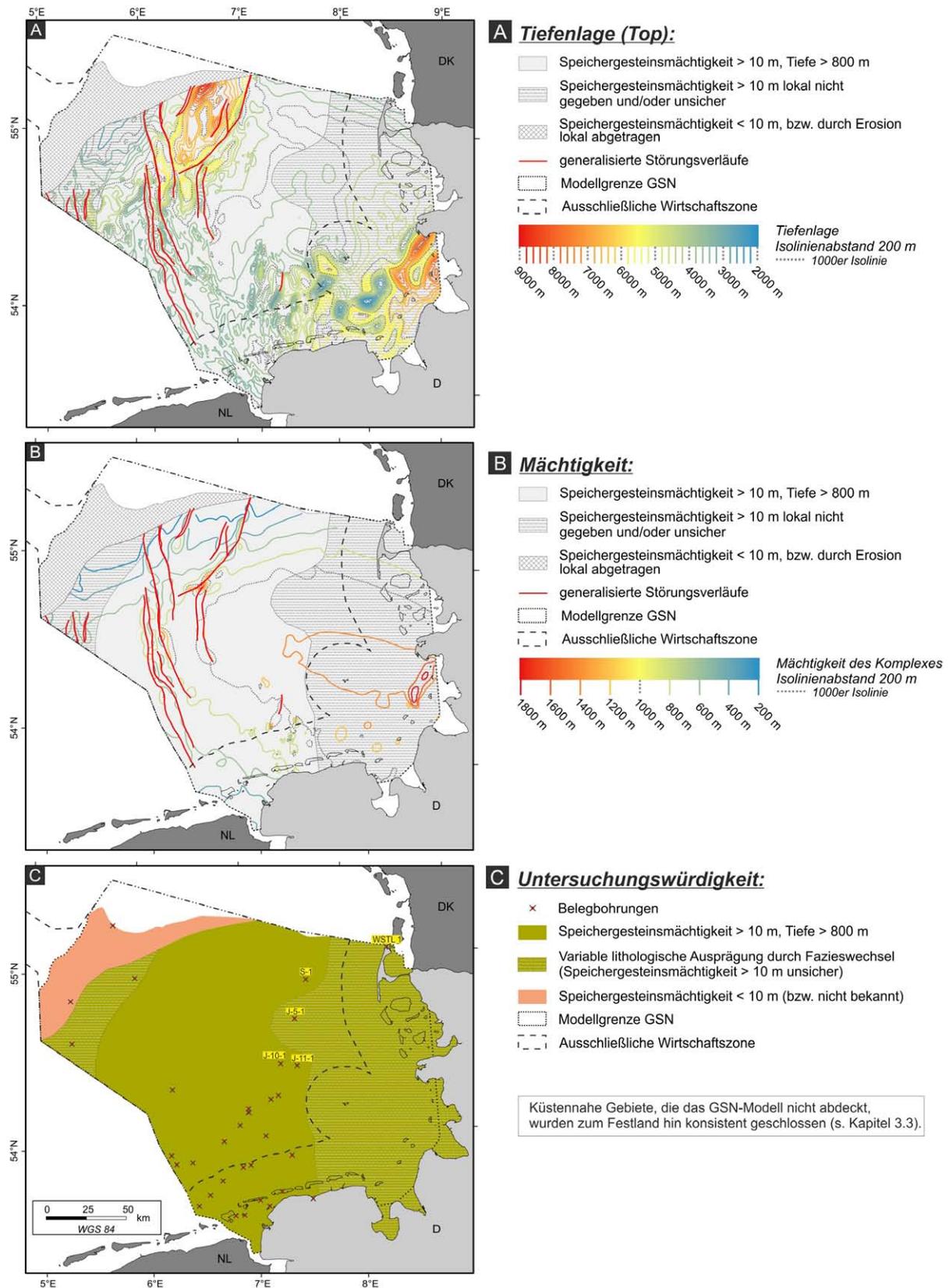


Abbildung 8: Tiefenlage am Top (A), Mächtigkeit (B) und Untersuchungswürdigkeit (C) des Speicherkomplexes Oberrotliegend.

3.3.2 Barrierekomplex Zechstein

Für den Barrierekomplex Zechstein ist im gesamten Untersuchungsgebiet das Tiefenkriterium erfüllt. In der Regel liegt die Basis Zechstein in Tiefen von über 3500 m. Im Horn- und Glückstadt-Graben werden Tiefen > 9000 m erreicht, wohingegen im äußersten Nordwesten des Untersuchungsgebietes und vereinzelt auch südöstlich von Helgoland für die Basis Zechstein nur Tiefen von etwas über 2000 m erreicht werden (**Abbildung 9A**). Bei der Ermittlung der Mächtigkeit des Zechstein wurde ein Teil der Zechsteinabfolge nicht berücksichtigt. Die Abfolgen im Liegenden des Staßfurt-Salinars sind aufgrund ihrer lithologischen Zusammensetzung (überwiegend Anhydrit und Karbonate) nicht als Barriere-lithologie auszuweisen. Somit wurden diese Abfolgen bei der Berechnung der Mächtigkeit des Zechstein von der Gesamtmächtigkeit des Zechstein mit einem gemittelten Betrag von 50 m abgezogen. Die analysierten Bohrdaten und seismischen Profile, sowie kleinmaßstäbige Mächtigkeitskarten (Baldschuhn et al. 2001), belegen eine weitgehend homoge Mächtigkeit dieser basalen Zyklen von ca. 50 m. Nur auf dem Schillgrund-Hoch, insbesondere im äußersten Nordwesten, nehmen die Mächtigkeiten dieser Zyklen stellenweise deutlich zu.

Die Mächtigkeit des Zechstein, insbesondere der Salzgesteine, variiert infolge halokinetischer Prozesse zwischen 1000 m im Nordwesten und 2300 m im Südosten. Die für Barrierekomplexe erforderliche Mindestmächtigkeit wird nur lokal unterschritten. In Salzdiapiren, beispielsweise im Bereich der westlichen Ausläufer des Glückstadt-Graben oder im Bereich des Horn-Graben, kann der Barrierekomplex Zechstein vertikale Mächtigkeiten von über 6400 m erreichen. Dagegen sind durch Subrosion und Erosion, infolge tief einschneidender Erosionsereignisse vom Jura bis in die Unterkreide, große Teile der ursprünglich vorhandenen Zechsteinablagerungen auf dem Schillgrund-Hoch abgetragen worden, wodurch dort die Mindestmächtigkeit der barrierewirksamen Salzgesteine von > 20 m lokal nicht vorhanden ist (**Abbildung 9B**).

Im südlichen Bereich des Untersuchungsgebietes kommt es infolge der Abwanderung der Salzgesteine unterhalb einiger Randsenken (Kapitel 2.2.3) ebenfalls zu einem Unterschreiten der erforderlichen Mindestmächtigkeit von Barrierelithologien. Durch die Abwanderung der Salinare blieben im Liegenden von Randsenken in der Regel nur schlecht zu mobilisierende Lithologien (Anhydrite und Karbonate) als Residuale zurück, die kein Barrierepotenzial aufweisen.

Gebiete, die ein lokales Unterschreiten der Mindestmächtigkeit durch Mobilisation der Salinare oder deutliche lokalen Mächtigkeitsabnahmen, infolge von Erosion und Subrosion aufweisen, sind in den Karten zum Barrierekomplex Zechstein durch eine Schraffur hervorgehoben. Diese so gekennzeichneten Gebiete werden jedoch weiterhin als untersuchungswürdig ausgewiesen, da der Barrierekomplex Zechstein auch dort größtenteils die Kriterien der Untersuchungswürdigkeit erfüllt (**Abbildung 9C**).

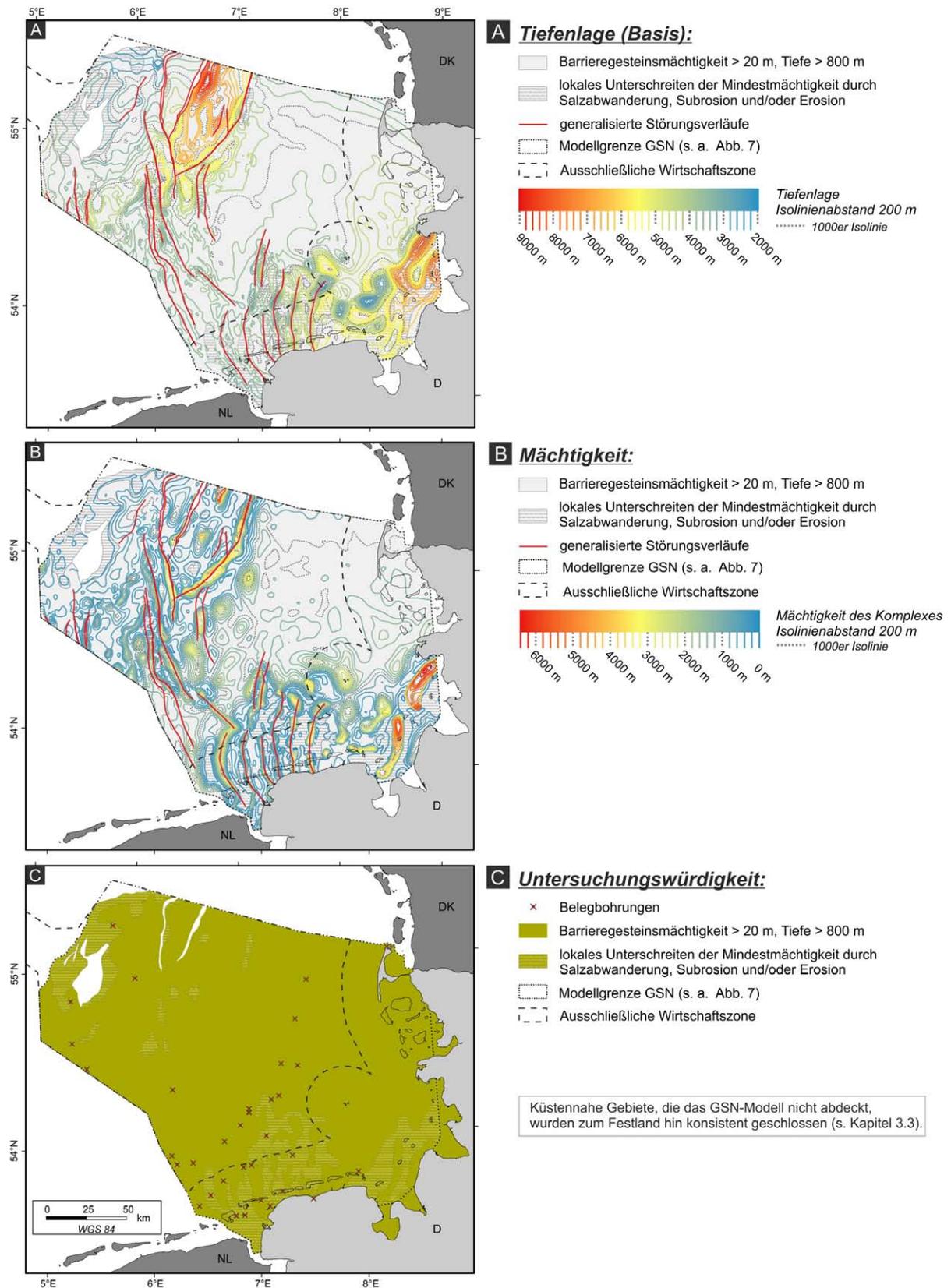


Abbildung 9: Tiefenlage an der Basis (A), Mächtigkeit (B) und Untersuchungswürdigkeit (C) des Barrierekomplexes Zechstein.

3.3.3 Speicherkomplex Mittlerer Buntsandstein

Das Kriterium der Tiefenlage ist für den Mittleren Buntsandstein im überwiegenden Teil des Untersuchungsgebietes erfüllt. Im Bereich der zentralen deutschen Nordsee liegt die Topfläche in der Regel in Tiefen zwischen 2000 und 3000 m. Maximale Tiefen des Mittleren Buntsandstein von über 7000 m werden im Bereich des Horn-Graben und Glückstadt-Graben erreicht. Ausnahmen bilden vereinzelte Hochlagen oberhalb von Salzkissen (z. B. südlich des Horn-Graben oder bei Helgoland) entlang derer die Mindesttiefenlage von 800 m unterschritten wird (**Abbildung 10A**).

Die Mächtigkeit des Mittleren Buntsandstein variiert in weiten Bereichen des Untersuchungsgebietes zwischen 200 und 600 m. Im Horn-Graben sind, aufgrund gesteigerter tektonischer Subsidenz im Mittleren Buntsandstein, erhöhte Sedimentmächtigkeiten vorhanden. Die Mächtigkeit in diesem Bereich beträgt zwischen 1000 und 3000 m, lokal werden sogar Mächtigkeiten von über 3600 m erreicht (**Abbildung 10B**).

Tiefenlage und Mächtigkeiten des Mittleren Buntsandstein erfüllen somit in den meisten Bereichen des Untersuchungsgebietes die Mindestkriterien (**Abbildung 10C**). Nur in einzelnen kleineren Arealen entlang der ostfriesischen Küste und im Bereich des Schillgrund-Hoch besteht kein Potenzial. Aufgrund der massiven Erosion von Sedimenten des Mittleren Buntsandstein auf dem Schillgrund-Hoch (Unterkreide-Diskordanz) und deren unklare Erhaltung in meist nur residualen Vorkommen, wurde dort keine Untersuchungswürdigkeit ausgewiesen (siehe Kapitel 3.5.1).

Im Bereich der ostfriesischen Inseln zeigt sich, auch aufgrund der höheren Belegbohrungsdichte, ein differenzierteres Bild. Dort ist der Mittlere Buntsandstein in den Bohrungen Norderney Z1 (NONY Z1), Juist Z1 (JIST Z1) und Lütje Hörn Z1 (L-HO Z1) nachgewiesen worden. In der Bohrung Lütje Hörn Z1 wurden ca. 70 m Mittlerer Buntsandstein in dominant toniger oder tonmergeliger Ausbildung sowie Sand- und Feinsandsteinen mit einer Nettomächtigkeit von > 10 m erbohrt. Norderney Z1 durchteufte 62 m Mittleren Buntsandstein (Neuinterpretation, Röhling 1988) mit dominant Ton- und Tonmergelsteinen sowie Anhydrit- und Steinsalzlagen. Das Vorkommen sandiger Lithologien ist nicht dokumentiert. Juist Z1 traf ca. 144 m Mittleren Buntsandstein an. Tonsteine und Anhydrit stellen hier die dominanten Gesteinstypen dar. Untergeordnet treten fein- bis mittelkörnige Sandsteine mit einer Nettomächtigkeit von < 10 m auf. Entsprechend der fehlenden Speicherlithologien und/oder deren nicht vorhandener Mindestmächtigkeit in den Bohrungen Norderney Z1 und Juist Z1 wurde der Mittlere Buntsandstein in diesen Bereichen als nicht untersuchungswürdig ausgewiesen. Der Übergang von der tonig bis anhydritischen Fazies zur sandigen Ausprägung ist jedoch nur unscharf zu fassen.

Der Speicherkomplex Mittlerer Buntsandstein bietet, aufgrund seines lithologischen Aufbaus und weitflächig verbreiteten Sandsteinen, mehrere potenzielle Speicherhorizonte. Vor allem die Zyklen der Volpriehausen- und Detfurth-Formation bestehen im deutschen Nordsee-Sektor an ihrer Basis aus grob- bis mittelkörnigen Sandsteinen (Wolf et al. 2014). Hable et al. (2011) verweisen darauf, dass Richtung Osten, im Bereich von Schleswig-Holstein, diese Basissandsteine aus eher fein- bis mittelkörnigen Sandsteinen bestehen und somit eine Abnahme der Korngrößen der potenziellen Speichergesteine zu beobachten ist. Die Hardeggen- und Solling-Formation besitzen im deutschen Nordsee-Sektor basal ebenfalls Sandsteine, wobei diese in der Regel feinklastischer ausgebildet sind als die der liegenden Formationen des Mittleren Buntsandstein und weitflächig auch durch Erosion in ihrem Top (Unterkreide-Diskordanz) abgetragen wurden.

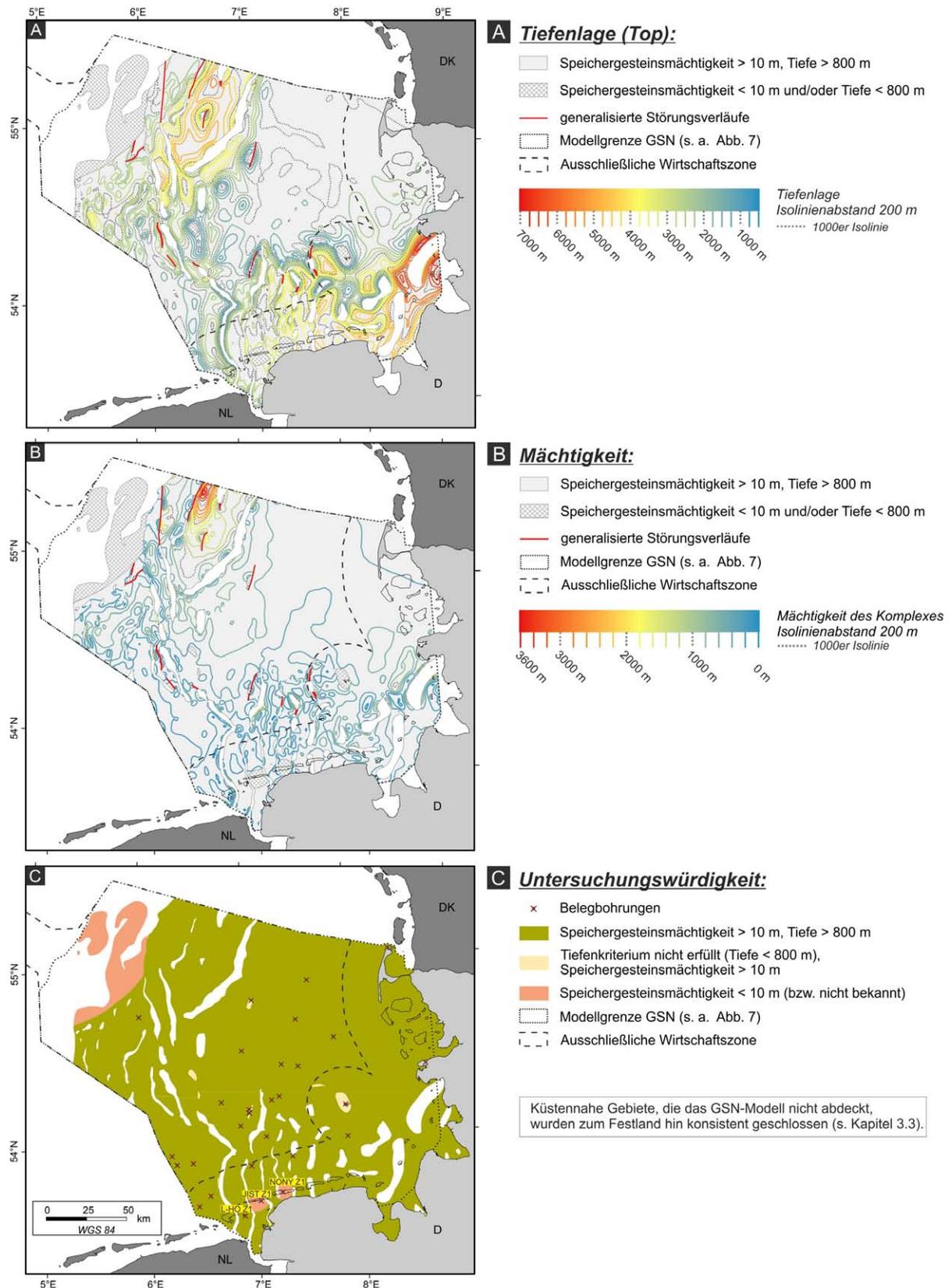


Abbildung 10: Tiefenlage am Top (A), Mächtigkeit (B) und Untersuchungswürdigkeit (C) des Speicherkomplexes Mittlerer Buntsandstein.

3.3.4 Barrierekomplex Oberer Buntsandstein

Die Gesteine des Oberen Buntsandstein (Röt) sind, mit Ausnahme der Gebiete um Helgoland, des Schillgrund-Hoch und Teilen der G- und L- Plattform, weitflächig erhalten.

Die Basis des Oberen Buntsandstein liegt weiträumig in einer Tiefe von 2000 bis 3000 m. Ausnahmen sind zumeist oberhalb von Salzkissen sowie entlang der Flanken von Salzmauern zu finden. In diesen Bereichen kann die Tiefenlage bis auf 200 m unter NN ansteigen. Die größten Tiefenlagen werden mit über 5000 m im Horn-Graben und mit ca. 7000 m in den westlichen Ausläufern des Glückstadt-Graben erreicht (**Abbildung 11A**).

Die Mächtigkeit des Oberen Buntsandstein schwankt im Untersuchungsgebiet nur geringfügig, meist liegt sie zwischen 200 und 300 m. Nur entlang der Verbreitungsgrenzen sinkt sie lokal auf < 20 m (**Abbildung 11B**). Die Mächtigkeitsangaben entlang von Salzstrukturen sind modellbedingt mit Unsicherheiten behaftet (siehe Kapitel 3.5.1).

Insgesamt ist die Untersuchungswürdigkeit des Barrierekomplexes Oberer Buntsandstein für den Großteil des deutschen Nordsee-Sektors gegeben (**Abbildung 11C**). Darüber hinaus ist der teils starke Einfluss von Erosionsereignissen im Keuper oder an der Basis der Unterkreide nicht überall hinreichend durch die Modellgrundlage zu klären. Nicht untersuchungswürdige Gebiete liegen lediglich entlang der Verbreitungsgrenzen des Röt im Nordwesten und Südwesten des Untersuchungsgebietes sowie um Helgoland.

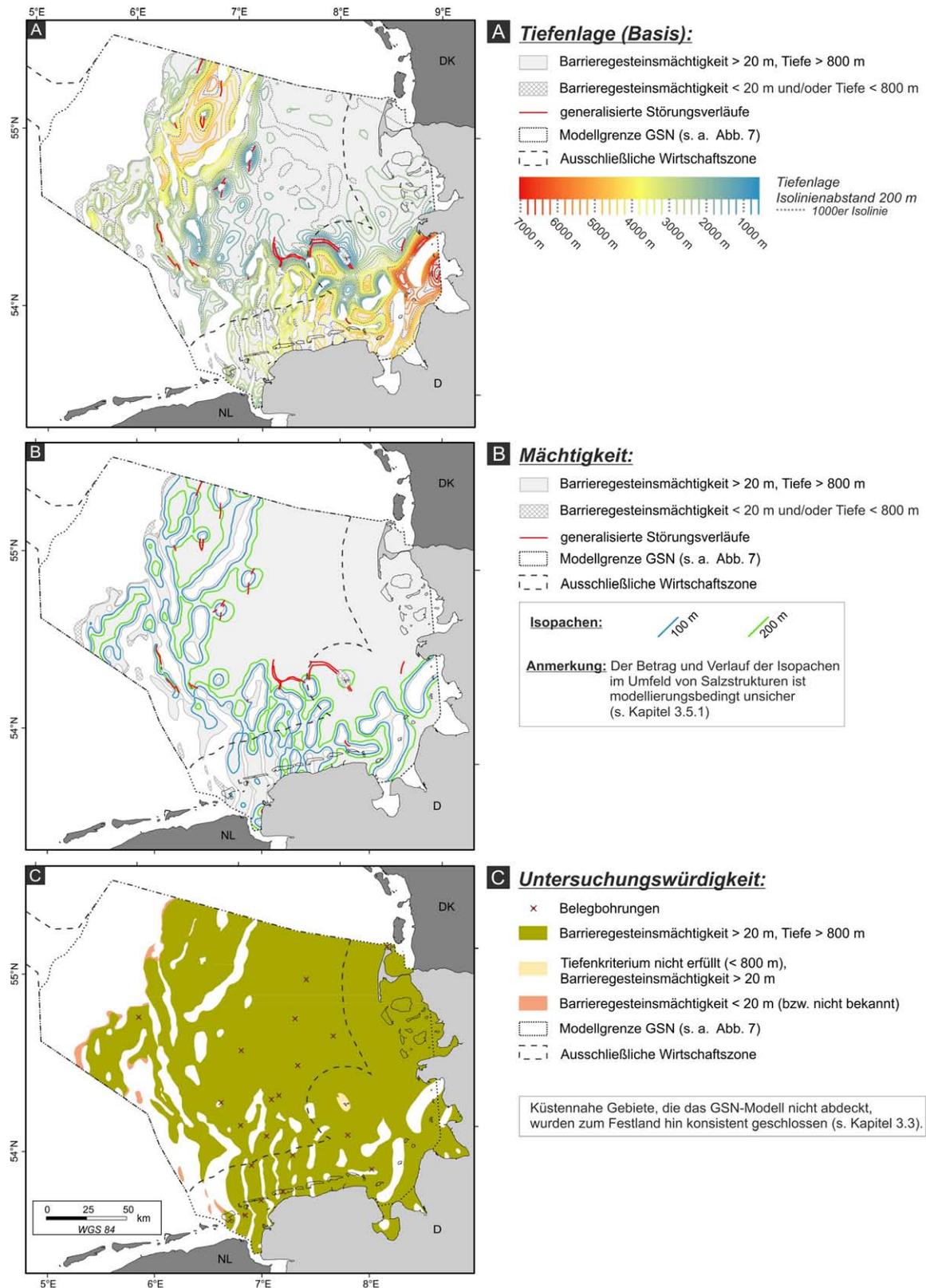


Abbildung 11: Tiefenlage an der Basis (A), Mächtigkeit (B) und Untersuchungswürdigkeit (C) des Barrierekomplexes Oberer Buntsandstein.

3.3.5 Speicherkomplex Rhätkeuper (Oberer Keuper)

Aufgrund der nicht ausreichenden Datengrundlage zur Tiefe und Mächtigkeitsverteilung des Rhätkeuper konnte im GSN kein Basishorizont für den Rhätkeuper modelliert werden. Daher konnten für den Rhätkeuper keine Tiefenlinien- und Mächtigkeitskarten erstellt werden (siehe Kapitel 3.5.1). Die Informationen für die Potenzialausweisung stammen vorwiegend aus dem GTA, einzelnen Bohrungen sowie paläogeographischen Studien (Beutler 2005).

Rhätkeuper wurde in drei Bohrungen entlang der ostfriesischen Inseln angetroffen und zeigt eine überwiegend tonige Ausprägung mit eingeschalteten Feinstsandlagen. Diese weisen eine Nettomächtigkeit von etwa 10 m auf. Eine Untersuchungswürdigkeit des Rhätkeuper als Speicherkomplex besteht demzufolge im südlichen Untersuchungsgebiet. In zwei Gebieten wurden Vorkommen des Speicherkomplexes Rhätkeuper nicht bewertet (**Abbildung 12**).

Für die Bereiche westlich von Helgoland gibt es nur indirekte Hinweise für Vorkommen des Rhätkeuper. Nach Baldschuhn et al. (2001) sind dort konkordant auflagernde unterjurassische Abfolgen in Randsenken von Salzstrukturen verbreitet. Für diese Bereiche wird in der vorliegenden Betrachtung auch eine Verbreitung des liegenden Rhätkeuper angenommen. Aufgrund dieser indirekten Betrachtung können dort keine Aussagen zur Mächtigkeit des Rhätkeuper gemacht werden und folglich wurden diese Vorkommen nicht bewertet. Im Bereich der Elbmündung ist nach Baldschuhn et al. (2001) ein Vorkommen ausgewiesen, welches auf Basis der eingeschränkten Datengrundlage nicht bewertet werden konnte. Als Übergang zwischen bewerteten und nicht bewerteten Vorkommen wurde eine in der Restmächtigkeitskarte des Rhätkeuper (Baldschuhn et al. 2001) ausgewiesene Störung gewählt. Das Tiefenkriterium ist jedoch für alle Vorkommen des Rhätkeuper im Arbeitsgebiet klar erfüllt.

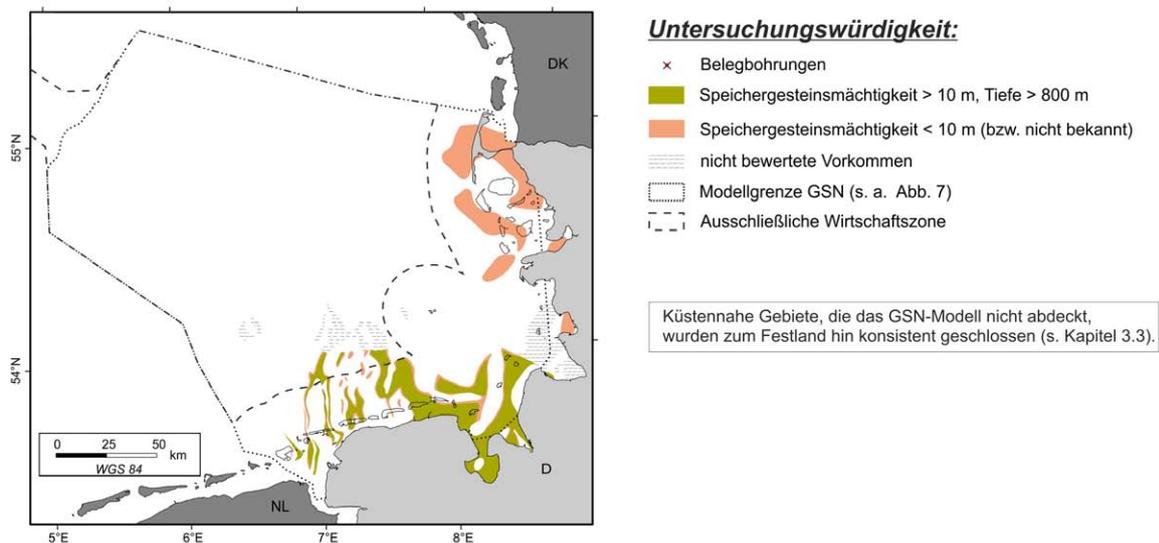


Abbildung 12: Untersuchungswürdigkeit des Speicherkomplexes Rhätkeuper.

Hable et al. (2011) beschreiben für den Rhätkeuper in Schleswig-Holstein eine nach Westen abnehmende Mächtigkeit der Sandsteinbänke (insb. Mittelrhät), was als Übergang zu einer marinen Beckenfazies interpretiert wird. Ein solcher Trend steht in Einklang mit Bohrbohrungen entlang der ostfriesischen Inseln. Hable et al. (2011) merken darüber hinaus an, dass trotz der generellen Abnahme der Sandsteinmächtigkeiten nach Westen die Sandsteinmächtigkeiten durch den Einfluss von salinartektonischen Prozessen im Mittelrhät sehr stark schwanken und im Bereich von Randsenken auch erhöht sein können. Um diese trendhafte Abnahme des Anteils sandiger Lithologien in der Bewertung der Untersuchungswürdigkeit des Rhätkeuper zu berücksichtigen, wurden Bereiche mit einer durchschnittlichen Gesamtmächtigkeit des Rhätkeuper (nach Baldschuhn et al. 2001) von < 50 m in der Nordsee als nicht untersuchungswürdig ausgewiesen, da aufgrund der Zusammensetzung des Rhätkeuper (Beutler 2005) ein Unterschreiten des Nettomächtigkeitskriteriums angenommen wird. Für den küstennahen Festlandsbereich von Schleswig-Holstein ist davon auszugehen das auch bei höheren Restmächtigkeiten das Nettomächtigkeitskriterium unterschritten wird (Hable et al. 2011).

3.3.6 Barrierekomplex Unterjura

Die Gesteine des Jura sind im Untersuchungsgebiet größtenteils erodiert (Unterkreide-Diskordanz). Gebunden an Randsenken von Salzstrukturen liegt die Verbreitung der Unterjura-Sedimente zwischen der Ostfriesischen Küste, Wilhelmshaven und der Elbemündung (im südlichen Teil der AWZ und innerhalb der 12 Meilen Zone). Die Tiefenlage der Unterjura-Sedimente ist infolge späterer halokinetischer Bewegungen, mit kleinräumigen Schwankungen zwischen 1400 und 5200 m, sehr variabel. Tiefen von bis zu 5200 m werden im östlichen Verbreitungsbereich erreicht (**Abbildung 13A**).

Die Mächtigkeitsverteilung korreliert stark mit der Geometrie der Randsenken. Lokal können dort vertikale Mächtigkeiten von bis zu 1800 m vorkommen. Zwischen den Randsenken sowie in Richtung Westen nehmen die Mächtigkeiten deutlich ab (**Abbildung 13B**).

Die Untersuchungswürdigkeit des Komplexes ist nördlich der Weser- und Elbemündung gegeben (**Abbildung 13C**). Für die weiter westlich gelegenen Erosionsrelikte ist eine ausreichende Tiefenlage zwar vorhanden, jedoch wird, aufgrund der zunehmend geringeren Mächtigkeiten, von einem lokalen Unterschreiten der erforderlichen Mindestmächtigkeiten ausgegangen. Weiterhin ist für den Unterjura nach Westen eine zunehmende Dominanz mergeliger Ablagerungen zu verzeichnen. Unter Berücksichtigung tonmergeliger Abfolgen ist auch für diese Verbreitungsbereiche die Untersuchungswürdigkeit gegeben.

3.3.7 Speicherkomplex Mitteljura

Der Speicherkomplex Mitteljura ist im Untersuchungsgebiet nur gering verbreitet. Ähnlich wie beim Unterjura sind die Ablagerungen des Mitteljura meist an Randsenken von Salzstrukturen gebunden. Die geringe Verbreitung erklärt sich durch die Unterkreide-Diskordanz, die tief in mesozoische Ablagerungen einschneidet (z. B. westlich von Helgoland). Somit ist der Mitteljura überwiegend nur in einem schmalen Streifen zwischen Wilhelmshaven und der Elbemündung erhalten. Möglicherweise sind westlich von Helgoland weitere vereinzelte, kleinräumige und residuale Ablagerungen erhalten (Baldschuhn et al. 2001), deren Existenz jedoch nicht eindeutig nachgewiesen werden kann.

Die Tiefenlage des Top Mitteljura schwankt lokal zwischen 4400 und 1600 m (**Abbildung 14A**). Die größten Tiefen werden in den westlichen Ausläufern des Glückstadt-Graben erreicht. Die Mächtigkeiten des Komplexes schwanken in der Regel zwischen 100 und 300 m, lokal (im Bereich von Salzdiapiren) kann die vertikale Mächtigkeit auf über 1400 m ansteigen (**Abbildung 14B**). Zum Rand der Verbreitung und außerhalb der Randsenken nimmt die Mächtigkeit deutlich ab.

Zusammenfassend ist die Untersuchungswürdigkeit des Speicherkomplexes nur in den Hauptverbreitungsgebieten bei Wilhelmshaven und nahe der Elbemündung gegeben. Das Mindesttiefenkriterium ist im gesamten Verbreitungsgebiet erfüllt. Im Bereich der Insel Neuwerk wird der Mitteljura als nicht untersuchungswürdig ausgewiesen, da innerhalb der Bohrung Neuwerk 1 keine Sandsteine in ausreichender Mächtigkeit angetroffen wurden. Im Bereich nördlich der Bohrung Neuwerk 1 ist die lithologische Zusammensetzung aufgrund fehlender Aufschlussbohrungen unbekannt. Das Vorkommen teils mächtiger (>> 10 m) Sandsteine östlich (Mittelpate, Büsum-Dogger) und südwestlich (Eversand, Wangerooge, Jadeplate) dieses Bereichs lässt das Vorkommen geeigneter Speicherlithologien innerhalb des Dogger (Aalenium bis Bathonium) vermuten. Aufgrund der einschneidenden Unterkreide-Diskordanz ist jedoch gebietsweise von einem Unterschreiten der Mindest-Nettomächtigkeit auszugehen (**Abbildung 14C**).

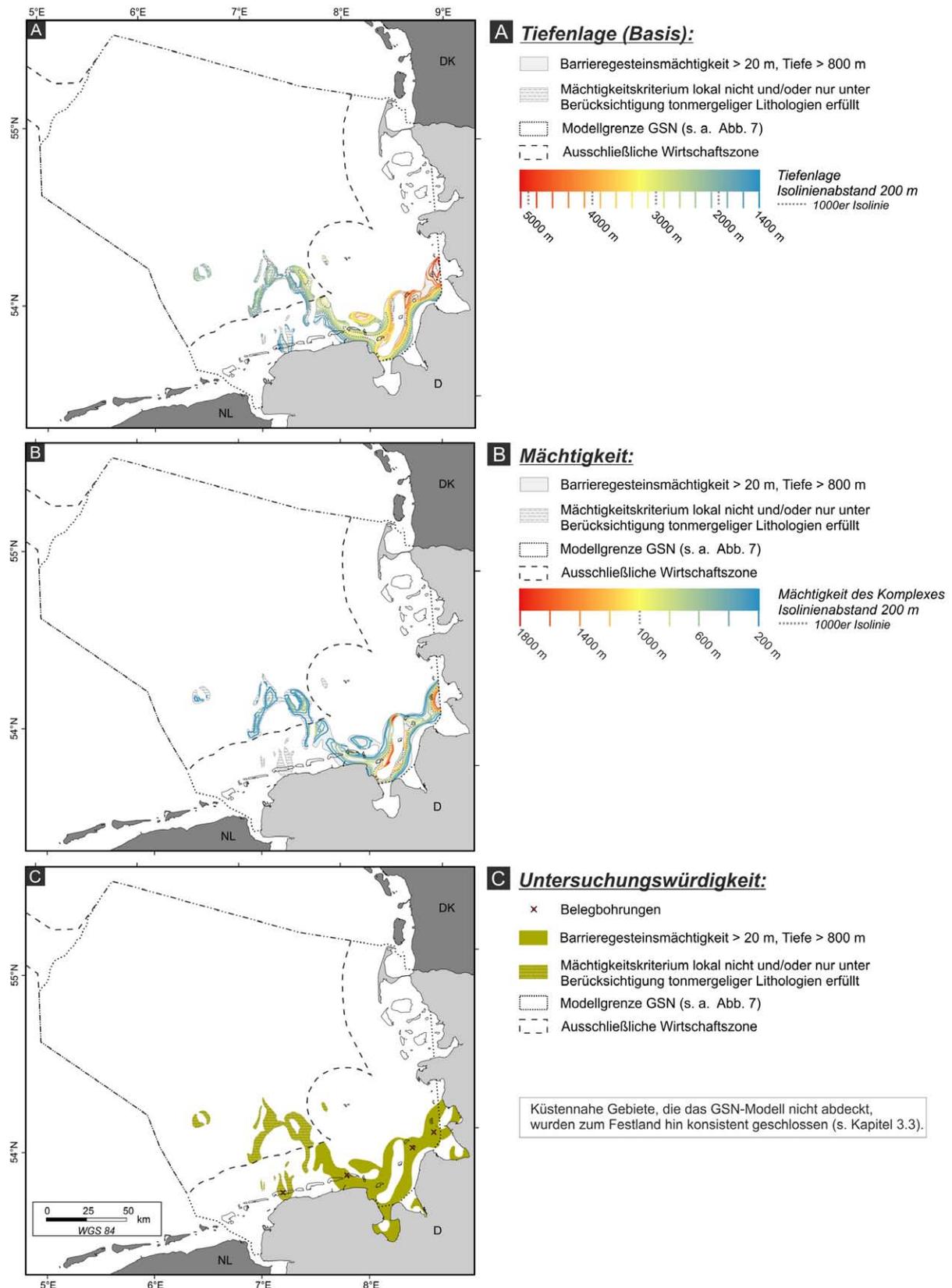


Abbildung 13: Tiefenlage an der Basis (A), Mächtigkeit (B) und Untersuchungswürdigkeit (C) des Barrierekomplexes Unterjura.

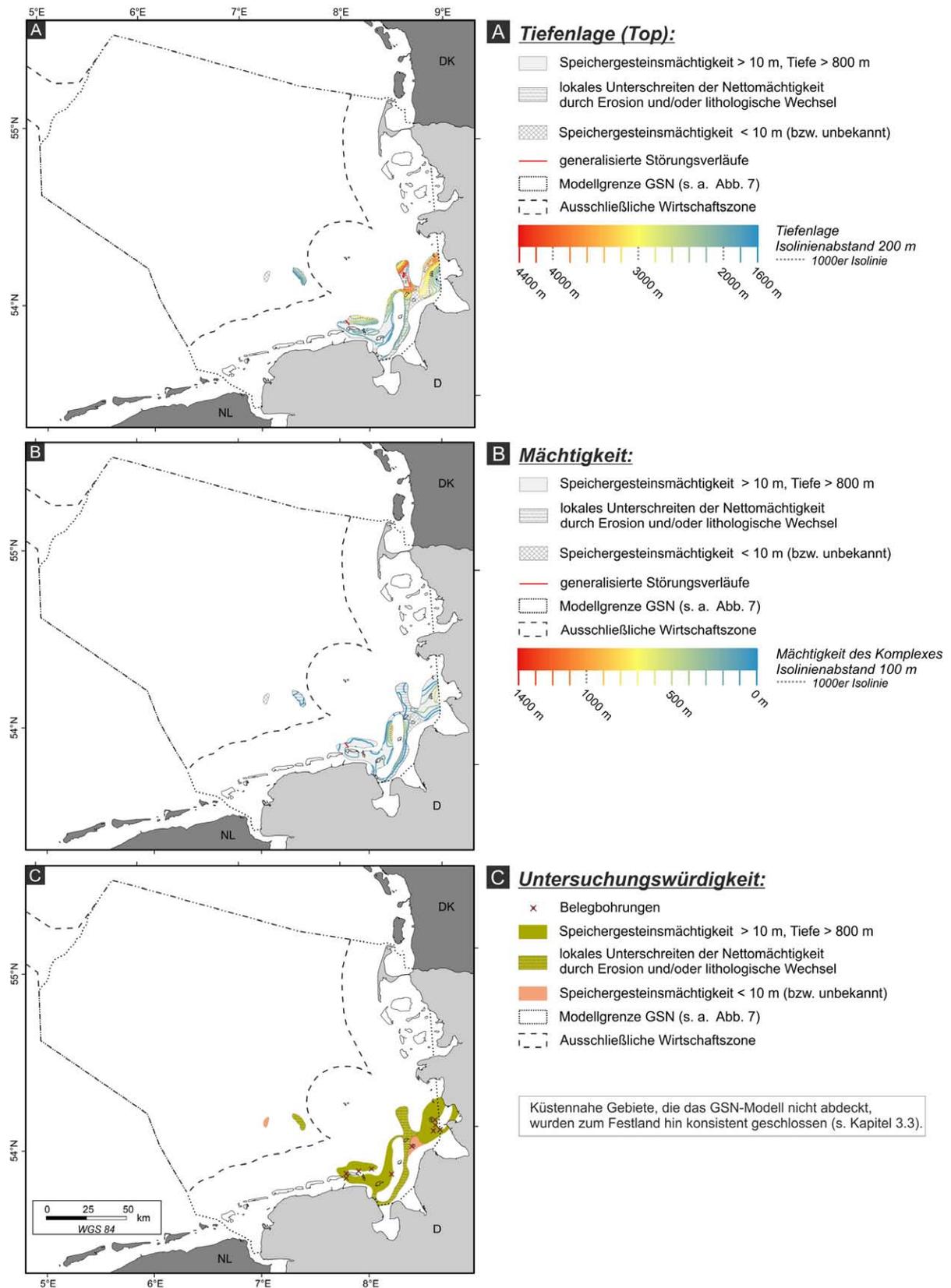


Abbildung 14: Tiefenlage am Top (A), Mächtigkeit (B) und Untersuchungswürdigkeit (C) des Speicherkomplexes Mitteljura.

3.3.8 Barrierekomplex Unterkreide

Außer im Umfeld weniger Salzstrukturen ist der Barrierekomplex, als Folge einer marinen Ingression auf eine großräumige und reliefarme Erosionsfläche, hervorgerufen durch die Unterkreide-Diskordanz, bei anhaltend geringer tektonischer Aktivität, weiträumig verbreitet.

Die Basis der Unterkreide liegt im Untersuchungsgebiet mit wenigen Ausnahmen zwischen 1000 bis 1500 m (**Abbildung 15A**). Lokale Tieflagen von über 3000 m befinden sich im Bereich post-kretazisch aktiver Salzstrukturen, beispielsweise auf der G-Plattform (siehe Kapitel 2.2.3). Im Südosten des Untersuchungsgebietes nimmt die Tiefe auf über 3000 m zu. Maximale Tiefen von bis zu 6000 m werden in den westlichen Ausläufern des Glückstadt-Graben erreicht. Generell nimmt die Tiefe auch in Richtung des Zentral-Graben, auf dem Schillgrund-Hoch, auf bis zu ca. 3500 m zu. Im Bereich von Helgoland wird dagegen eine Tiefe von 800 m unterschritten.

Die Mächtigkeit der Unterkreideablagerungen schwankt im gesamten Untersuchungsgebiet nur geringfügig. In der Regel beträgt sie zwischen 100 und 200 m. Lokal treten küstennah, an Salzstrukturen gebunden, höhere vertikale Mächtigkeiten von bis zu 800 m auf (**Abbildung 15B**).

Die Tiefenlage und Mächtigkeit der Unterkreidesedimente erfüllen im Großteil des Untersuchungsgebietes die Mindestkriterien für eine Untersuchungswürdigkeit. In küstennahen Bereichen sowie in Teilen des Horn-Graben belegen Bohrungen eine Dominanz mergeliger bis tonmergeliger Lithologien. Zudem ist im Bereich des Horn-Graben und auch lokal in Bereichen vor der Küste Schleswig-Holsteins eine Abnahme der Gesamtmächtigkeit der Unterkreide auf deutlich unter 50 m zu verzeichnen. Für diese Bereiche ist unter Berücksichtigung tonmergeliger Lithologien eine Untersuchungswürdigkeit gegeben (**Abbildung 15C**).

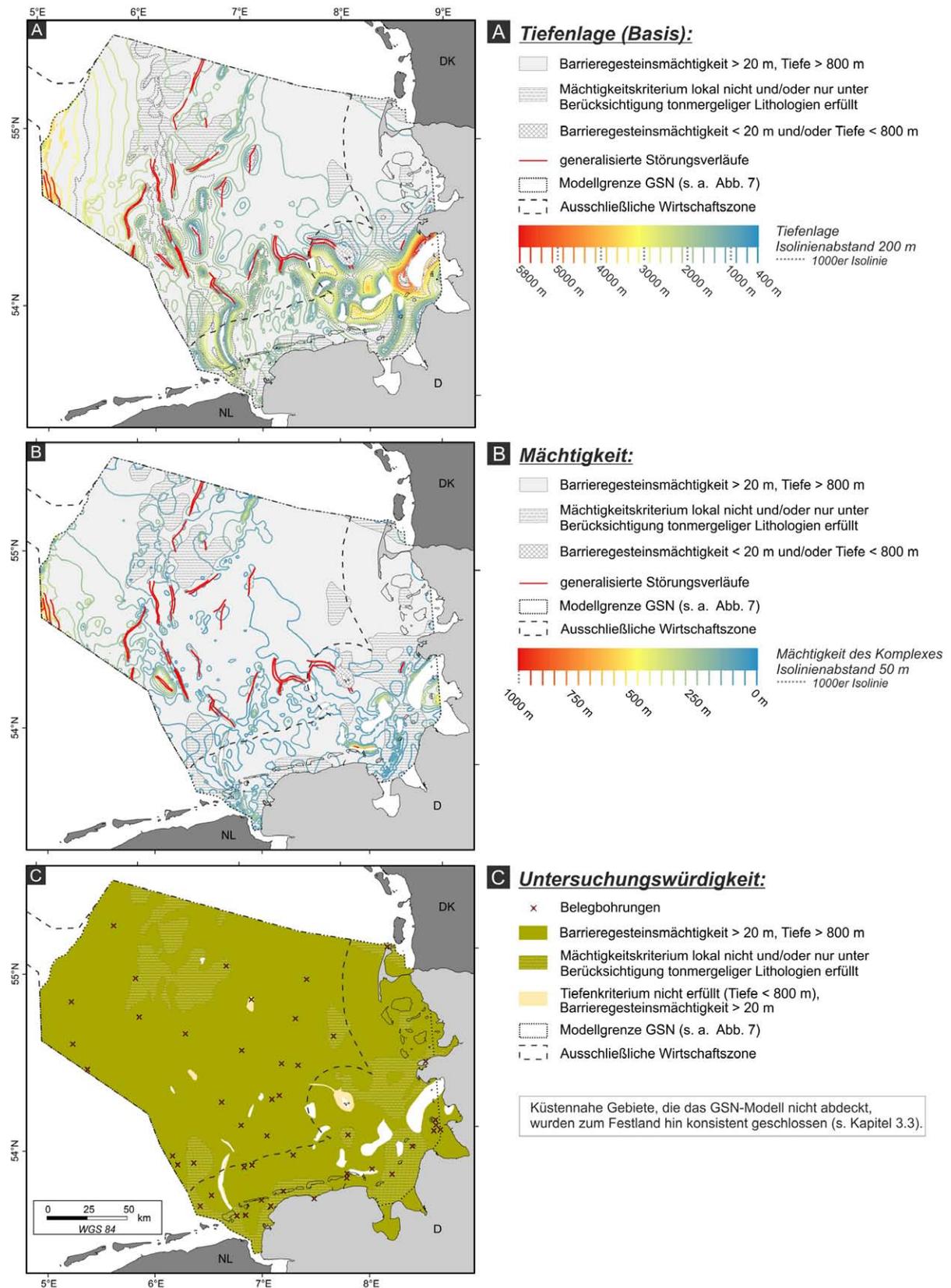


Abbildung 15: Tiefenlage an der Basis (A), Mächtigkeit (B) und Untersuchungswürdigkeit (C) des Barrierekomplexes Unterkreide.

3.4 Lagebeziehungen von Speicher- und Barrierekomplexen und daraus resultierende Fallensituationen

Die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Ergebnisse für die Untersuchungswürdigkeit von Speicher- und Barrierekomplexen ermöglichen weitere und zielgerichtete Detailuntersuchungen über das Speicherpotenzial ausgewählter Regionen. In bisherigen Betrachtungen (vgl. Reinhold & Müller 2011) wurden die Speicher- und Barrierekomplexe weitestgehend getrennt voneinander betrachtet, ohne Berücksichtigung ihrer strukturellen Beziehungen zueinander. Aber erst Untersuchungen über die Lagebeziehungen der Speicher- (**SK**) und Barrierekomplexe (**BK**) zueinander ermöglichen weitergehende Aussagen über das Vorhandensein von Fallenstrukturen, die potenziell als Speicherstrukturen genutzt werden können. Deren Vorhandensein ist ein entscheidendes Auswahlkriterium für die standortgebundene Speicherung von Fluiden im tieferen Untergrund. Daraus folgt gegebenenfalls eine Einschränkung des Speicherpotenzials wenn, trotz flächenhafter Verbreitung eines untersuchungswürdigen Speicherkomplexes, keine strukturellen Fallen und damit auch keine potenziellen Speicherstrukturen diesen Typs vorkommen.

Im Folgenden werden für die unterschiedlichen Strukturräume der zentralen deutschen Nordsee die strukturellen Zusammenhänge zwischen den jeweiligen Speicher- und Barrierekomplexen und den daraus hervorgehenden sogenannten „Fallensituationen“ erläutert. Eine Fallensituation beschreibt die relative Lage eines Speicherkomplexes zu den assoziierten Barrierekomplexen in Zusammenhang mit dem Typ der jeweiligen geologischen Falle (**Abbildung 16**). Die Analyse wurde auf Basis der 3D-Modelle GSN und GTA-3D sowie verschiedener geologischer Profile (siehe **Abbildung 3**) durchgeführt. Die hier vorgestellte strukturelle Analyse hatte nicht zum Ziel, alle Speicherstrukturen in salinaren Aquiferen für die zentrale Deutsche Nordsee in ihrer Lage und Struktur zu erfassen. Vielmehr wurde als Grundlage für strukturbezogene Studien ein regionales Screening der vorkommenden Fallensituationen durchgeführt. Die Ausweisung der spezifischen Fallensituationen erfolgte zudem nur für Regionen, in denen eine Untersuchungswürdigkeit der **SK** und **BK** besteht (siehe Kapitel 3.3).

Lagebeziehungen

Im Untersuchungsgebiet ist eine Vielzahl teils komplexer Lagebeziehungen zu beobachten. Im strukturell und stratigraphisch einfachsten Fall wird ein Speicherkomplex in direkter stratigraphischer Folge von dem nächst jüngeren Barrierekomplex konkordant überlagert. Lokale, oder auch überregionale Erosionsereignisse (z. B. H-Diskordanz, Unterkreide-Diskordanz) sowie halokinetische und halotektonische Prozesse im mesozoischen bis känozoischen Deckgebirge verkomplizieren die Lagebeziehungen der Speicher- und Barrierekomplexe zusätzlich (siehe Kapitel 2.2.3).

In **Tabelle 2** werden die neun definierten Strukturräume der zentralen deutschen Nordsee (Kapitel 2.2.1) im Hinblick auf die Lagebeziehung zwischen Speicher- und Barrierekomplexen (Spalte 4) sowie drei weiteren wesentlichen Attributen untereinander verglichen (Mächtigkeit, Erhaltungsgrad, Einfluss von Halotektonik und Halokinese; Spalten 1-3). Einen guten Überblick über die vielfältigen und möglichen Lagebeziehungen geben auch die geologischen Profile 1 bis 3 (**Abbildung 3**).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass für die meisten Regionen der zentralen deutschen Nordsee, auf einen Speicherkomplex (**SK**) in der Regel im direkt Hangenden ein Barrierekomplex (**BK**) folgt. Vor allem halotektonische Prozesse sowie überregionale und lokale Erosionsereignisse führten in einigen Regionen zu einer hohen Komplexität der Lagebeziehungen zwischen **SK** und den assoziierten **BK**. So folgt im direkten Hangenden eines

Speicherkomplexes in einigen Regionen nicht der stratigraphisch nächst jüngere Barrierekomplex. Dies gilt beispielsweise für den Barrierekomplex Unterkreide (**BK kru**), der in einigen Strukturräumen den Barrierekomplex im direkten Hangenden des Speicherkomplexes Mittlerer Buntsandstein (**SK sm**) bildet (zum Beispiel auf der G- und L-Plattform).

Identifikation und Charakterisierung der Fallensituationen

Basierend auf den in **Tabelle 2** dargestellten Ergebnissen erfolgte eine weitere Untersuchung der Speicherkomplexe auf Fallensituationen. Hierbei wurden jedoch keine konkreten Speicherstrukturen untersucht, sondern die Kombinationen aus **SK** und **BK** in Zusammenhang mit den auftretenden Typen geologischer Fallen in den neun verschiedenen Strukturräumen in der zentralen deutschen Nordsee kategorisiert (**Tabelle 3** und Anhang). Eine geologische Falle ist vereinfacht ausgedrückt eine Struktur im Untergrund, die eine Migration von Fluiden verhindert. Diese können in strukturelle Fallen, stratigraphische Fallen und in Kombinationen aus diesen beiden Grundtypen unterteilt werden. Auf Basis der Datengrundlage sind für das Untersuchungsgebiet nur Aussagen zur Verbreitung von strukturellen Fallen und von stratigraphischen Fallen, die durch Erosionsdiskordanzen entstanden sind, möglich. Durch die Wechselwirkung zwischen halokinetischen und sedimentären Prozessen können sich in Salzstrukturnähe lithofazielle Verzahnungen ergeben, die ebenfalls stratigraphische Fallen bilden können (siehe Osman et al. 2013). Derartige Fallen wurden aber in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt.

Die betrachteten geologischen Fallentypen sind (siehe **Abbildung 16**):

- I. Antiklinal-Falle (strukturelle Falle),
- II. Störungsgebundene Falle (strukturelle Falle),
- III. Diapir-Falle (strukturelle Falle),
- IV. Erosionsdiskordanz-Falle (stratigraphische Falle),
- V. Verschiedene Kombinationen aus I bis IV.

In **Tabelle 3** sind für die neun Strukturräume in der zentralen deutschen Nordsee typische Lagebeziehungen für Speicher- und assoziierte Barrierekomplexe aufgeführt, die in einer geologischen Fallenstruktur vorliegen. Die Zuweisung der Lagebeziehung zu spezifischen Fallentypen wird in **Tabelle 4** wiedergegeben. Zur vereinfachten Darstellung der strukturellen Zusammenhänge wurde ein Benennungsschlüssel entwickelt, der neben dem jeweiligen Speicherkomplex gleichzeitig die begrenzenden Barrierekomplexe mit einbezieht (z. B. **SK sm – BK so/BK z(diapir)/BK kru**).

Der Benennungsschlüssel ist folgendermaßen aufgebaut:

- Die jeweilige Kurzbezeichnung des Speicherkomplexes (**SK**) bildet den Anfang und wird durch einen Gedankenstrich von den im direkt Hangenden folgenden Barrierekomplexen (**BK**) getrennt. Für die Benennung der Einheiten werden die stratigraphischen Kurzbezeichnungen nach Preuss et al. (1991) verwendet (z. B. Mittlerer Buntsandstein = *sm*) => z. B.: **SK sm – BK so**.
- Um zwischen dem Barrierekomplex Zechstein in söhlicher (**BK z**) oder in saigerer Lagerung (als begrenzende Salzstruktur z. B. durch einen Salzdiapir) zu unterscheiden, wird der Barrierekomplex in saigerer Lagerung mit der Bezeichnung **BK z(diapir)** gekennzeichnet. => z. B.: **SK sm – BK so/BK z(diapir)/BK kru**.

- In Fällen, in denen ein **SK** von mehreren **BK** begrenzt wird, werden die beteiligten **BK** aufgezählt und durch einen Schrägstrich (/) ohne Leerzeichen voneinander getrennt. => z. B.: **SK sm – BK so/BK kro**.

Insbesondere in Regionen, die sowohl ausgeprägte Halotektonik, Phasen erhöhter Beckensubsidenz als auch einen deutlichen Einfluss von Erosionsdiskordanzen aufweisen (z. B. westliche Ausläufer des Glückstadt-Graben), ergeben sich lokal sehr komplexe Lagebeziehungen, bei denen ein Speicherkomplex horizontal und vertikal von verschiedenen Barrierekomplexen begrenzt wird (z. B.: **SK sm – BK so/BK z(diapir)/BK kru**). In diesen Regionen tritt, mit bis zu acht identifizierten Fallensituationen, auch die größte Vielfalt in der zentralen deutschen Nordsee auf (siehe **Tabelle 3**).

Im Gegensatz dazu konnten im Strukturraum Schillgrund-Hoch nur zwei Fallensituationen für den Speicherkomplex Oberrotliegend identifiziert werden. Dies ist auf die massive Abtragung der meisten **SK** und **BK** in dieser Region während des Mittel- bis Oberjura zurückzuführen. Dadurch ergibt sich auf dem Schillgrund-Hoch eine deutlich geringere Zahl an Kombinationsmöglichkeiten von **SK** und **BK** im Vergleich zu den Strukturräumen mit starker Versenkung und somit meist besserer Erhaltung der Komplexe.

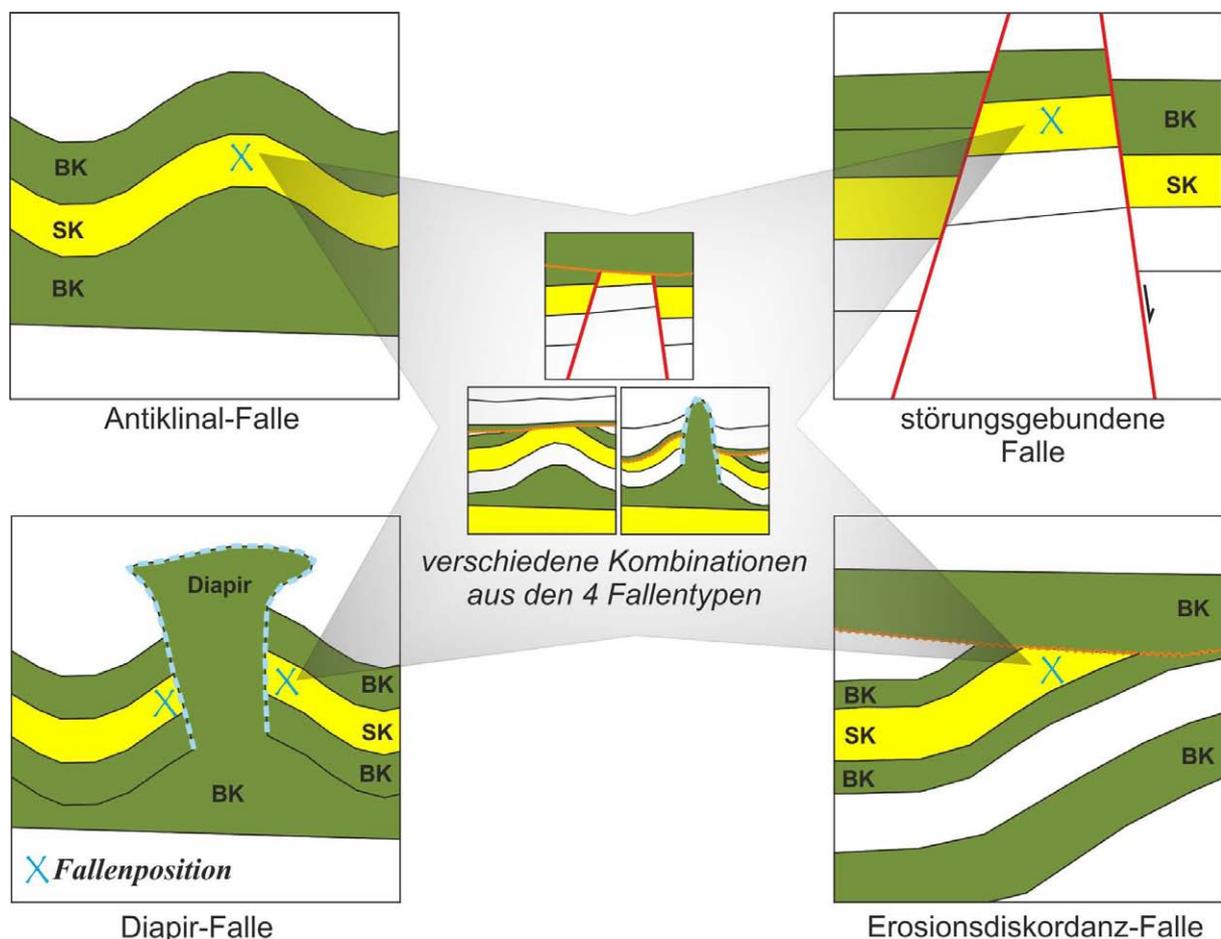
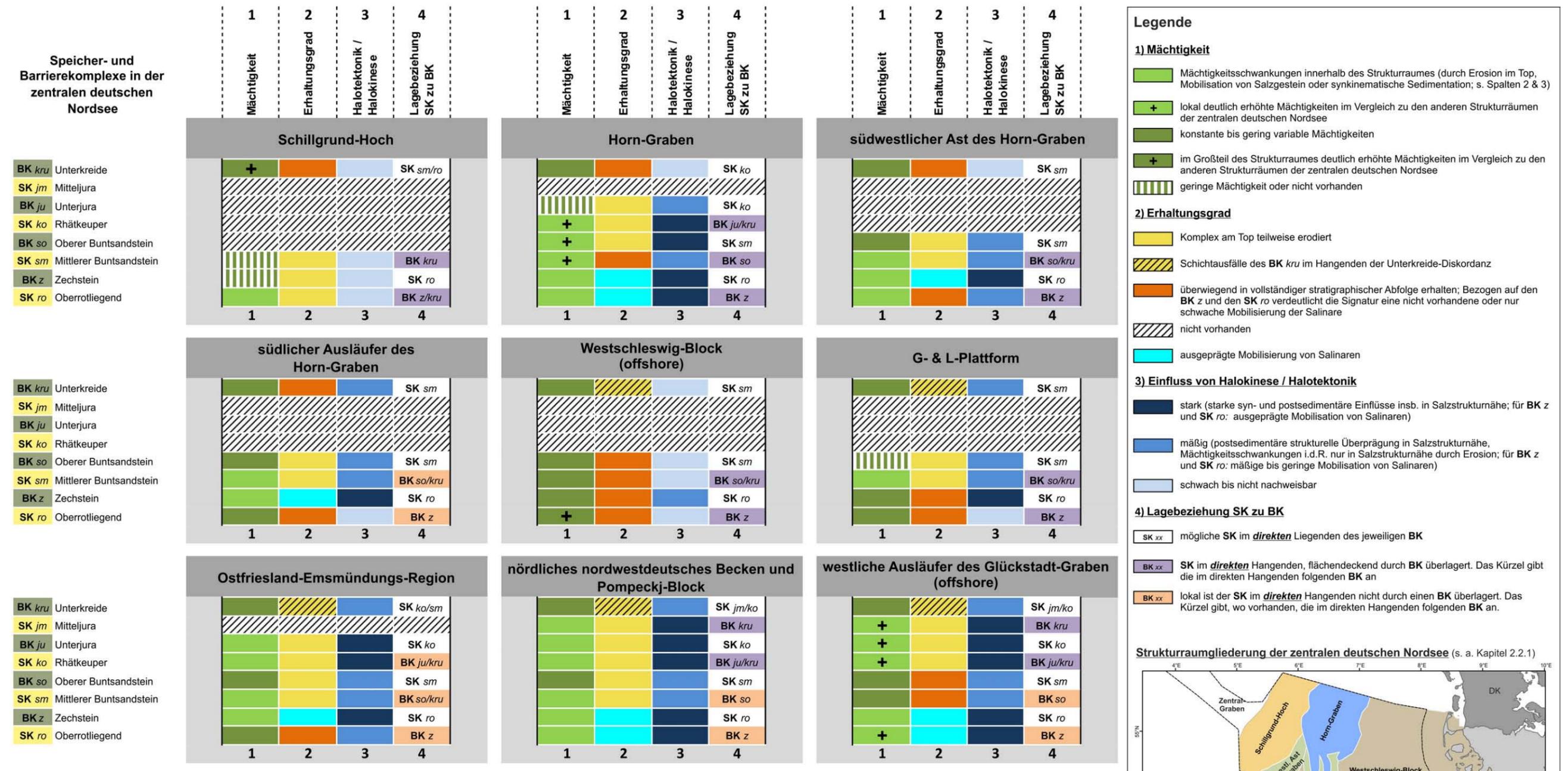


Abbildung 16: Schematischer Aufbau der betrachteten geologischen Fallentypen. Diese sind den Fallentypen strukturelle Falle und stratigraphische Falle (für den Typ Erosionsdiskordanz-Falle) zuzuordnen. Im zentralen deutschen Nordsee-Sektor sind häufig Fallen vorhanden, die eine Kombination aus den vier aufgeführten Grundtypen darstellen. Die Fallensituation beschreibt die Kombination aus einem Speicherkomplex und den assoziierten Barrierekomplexen in Verbindung mit dem Fallentyp. Die Fallenposition markiert den Bereich, in dem sich gespeicherte Fluide anreichern würden.

Tabelle 2: Wesentliche geologische Attribute von Speicher- und Barrierekomplexen innerhalb der neun Strukturräume der zentralen deutschen Nordsee.



Erläuterungen: Die Tabelle zeigt vier wesentliche geologische und strukturelle Attribute bezogen auf Speicher- und Barrierekomplexe für die neun Strukturräume der zentralen deutschen Nordsee (s. Kapitel 2.2.1). Der Fokus der Darstellung liegt auf der Darlegung der dominanten Ausprägung dieser Attribute innerhalb der jeweiligen Strukturräume und ermöglicht den Vergleich der strukturellen Eigenschaften. Der Einfluss dieser Attribute auf die Lagebeziehungen und Ausprägung von Speicher- und Barrierekomplexen wird so deutlicher sichtbar. Die hier aufgeführten Attribute sind auch aus den im Bericht enthaltenen geologischen Profilschnitten (**Abbildung 3**) sowie den Verbreitungs- und Mächtigkeitskarten der analysierten Komplexe zu entnehmen. Die nachfolgend aufgeführten Beispiele verdeutlichen die Lesart der Tabelle:

Beispiel 1: Attribute des Speicherkomplex Oberrotliegend (SK ro) auf dem Westschleswig-Block: Der SK ro zeigt eine konstante bis gering variable Mächtigkeit (Spalte 1). Im Vergleich zu den anderen Strukturräumen zeigt der SK ro auf dem Westschleswig-Block deutlich erhöhte Mächtigkeiten (Spalte 1). Der SK ro besitzt eine überwiegend vollständige stratigraphische Abfolge (Spalte 2). Die Salinare des Oberrotliegend wurden in diesem Strukturraum nicht nachweislich mobilisiert (Spalte 3). Der SK ro wird im **direkten** Hangenden von dem Barrierekomplex Zechstein (BK z) im gesamten Strukturraum überlagert (Spalte 4).

Beispiel 2: Attribute des Barrierekomplex Oberer Buntsandstein (BK so) im Strukturraum Horn-Graben: Der BK so zeigt deutliche Mächtigkeitsschwankungen (Spalte 1) durch Erosion im Top (Spalte 2) und durch synkinematische Sedimentationsprozesse infolge größerer, initialer halokinetischer Bewegungen (Spalte 3). Dabei liegt das Mächtigkeitsmaximum des BK so für den zentralen deutschen Nordseeraum innerhalb des Horn-Graben (Spalte 1). Der BK so überlagert, sofern vorhanden, im gesamten Strukturraum den im **direkten** Liegenden befindlichen SK sm (Spalte 4).

Tabelle 3: Typische Fallensituationen in den neun Strukturräumen der zentralen deutschen Nordsee.

Schillgrund-Hoch	Horn-Graben	südwestlicher Ast des Horn-Graben
SK ro – BK z SK ro – BK z/BK kru	SK ro – BK z SK sm – BK so SK sm – BK so/BK (z) SK sm – BK so/BK z(diapir) (SK sm – BK kru) (SK ko – BK ju/BK kru) (SK ko – BK ju/BK z(diapir))	SK ro – BK z SK sm – BK so SK sm – BK so/BK kru SK sm – BK so/BK z(diapir) SK sm – BK so/BK z(diapir)/BK kru
südlicher Ausläufer des Horn-Graben	Westschleswig-Block (offshore)	G- & L-Plattform
SK ro – BK z SK sm – BK so/BK z(diapir) SK sm – BK so/BK kru SK sm – BK so/BK z(diapir)/BK kru SK sm – BK z(diapir)/BK kru	SK ro – BK z SK sm – BK so SK sm – BK so/BK kru	SK ro – BK z SK sm – BK so/BK kru SK sm – BK z(diapir)/BK kru SK sm – BK kru
Ostfriesland-Emsmündungs-Region	nördliches nordwestdeutsches Becken & Pompeckj-Block	westlicher Ausläufer des Glückstadt-Graben (offshore)
SK ro – BK z SK sm – BK so SK sm – BK so/BK z(diapir) SK sm – BK so/BK kru SK sm – BK so/BK z(diapir)/BK kru (SK sm – BK so/BK (z)) (SK ko – BK ju/BK z(diapir)) (SK ko – BK ju/BK kru)	SK ro – BK z SK sm – BK so/BK z(diapir) SK sm – BK so/BK z(diapir)/BK kru SK ko – BK ju/BK z(diapir) SK ko – BK ju/BK kru (SK ko – BK ju) (SK jm – BK kru) (SK jm – BK kru/BK z(diapir))	SK ro – BK z SK sm – BK so SK sm – BK so/BK z(diapir) SK ko – BK ju/BK z(diapir) SK ko – BK ju SK ko – BK ju/BK kru SK jm – BK kru SK jm – BK kru/BK z(diapir)

(Kombination aus SK und BK) = Lokales und sehr seltenes Auftreten der Fallensituation in einem Strukturraum (nachgewiesen oder vermutet). Diese Spezialfälle werden in **Tabelle 4** nicht weiter berücksichtigt.

Einen Überblick über die möglichen Kombinationen von Speicher- und Barrierekomplexen in Fallensituationen in der zentralen deutschen Nordsee gibt **Tabelle 4**. Die Spalte „Häufigkeit“ veranschaulicht dabei, in wie vielen der neun definierten Strukturräume eine bestimmte Fallensituation vorkommt. Es zeigt sich, dass bestimmte Kombinationen, wie beispielsweise **SK ro – BK z**, besonders häufig auftreten und so eine große Bedeutung für das gesamte Untersuchungsgebiet haben. Andere Fallensituationen kommen dagegen nur lokal vor (z. B. **SK sm – BK kru**). Die größte Vielfalt an möglichen Fallensituationen ergibt sich für den **SK sm**, hervorgerufen durch dessen großflächige Erhaltung und Verbreitung sowie durch starke Strukturierung als Folge halotektonischer Prozesse ab der späten Trias. Eine detaillierte Beschreibung der in **Tabelle 4** aufgeführten Fallensituationen befindet sich im Anhang.

Zusammenfassend zeigt sich, dass ein großer Teil der Fallensituationen im mesozoisch-känozoischen Deckgebirge an Salzstrukturen (Salzkissen und Diapire) gebunden ist (siehe **Abbildung 3**). Störungsgebundene Fallen dominieren dagegen im Prä-Zechstein. Ein bedeutender Teil der definierten Fallensituationen besteht aus einer Kombination verschiedener Fallentypen.

Mit diesen Ergebnissen können weitere Detailanalysen potenzieller Speicherstrukturen innerhalb bestimmter Regionen gezielter geplant werden. Die hier dargestellte Auflistung von

Fallensituationen liefert einen weiteren Ausgangspunkt zur Untersuchung von Speicherregionen. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass zusätzliche bisher nicht definierte Fallensituationen im Untergrund der zentralen deutschen Nordsee vorkommen. Weitergehende und detaillierte Analysen unter Berücksichtigung eventuell nicht betrachteter geologischer Fallentypen und unter Einbeziehung zusätzlicher höher auflösender Daten sind erforderlich, um dies zu klären.

Tabelle 4: Die Häufigkeit einer spezifischen Fallensituation bezogen auf die neun Strukturräume der deutschen zentralen Nordsee mit Angabe der jeweils assoziierten Fallentypen.

Fallensituation		Häufigkeit ¹
Kombination aus SK und BK	Fallentyp	
SK <i>ro</i> – BK <i>z</i>	störungsgebundene Falle	9
SK <i>ro</i> – BK <i>z</i> /BK <i>kru</i>	störungsgebundene Falle + Erosionsdiskordanz-Falle	1
SK <i>sm</i> – BK <i>so</i>	Antiklinal-Falle	5
SK <i>sm</i> – BK <i>so</i> /BK (<i>z</i>)	störungsgebundene Falle	1
SK <i>sm</i> – BK <i>so</i> /BK <i>z</i> (<i>diapir</i>)	Diapir-Falle	6
SK <i>sm</i> – BK <i>so</i> /BK <i>kru</i>	Antiklinal-Falle + Erosionsdiskordanz-Falle	5
SK <i>sm</i> – BK <i>so</i> /BK <i>z</i> (<i>diapir</i>)/BK <i>kru</i>	Diapir-Falle + Erosionsdiskordanz-Falle	4
SK <i>sm</i> – BK <i>z</i> (<i>diapir</i>)/BK <i>kru</i>	Diapir-Falle + Erosionsdiskordanz-Falle	2
SK <i>sm</i> – BK <i>kru</i>	Erosionsdiskordanz-Falle	1
SK <i>ko</i> – BK <i>ju</i>	Antiklinal-Falle	1
SK <i>ko</i> – BK <i>ju</i> /BK <i>z</i> (<i>diapir</i>)	Diapir-Falle	2
SK <i>ko</i> – BK <i>ju</i> /BK <i>kru</i>	Erosionsdiskordanz-Falle	2
SK <i>jm</i> – BK <i>kru</i>	Erosionsdiskordanz-Falle	1
SK <i>jm</i> – BK <i>kru</i> /BK <i>z</i> (<i>diapir</i>)	Diapir-Falle + Erosionsdiskordanz-Falle	1

¹Anzahl der Strukturräume in denen eine spezifische Fallensituation vorkommt (siehe Tabelle 3). Die in Tabelle 3 dargestellten Spezialfälle sind hier nicht berücksichtigt.

3.5 Grenzen der vorliegenden Potenzialanalyse

Die geologische Einschätzung der Speicher- und Barrierepotenziale des tieferen Untergrundes des deutschen Nordsee-Sektors berücksichtigt vorwiegend Informationen über die weiträumige Verbreitung, Lithologie und Fazies der untersuchten Einheiten. Diese basieren auf umfangreichen geologischen und geophysikalischen Datensätzen (u. a. Seismik, Tiefbohrungen) sowie auf daraus abgeleiteten geologischen Modellen. Mögliche Nutzungskonkurrenzen, ökonomische Faktoren oder soziologische Belange, wie sie im Projekt COOSKA zusammengestellt wurden (Gast et al. 2012), sind in dieser Studie nicht untersucht worden.

Die Abgrenzung und Bewertung untersuchungswürdiger Speicher- und Barrierekomplexe beruht auf der weiträumigen Tiefenlage und Mächtigkeit sowie vereinfachten lithologischen Betrachtungen. So konnte unter anderem die geologische und tektonische Komplexität von Speicher- und Barrierehorizonten im Nahbereich von Salzstrukturen, aufgrund der Datenlage und des gewählten Bearbeitungsmaßstabes, nicht im Detail untersucht werden. Aufgrund des Betrachtungsmaßstabes sowie der generalisierten Abgrenzungskriterien sind standortspezifische Aussagen nur auf Basis weiterführender Detailuntersuchungen möglich. Diese sollten unter anderem eine Bewertung der strukturellen Verhältnisse und der tektonischen Randbedingungen (z. B. Typ und Orientierung von Störungen) sowie eine detaillierte Analyse fazieller und lithologischer Aspekte umfassen (siehe Kapitel 4).

3.5.1 Unschärfen in der Ausweisung untersuchungswürdiger Speicher- und Barrierekomplexe

Die verwendete Datengrundlage führt zu einer Reihe von Unschärfen (z. B. Generalisierung im GSN-Modell, unterschiedliche Bewertung der Lithologien in Bohrungen) in der Ausweisung untersuchungswürdiger Speicher- und Barrierekomplexe und damit zu einer eingeschränkten Aussagekraft und Darstellungsmöglichkeit der Ergebnisse. Eine ausführliche Diskussion zur Aussagekraft des zugrundeliegenden GSN-Modells und der damit verbundenen Unschärfen wird in Kaufmann et al. (2014) wiedergegeben. Vor allem die räumliche Verteilung von Bohrungen und damit der verfügbaren Informationen über die Tiefenlage, über die Mächtigkeit und über die lithologische Zusammensetzung der Komplexe ist teils sehr heterogen. Der Abstand einzelner Bohrlokationen kann zwischen 2 und 50 km betragen (**Abbildung 7**). Aufgrund der unterschiedlich stark variierenden Fazies der stratigraphischen Einheiten (z. B. distale oder proximale Lage zum Liefergebiet) muss für jede Bohrung individuell bewertet werden, wie weit ihre lithologische Information flächenhaft extrapoliert werden kann. Des Weiteren haben synsedimentäre, tektonische und halotektonische Prozesse (Kapitel 2.2) einen entscheidenden Einfluss auf die Verteilung und die lithologischen Eigenschaften der Sedimente. Generell ist bei fortwährender tektonischer Aktivität von einer größeren Variabilität des sedimentären Systems auszugehen. So sind beispielsweise die Sedimentgesteine des Unteren Buntsandstein im Untersuchungsgebiet bei verhältnismäßig geringer tektonischer Aktivität nahe dem einstigen Beckenzentrum abgelagert worden. Die Lithologien des Unteren Buntsandstein dokumentieren daher nahezu einheitliche fazielle Bedingungen, sodass lithologische Informationen aus Bohrungen verhältnismäßig sicher weiträumig extrapoliert werden können. Dagegen sind lithologische Bohrungsinformationen über synkinematische Sedimente in einer Randsenke meist nur für diese Struktur repräsentativ und nicht auf größere Bereiche übertragbar.

Tektonische Prozesse und begleitende erosive Vorgänge führen zu einem teilweise komplexen strukturellen Bild, das die Korrelation und Interpolation von Bohrungsdaten zusätzlich erschwert. So sind zur korrekten Bewertung lithologischer Daten aus Bohrungen, beispielsweise innerhalb von Grabenstrukturen, Kenntnisse über die Entstehungsgeschichte dieser Strukturen erforderlich. So ist eine Übertragung der Bohrungsbefunde auf Bereiche außerhalb einer Grabenstruktur nur dann geologisch vertretbar, wenn der Graben zur Zeit der Ablagerung des jeweils betrachteten Horizonts nicht aktiv oder noch nicht angelegt war.

Diese Einschränkungen bei der Interpretation von Bohrungsdaten wurden bei der Erstellung der Potenzialkarten berücksichtigt. Je nach Komplexität der definierten Strukturräume und der Faziesverteilung wurden die Lithologie- und Mächtigkeitssinformationen einzelner stratigraphischer Einheiten aus Bohrungen unterschiedlich stark in ihrer räumlichen Aussagekraft gewichtet. Bei der Lithologie wurde bei einer geringen Aussagekraft der Bohrungsinformation vornehmlich auf ergänzende Literaturdaten, beispielsweise publizierte Faziesverteilungskarten (Geluk & Röhling 1997), zurückgegriffen. Lokale Mächtigkeitsschwankungen von stratigraphischen Einheiten (z. B. synkinematische Randsenkenablagerungen oder durch hangende Diskordanzen) können, durch den regionalen bis überregionalen Maßstab, nicht vollständig aufgelöst werden. Somit sind die Untersuchungen des Potenzials eines einzelnen Speicher- oder Barrierekomplexes ausschließlich im Zusammenhang mit der dargestellten Datendichte und dem gewählten Untersuchungsmaßstab zu verwenden. Im Folgenden werden die Unschärfen in der Ausweisung der Untersuchungswürdigkeit für die einzelnen Komplexe beschrieben.

Oberrotliegend

Eine mögliche Unschärfe in der Ausweisung der Mächtigkeit, Tiefenlage und Untersuchungswürdigkeit des Oberrotliegend kann durch die Verwendung des Basishorizontes des Oberrotliegend (SPBA, Doornenbal & Stevenson 2010) begründet sein. Dieser repräsentiert lediglich eine grobe Annäherung der tatsächlichen Oberrotliegendbasis. Die Basis Oberrotliegend im SPBA, im deutschen Bereich, beruht weitestgehend auf Bohrungsbefunden und ist nur lokal durch seismische Daten gestützt. Die Unsicherheiten der verwendeten Modelle für das Oberrotliegend werden in Kaufmann et al. (2014) beschrieben.

Zechstein

Aufgrund der strukturellen Komplexität des Zechstein-Stockwerkes musste das zugrundeliegende Modell (GSN, Kaufmann et al. 2014) teilweise stark generalisiert werden. Vor allem zahlreiche kleinräumige Salzmobilisationen und Störungen konnten aufgrund ihrer großen Anzahl nicht vollständig untersucht beziehungsweise mussten vereinfacht dargestellt werden. Infolgedessen konnten beispielsweise lokale Variationen der Sedimentmächtigkeiten oder die Heterogenität der Lithologien bei der Erstellung der Mächtigkeits-, Tiefenlage- und Potenzialkarten nicht im Detail berücksichtigt werden.

Mittlerer Buntsandstein

Die Basisfläche des Mittleren Buntsandstein als Grundlage für die Beurteilung der Untersuchungswürdigkeit ist im GTA nicht eindeutig definiert. Anstelle einer stratigraphischen Grenze sind im Liegenden und Hangenden seismische Reflektoren benutzt worden, welche die Basis des Mittleren und Unteren Buntsandstein (su+sm) beziehungsweise die Basis des Oberen Buntsandstein und Muschelkalk (so+m) repräsentieren. Für die vorliegende Studie wurde daher die Basis des Mittleren Buntsandstein anhand von Mächtigkeitsdaten aus Röhling (1988) berechnet, indem diese vom Bezugshorizont so+m abgezogen wurden. Jedoch ist in den Mächtigkeitskarten des Mittleren Buntsandstein (Röhling 1988) der Bereich des Schillgrund-Hoch nicht berücksichtigt. In diesem Bereich wurde im GSN-Modell die Mächtigkeitsverteilung, anhand von Mächtigkeits-trends im übrigen Verbreitungsgebiet, extrapoliert (Kaufmann et al. 2014).

In den Mächtigkeitskarten nach Röhling (1988) werden stratigraphische Mächtigkeiten angegeben. Da die zur korrekten Wiedergabe der Geometrien erforderlichen vertikalen Mächtigkeiten nicht eindeutig daraus abzuleiten sind, kann es in der berechneten Basisfläche des Mittleren Buntsandstein zu Ungenauigkeiten kommen. Dies kann wiederum weitere Unschärfen in den erstellten Mächtigkeits- und Tiefenlinienplänen sowie der daraus erstellten Potenzialkarten nach sich ziehen. Vor allem ist dies in Bereichen mit komplexem geometrischem Aufbau oder entlang von Strukturgrenzen mit steilem Schichteinfallen möglich. Aufgrund der fehlenden Basisfläche können die Verbreitungsgrenzen des Mittleren Buntsandstein nur ungenau definiert werden. Als grobe Annäherung wurden für den Mittleren Buntsandstein ähnliche Verbreitungsgrenzen wie für den Unteren Buntsandstein angenommen. Signifikante Abweichungen von dieser Näherung sind besonders in denjenigen Bereichen zu erwarten, in denen die Unterkreide-Diskordanz tief in die unterlagernden Schichten einschneidet. Dies ist vorzugsweise auf dem Schillgrund-Hoch der Fall, auf dem die Sedimentgesteine partiell bis auf das prä-permische Grundgebirge abgetragen wurden (siehe Kapitel 2.2).

Oberer Buntsandstein

Der Obere Buntsandstein wird in die Folgen Röt-Salinar und Röt-Ton untergliedert. Bei der Konstruktion der Topfläche wurde, in Bereichen ohne Bohrungsbefund, im GSN eine gemittelte Mächtigkeit der Röt-Tone von mindestens 50 m angenommen. Die Mächtigkeit im GSN reduziert sich modellierungsbedingt im Randbereich von Salzstrukturen auf diese Mindestmächtigkeit. Seismische Interpretationen dagegen lassen eine deutlich höhere Mächtigkeit erwarten. Somit wurde, abweichend vom GSN, die modellierte Mächtigkeitsabnahme des Röt an Diapiren hier nicht berücksichtigt. Da die Kriterien der Mindestmächtigkeit und Tiefenlage für den Oberen Buntsandstein großflächig erfüllt werden, wird dort eine Untersuchungswürdigkeit ausgewiesen. Darüber hinaus ist die Verbreitungsgrenze des Oberen Buntsandstein infolge des teils starken Einflusses von Erosionsdiskordanzen im Keuper und in der Unterkreide nicht überall klar zu definieren.

Rhätkeuper

Aufgrund der wenigen zur Verfügung stehenden Bohrungs- und Seismikdaten konnte im GSN keine Basisfläche für den Rhätkeuper konstruiert werden. Demzufolge sind in dieser Studie keine Tiefenlinien- und Mächtigkeitskarten erstellt worden (Kapitel 3.3.5). Die Bewertung des Speicherpotenzials beruht daher vorwiegend auf den Mächtigkeitskarten des GTA (Baldschuhn et al. 2001), Daten einzelner Bohrungen (**Abbildung 12**) und auf paläogeographischen Studien (Beutler 2005).

Technisch bedingte Artefakte

Neben den Unschärfen in der Ausweisung der Speicher- und Barrierekomplexe können verschiedene technisch bedingte sogenannte „Artefakte“ in den erarbeiteten Mächtigkeits-, Tiefenlinien- und Potenzialkarten auftreten:

- Linien gleicher Sedimentmächtigkeit (Isopachen) oder Tiefenlage zeigen Sprünge oder Versätze.
=> Ursache können zum Beispiel Störungsstrukturen im Untergrund sein, die durch den Bearbeitungsmaßstab (1:500 000) nicht aufgelöst werden konnten.
- Abweichungen einzelner Elemente (z. B. Verlauf der Küstenlinie) zwischen den Datensätzen.
=> Ursache dafür sind residuale Übertragungsfehler als Folge der Transformation der Datensätze aus verschiedenen Koordinatensystemen. Speziell von der Küstenlinie existieren mehrere Versionen in unterschiedlichem Detailgrad, die dementsprechend voneinander abweichen. Abweichungen infolge der Transformation können mehrere hundert Meter betragen.
- Störungen innerhalb der einzelnen untersuchten Horizonte sind in der Kartendarstellung generalisiert als Störungsspuren wiedergegeben.
=> Im Gegensatz zu einer Projektion der exakten Störungsgeometrie in die Bezugsfläche des untersuchten Horizontes hinein, bietet die Kartendarstellung keine weiteren Informationen zu Störungsattributen (z. B. Sprunghöhe, Inklination).
- Topologische Inkonsistenzen/Überschneidungen bei der räumlichen Ausweisung auf Basis unterschiedlicher Datengrundlagen (GTA, GTA-3D, GSN).

4. Detailbetrachtung einer ausgewählten Region in der zentralen deutschen Nordsee (Fallstudie)

4.1 Einleitung

Für die zentrale Deutsche Nordsee wurden kleinmaßstäblich Speicher- und Barrierekomplexe untersucht (Kapitel 3). Die Ergebnisse wurden in Form von großräumigen Potenzialkarten dargestellt und damit Regionen ausgewiesen, die eine Untersuchungswürdigkeit für die Speicherung von Fluiden in salinaren Aquiferen nach den in dieser Studie gewählten Kriterien aufweisen.

In dieser Fallstudie werden für eine ausgewählte Region weiterführende strukturelle und lithologische Detailanalysen vorgestellt. Erst durch den erhöhten Detailgrad in der Fallstudie konnten Feinheiten des Strukturbaus und die Varianz in der lithologischen Ausprägung aufgelöst werden. Auf dieser strukturellen Analyse aufbauend wurde exemplarisch für eine Speicherstruktur eine Abschätzung der Speicherkapazität vorgenommen. Die Ergebnisse werden in einem regionalen bis lokalen Maßstab dargestellt. Reservoirskalige Betrachtungen wurden nicht durchgeführt, sind jedoch ein entscheidender weiterer Schritt auf dem Weg zur Ausweisung von geeigneten Speicherstrukturen.

4.1.1 Ziele

Im Rahmen einer Fallstudie sollen Detailanalysen zum strukturellen Bau, der lithologischen Ausprägung und Verbreitung einzelner Formationen sowie eine Speicherkapazitätsabschätzung für eine Fallenstruktur im Oberrotliegend durchgeführt werden. Aufgrund der guten Datengrundlage sollen repräsentative Ergebnisse erarbeitet werden, die so auf strukturell vergleichbare Regionen im Gebiet der deutschen Nordsee übertragbar sind. Basis dafür ist eine seismische Neukartierung dieser Region, um ein genaueres Bild des strukturellen Aufbaus zu gewinnen. Diese soll mit bestehenden Strukturinterpretationen verglichen werden. Zusätzlich zu den im GTA enthaltenen Horizonten, ist eine Kartierung weiterer Basishorizonte notwendig (ro, smV, smD/smH, smS, soT, mu, mm, mo, km).

Für eine bessere Visualisierung des Strukturbaus sollen neben Horizontkarten auch geologische Profilschnitte auf Basis von Reflexionsseismik erstellt werden. Durch die detaillierte strukturelle Interpretation dieser seismischen Profile soll ein genauerer Überblick über das Störungsinventar und die Salzstrukturen in der Fallstudienregion erlangt werden. Basierend darauf sollen erste Abschätzungen zur strukturellen Beanspruchung von Speicher- und Barrierehorizonten in der Region vorgenommen werden. Aussagen über vorhandene Störungen innerhalb der Speicherkomplexe des Oberrotliegend und des Mittleren Buntsandstein sowie den jeweils im Hangenden folgenden Barrierekomplexen sind dabei von besonderem Interesse. Zusätzlich soll der Einfluss quartärer Rinnen untersucht werden.

Je nach Datenlage lassen Bohrlochkorrelationen und das dichte Netz an seismischen Daten genauere Aussagen über die Verbreitung, Lithologie und die Mächtigkeit zu. Für die Fallstudie soll eine detailliertere Gliederung der Schichtfolge erarbeitet werden. Unabhängig von einer Kategorisierung nach Komplexen sollen in der Fallstudie auf Basis von Bohrdaten weitere potenziell nutzbare Speicher- und Barrierehorizonte identifiziert und bewertet werden. Darüber hinaus soll für eine ausgewählte Struktur auf Basis einer 3D-Modellierung eine Abschätzung des Speichervolumens erfolgen. Anhand von Bohrdaten sollen zudem Angaben über Porositäten und Permeabilitäten gemacht werden, die in eine anschließende Kapazitätsberechnung nach Knopf et al. (2010) für eine exemplarische Fallenstruktur einfließen.

4.1.2 Kriterien zur Auswahl einer Fallstudienregion

Die Auswahl einer geeigneten Fallstudienregion erfolgte anhand folgender Kriterien:

- Möglichst hohe Dichte verfügbarer geologischer und geophysikalischer Daten (v. a. für das Oberrotliegend sollte eine ausreichende Bohrungsdichte und flächendeckende seismische Information gegeben sein).
- Repräsentativer geologischer Untergrund: Salzkissen und Salzdiapire mit den dazugehörigen Randsenken. Mit Erosionsdiskordanzen im jüngeren Mesozoikum.
- Vorhandensein von untersuchungswürdigen Speicher- und Barrierekomplexen (siehe Kapitel 3.3).
- Vorhandensein von potenziellen Speicherstrukturen.
- Speicherkapazität von mehr als 50 Mt. im Untersuchungsgebiet nach der ersten Potenzialabschätzung durch GeoCapacity (Vangkilde-Pedersen et al. 2009).
- Räumliche Nähe zu potenziellen CO₂-Emittenten (u. a. Erdgas- oder Kohlekraftwerke).

4.1.3 Überblick über die ausgewählte Fallstudienregion

Die danach ausgewählte Fallstudienregion befindet sich im Süden des zentralen deutschen Nordsee-Sektors im Bereich der geographischen Nordseeblöcke H17, H18, L1, L2, L3 sowie L4 und L5 (**Abbildung 17**). Die Region weist zehn Tiefbohrungen und ein dichtes Netz von WSW-ENE- sowie NNW-SSE-orientierten 2D-reflexionsseismischen Profilen auf (**Abbildung 18**). Damit ist eine, im Vergleich zu anderen Gebieten der zentralen deutschen Nordsee, sehr hohe Dichte an geologischen und geophysikalischen Daten gegeben. Zudem besitzt die Region einen geologisch repräsentativen Querschnitt von Strukturen, die das Strukturbild im tieferen Untergrund der zentralen deutschen Nordsee dominieren. Sie beinhaltet sowohl Teilbereiche von zwei Salzkissen (Leila und Lilli) sowie von Salzmauern (Lollo und Lisa, Linda und Liane) mit den dazugehörigen Randsenken (**Abbildung 19**).

Mögliche Speicherhorizonte im Oberrotliegend, im Mittleren Buntsandstein sowie auch der Barrierekomplex des Zechstein sind flächendeckend vorhanden. Durch jungmesozoische Erosionsereignisse sind Ablagerungen des Malm und des Dogger nicht sowie die des Lias, des Keuper, Muschelkalk und des Röt nur partiell verbreitet. Der Barrierekomplex Unterkreide ist dagegen beinahe flächendeckend verbreitet.

Für die Fallstudienregion ergeben sich nach den Ergebnissen des Projektes GeoCapacity mögliche Speicherstrukturen im Oberrotliegend, Mittleren Buntsandstein sowie im Unteren und Mittleren Keuper (Vangkilde-Pedersen et al. 2009). In GeoCapacity wurden überwiegend Antiklinalstrukturen untersucht (**Abbildung 20**). Die kumulierte Gesamtkapazität für die Speicherung von CO₂ in der Fallstudienregion beträgt danach ca. 161,6 Mt. Die größte Antiklinalstruktur im Bereich des Salzkissens Lilli besitzt eine Kapazität von ca. 54 Mt. (Vangkilde-Pedersen et al. 2009).

Der Südrand des Untersuchungsgebietes ist zwischen 28 – 45 km von der ostfriesischen Küste und ca. 60 km von der Stadt Emden entfernt. Dadurch ist die Nähe zu CO₂-Emittenten (Erdgas- oder Kohle-Kraftwerke) gegeben (**Abbildung 17**).

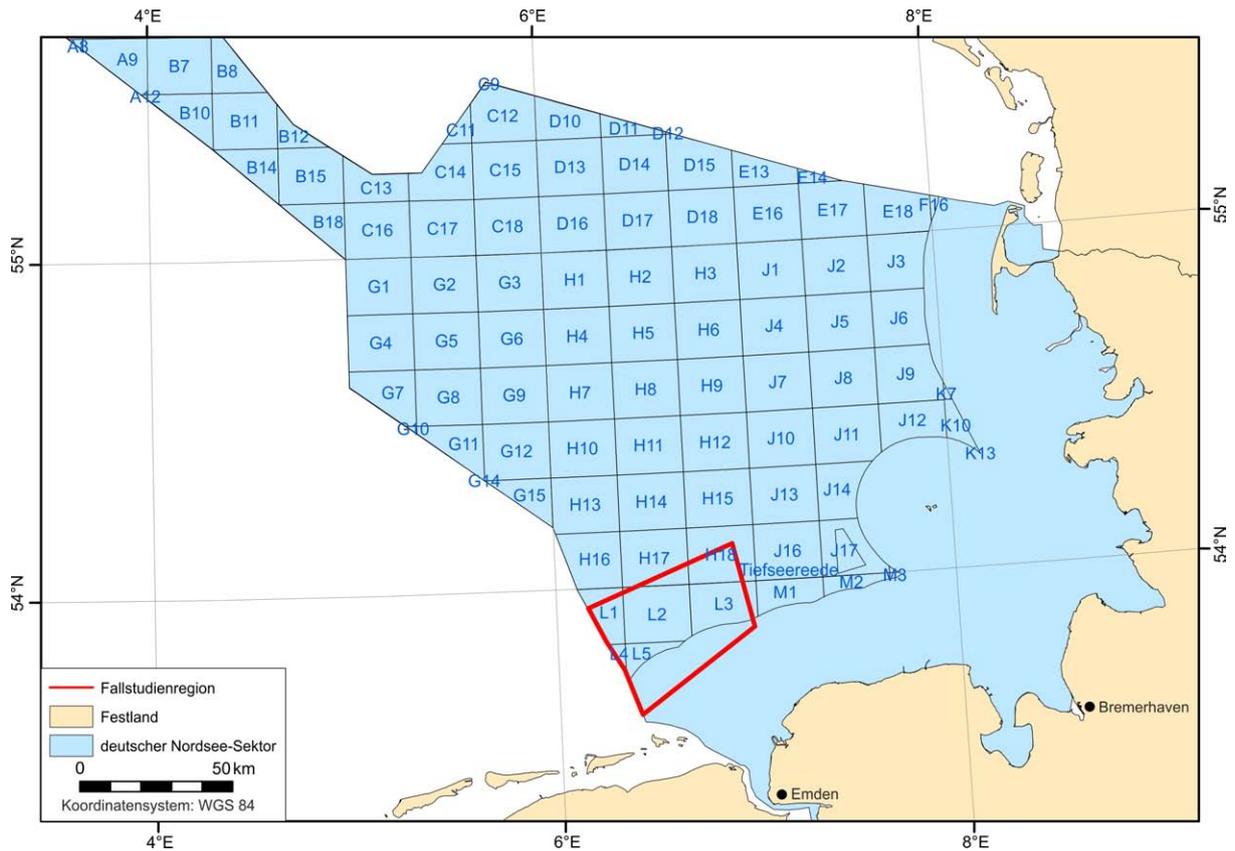


Abbildung 17: Lage der ausgewählten Fallstudienregion. Dargestellt ist die Blockkennung in der AWZ.

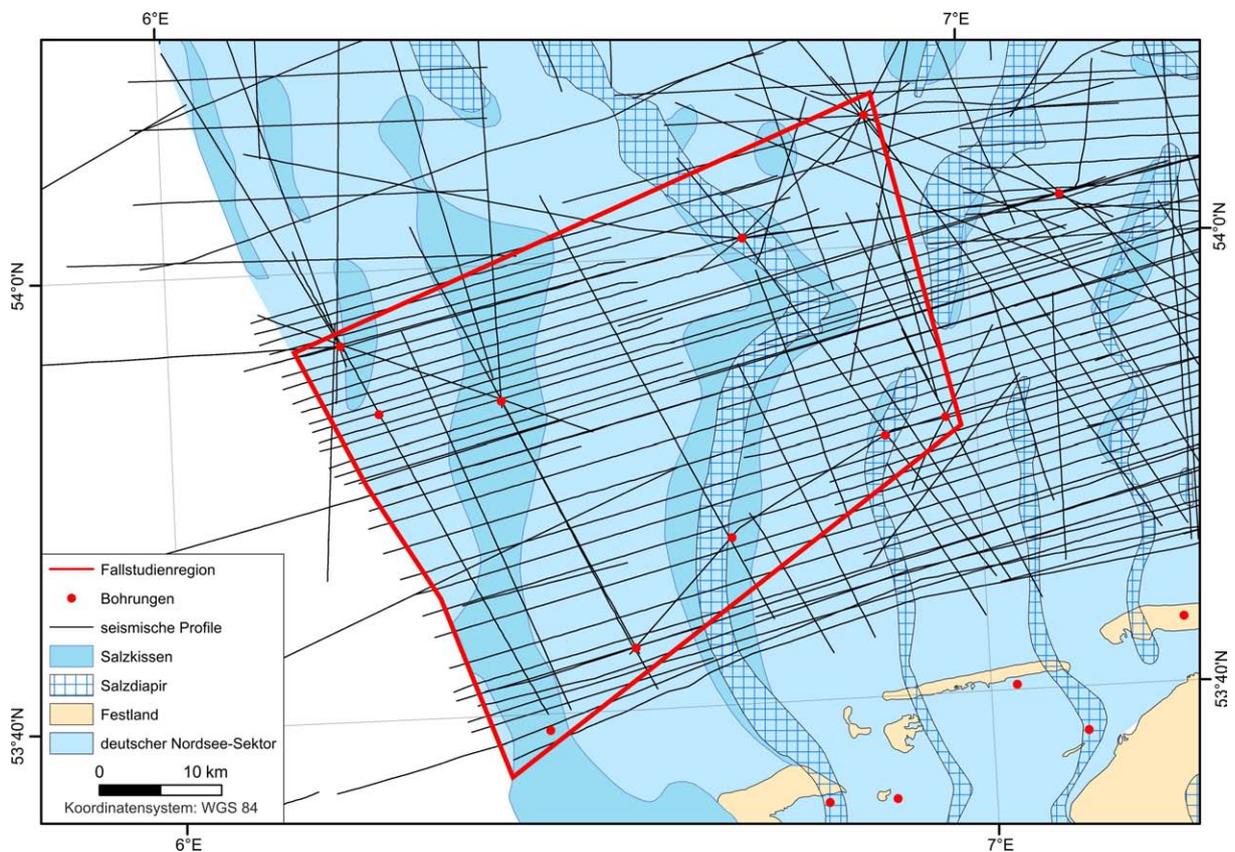


Abbildung 18: Lage der verwendeten reflexionsseismischen Linien und Bohrungen in der Fallstudienregion. Die Umrisse der Salzstrukturen stammen aus Reinhold et al. (2008).

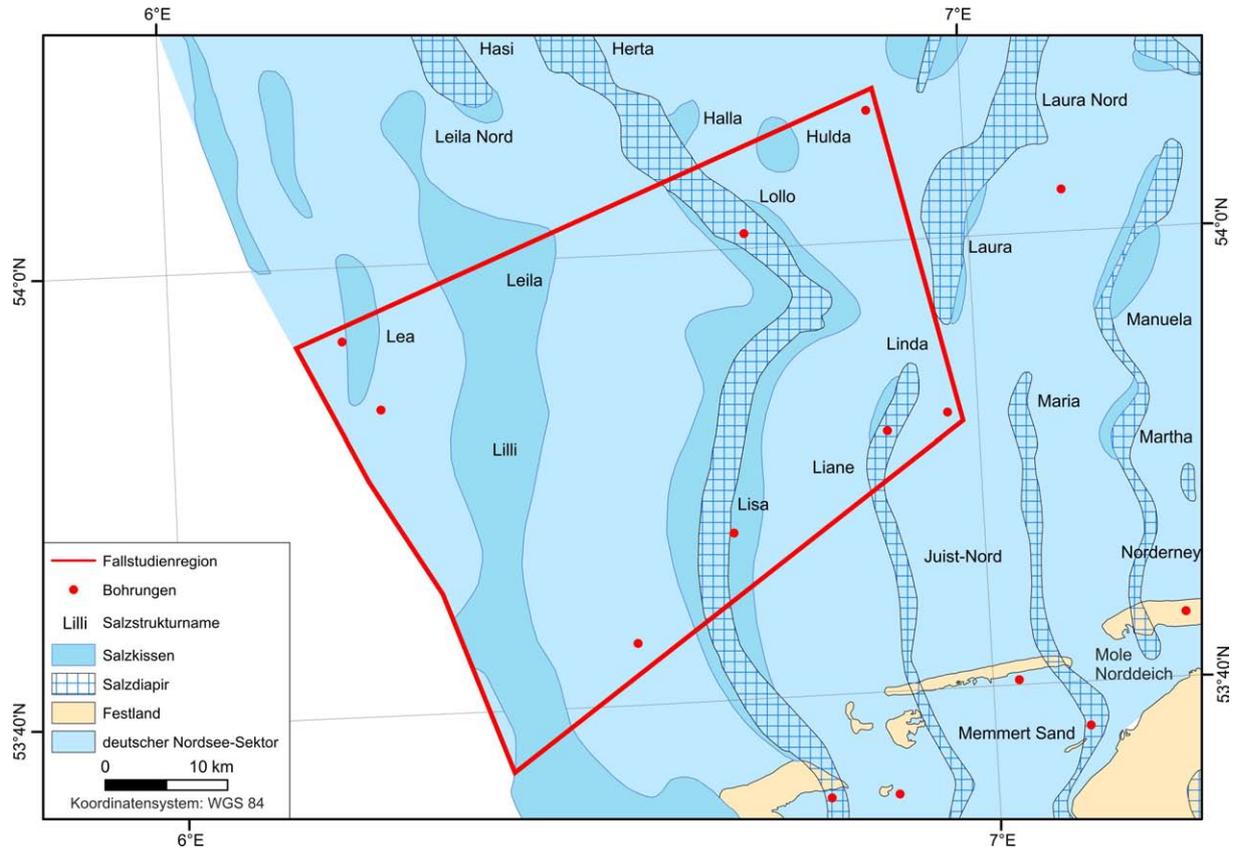


Abbildung 19: Salzstrukturen im Bereich der Fallstudienregion (stammen aus Reinhold et al. 2008).

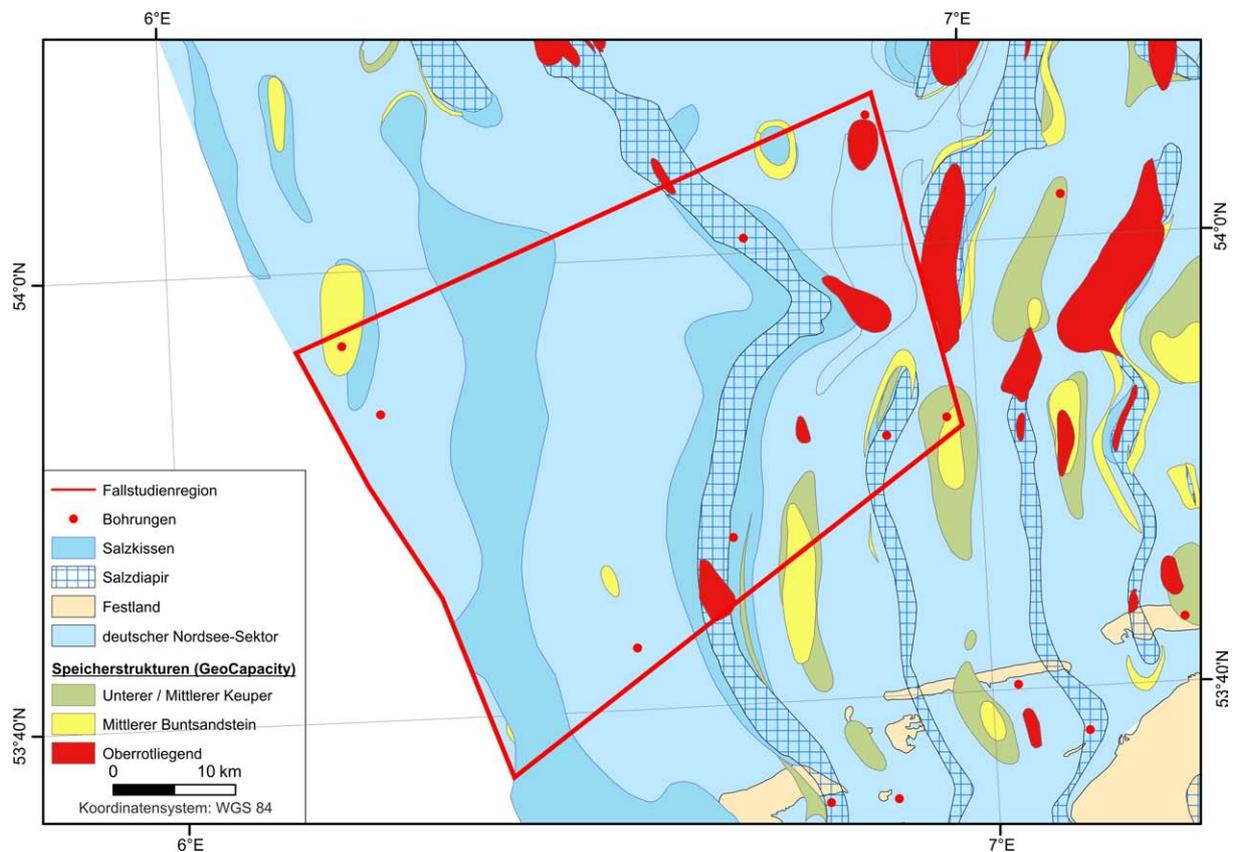


Abbildung 20: Ausweisung möglicher Speicherstrukturen nach stratigraphischen Positionen im Projekt GeoCapacity (Vangkilde-Pedersen et al. 2009). Die Umrisse der Salzstrukturen stammen aus Reinhold et al. (2008).

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Geologische Übersichtsprofile

Aus dem relativ dichten Netz von WSW-ENE- sowie NNW-SSE-orientierten seismischen Profilen wurden fünf Profile für detailliertere Analysen ausgewählt (**Abbildung 22**). Profil 1, 2 und 3 verlaufen annähernd senkrecht zur Hauptstrukturrichtung in der Fallstudienregion. Die Profile 4 und 5 dagegen verlaufen in etwa mit dem Streichen der Salzmauern. Dadurch sind auch Mächtigkeitstrends und Lagebeziehungen zu erkennen, die in den anderen Profillagen nicht deutlich hervortreten. Die Profile wurden basierend auf einer seismischen Neuinterpretation, wie sie in **Abbildung 21** beispielhaft gezeigt wird, erstellt. Hierbei wurde zunächst ein Bezug zwischen den stratigraphischen Angaben aus Bohrungen und hervorstechenden Reflektoren in der Reflexionsseismik hergestellt. Die Reflektoren in den seismischen Profilen wurden genutzt, um wichtige Basishorizonte oder Trennflächen in der Schichtenfolge zu interpretieren. Nachdem die Horizontinterpretationen der seismischen Linien mit Interpretationen kreuzender seismischer Linien auf ihre Konsistenz überprüft wurden, erfolgte die Interpretation der Störungen und Salzstrukturen.

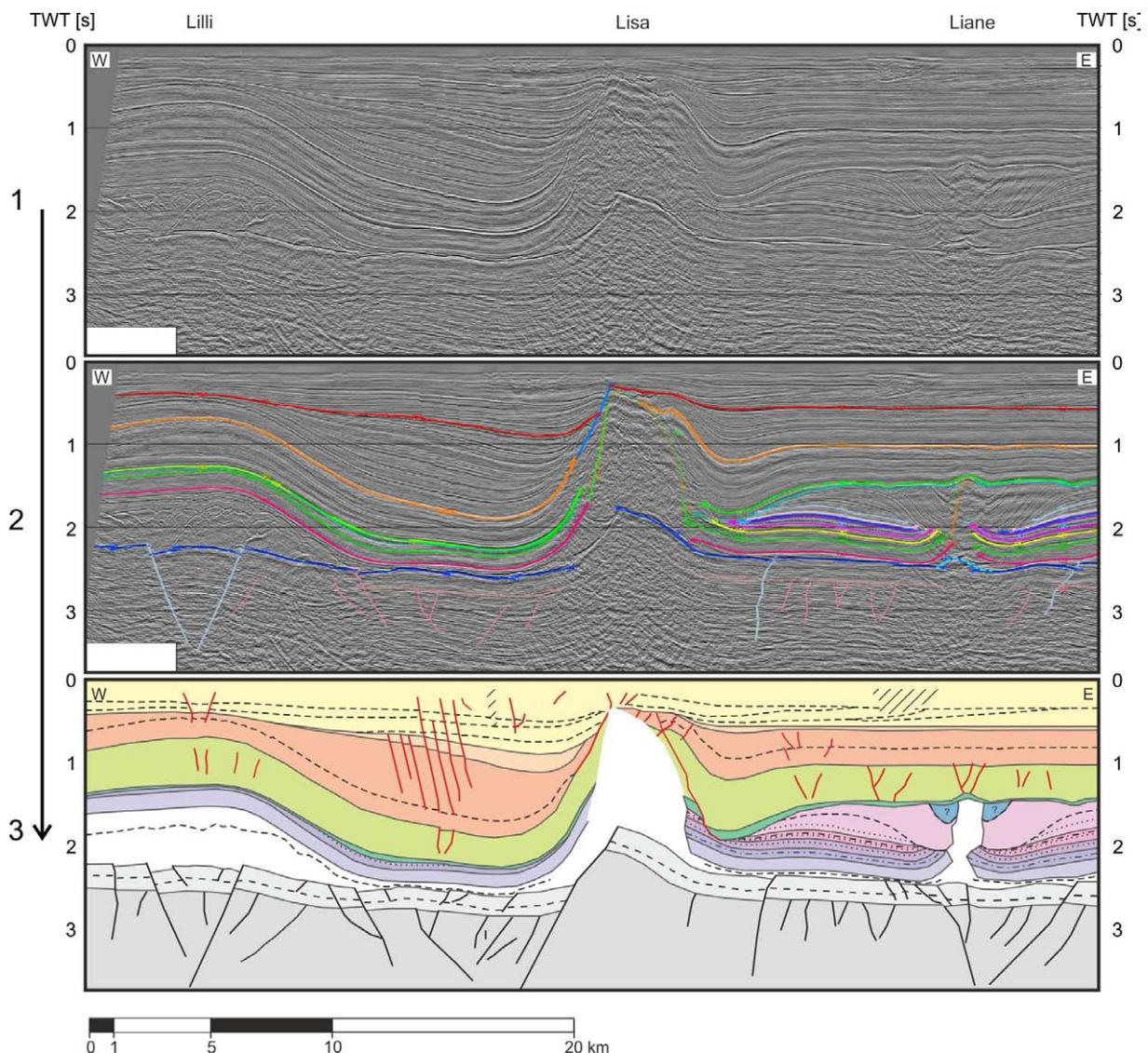


Abbildung 21: Exemplarischer Ablauf der Konstruktion von geologischen Profilen. Diese basieren auf Horizonten und Störungen, die in 2D-seismischen Profilen (1) mithilfe der Software GeoFrame interpretiert wurden (2). Auf dieser Grundlage wurden die geologischen Profile (**Abbildung 22**) konsistent konstruiert (3).

Im Anschluss wurden seismische Linien ausgewählt, die Auffälligkeiten im Strukturbaue der Fallstudienregion besonders gut verdeutlichen. Aus den seismischen Interpretationsergebnissen wurden in sich geschlossene konsistente geologische Profile erstellt.

Basierend auf den Profilschnitten konnten der Strukturbaue und somit die Mehrzahl der Salzstrukturen und Störungen in der Fallstudienregion detailliert dargestellt werden. Darüber hinaus sind auf Basis der Profile, mögliche Fallenstrukturen/-situationen zu identifizieren. Im Folgenden wird der strukturelle Aufbau und die Mächtigkeitsverteilung der Sedimentgesteine erläutert.

4.2.2 Beschreibung und Interpretation des Strukturbaus

Störungen des Prä-Zechstein

Das Prä-Zechstein ist durch ein überwiegend extensionales Störungsmuster gekennzeichnet. Ein Teil der Störungen zeigt Segmente, die „*negative flower structures*“ andeuten. Diese lassen auf eine vermutlich transtensionale Anlage oder spätere Überprägung schließen (**Abbildung 22**, im Westen von Profil 2, im Osten von Profil 3). Andere Segmente, die eine transpressive Prägung andeuten, sind nur untergeordnet in der Fallstudienregion vorhanden. Diese könnten Übersprünge zwischen Störungen oder Richtungsänderungen in deren Verlauf anzeigen. Ein Hinweis auf den Blattverschiebungsanteil vieler Störungen im Prä-Zechstein gibt auch ihr meist steiles Einfallen. Neben den überwiegend NNW-streichenden Störungen sind insbesondere an der Basis Oberrotliegend ENE-streichende Elemente sichtbar (**Abbildung 25**). Diese Elemente könnten aufgrund, der gleichen Orientierung wie der Großteil der seismischen Profile, Interpretations- oder Modellierungsartefakte darstellen. Die wenigen seismischen Profile, die senkrecht dazu orientiert sind, geben keinen klaren Hinweis auf ENE-streichende Störungen. Da jedoch die ENE-streichenden Elemente mit deutlichen Änderungen im Tiefentrend der Basisfläche des Oberen Rotliegend und des Zechstein (**Abbildung 25**, **Abbildung 26**) zusammenfallen sowie mit Sprüngen oder Terminierungen NNW-streichender Störungen korrelieren, ist diese angedeutete Strukturrichtung wahrscheinlich vorhanden.

Die geologischen Profile (**Abbildung 22**) geben zusätzliche Hinweise auf das präpermische Störungsmuster, das an der Unter- und Oberrotliegend-Diskordanz erodiert wurde. Einzelne, bis ins Zechstein durchgehende Störungssegmente zweigen von diesen erodierten Störungen ab oder richten sich mit ihrem Verlauf nach diesen präexistenten Strukturen. Daraus ist zu schließen, dass sich das Störungsmuster im Rotliegend zumindest teilweise am Störungsmuster im Prä-Perm orientiert. Für einige Störungen und Störungsscharen ist, insbesondere auf Basis ihres komplexen, sich stark verzweigenden Aufbaus, eine mehrfache Reaktivierung anzunehmen. Dagegen sind einige wenige Störungen nur auf das Rotliegend und den basalen Zechstein beschränkt.

Die Störungszone unterhalb der Salzmauern Lisa und Lollo ist, aufgrund ihrer zum Rest der Störungen des Prä-Zechstein in der Fallstudienregion unterschiedlichen Orientierung und allgemeinen Charakteristika als jüngere Struktur im Prä-Zechstein Sockel anzusehen. Zudem versetzt beziehungsweise terminiert sie das zuvor beschriebene NNW-streichende Störungsmuster (**Abbildung 23**).

Störungen und Salzstrukturen des mesozoischen bis känozoischen Deckgebirges

Bis auf wenige Ausnahmen, insbesondere im Bereich der Salzstrukturen, zeigen die Störungen des Deckgebirges Sprunghöhen von meist weniger als 100 m (**Abbildung 22**). Auch scheinen, bis auf im Umfeld der Salzstrukturen, Störungen an bestimmte Gebirgsstockwerke gebunden zu sein. Die Orientierung und das Muster der Störungen im Deckgebirge sind deutlich anders als die im Prä-Zechstein Grundgebirge. Die Störungen des Deckgebirges verlaufen häufig im Scheitelbereich der Salzstrukturen und richten sich nach deren Orientierung. Keine Störung in der Fallstudienregion durchschlägt vollständig das Zechstein. Das Zechstein entkoppelt somit das mesozoische Deckgebirge vom Prä-Zechstein („*thin-skinned tectonics*“; Kley et al. 2008, ten Veen et al. 2012).

Die Gesteine der Trias scheinen kaum durch Bruchtektonik beeinflusst worden zu sein. Nur entlang der Salzmauern Lollo und Lisa sowie im südlichen Abschnitt der Struktur Lilli sind Störungen zu beobachten, die triassische Abfolgen versetzen. Diese stehen wahrscheinlich im Zusammenhang mit der Genese dieser Salzstrukturen. Da die meisten dieser Störungen auch hangende Stockwerke versetzen, ist deren Anlage als posttriassisch einzustufen.

Bis auf das Umfeld einiger Salzmauern scheinen die Ablagerungen der Unterkreide ungestört zu sein. Entlang des Scheitels des langgestreckten Salzkissen Lilli zeigt sich ein komplexes Geflecht aus einer Vielzahl kleinerer Störungen, das sich ins Hangende baumartig verzweigt (**Abbildung 22**, Profil 2), jedoch die Unterkreideablagerungen entweder nicht, oder nur mit seismisch nicht aufzulösenden Sprunghöhen versetzt (**Abbildung 22**). Das Störungsgeflecht verzweigt sich, unbeeinflusst von der Mittel-Miozän Diskordanz, bis in das Neogen weiter. Daraus lässt sich schließen, dass die Salzstruktur Lilli sich vom Paläogen bis ins Neogen stetig gehoben hat, und dabei das zuvor beschriebene Scheitelstörungssystem entwickelt wurde (**Abbildung 22**, Profil 2).

Die Salzmauern Lollo und Lisa weisen ähnliche oder noch komplexere Störungssysteme in ihrem Scheitelbereich auf. Dabei zeigen die dargestellten Profile (**Abbildung 22**), dass entlang der Salzmauern eine sehr große strukturelle Variabilität vorhanden ist. So kann in einem Profil die Struktur noch einen deutlich ausgeprägten Scheitelgraben aufweisen, in einem parallel dazu verlaufenden Profil kann jedoch der Störungscharakter anders sein. Die hohe Variabilität der Störungen, deren Einfallen, die Versätze und ihre Lage im Bezug zur Salzstruktur lassen auf ein System aus eher kurzen und wenige Kilometer langen Störungssegmenten schließen. Diese sind ineinander verzahnt und weisen, abhängig von der Entwicklung der Salzstruktur, unterschiedliche Charakteristika auf. Ein deutlich „*flower structure*“-förmiger Aufbau des Störungsmusters oberhalb der Salzmauer Lisa (**Abbildung 22**, insbesondere in Profil 2) lässt, wie schon für die liegende Störungszone im Prä-Zechstein, eine Blattverschiebungskomponente vermuten.

Eine weitere Gruppe von Störungen zeichnet sich dadurch aus, dass diese Störungen auf Oberkreideablagerungen begrenzt sind (**Abbildung 22**, Profil 1 im Westen). Häufig handelt es sich dabei um eine Schar nahezu gleich einfallender Abschiebungen (**Abbildung 22**, Profil 1) oder um kleinere Gräben mit syn- und antithetischen Störungen (**Abbildung 22**, Profil 3 im Osten). Die Entstehung dieser Störungen ist ohne weitere Analyse nicht eindeutig zu bestimmen. Synsedimentäre Mächtigkeitsschwankungen der Oberkreideablagerungen in der Fallstudienregion deuten auf tektonische Aktivität zu dieser Zeit hin. Diese wurden vermutlich durch Bewegungen des Zechsteinsalzes hervorgerufen. Diese oberkretazischen Störungen könnten durch halotektonische Prozesse verursacht worden sein.

Die Interpretation der Profile lässt vermuten, dass durch spätkretazische Erosionsereignisse in Salzstrukturnähe die gesamte Unterkreide und Teile der Trias abgetragen worden sind. Es kann angenommen werden, dass die Salzstrukturen in der Fallstudienregion, mit Ausnahme

von Linda und Liane (**Abbildung 19**), eine jüngere Entstehungsgeschichte belegen als die Salzstrukturen in den östlich anschließenden Bereichen. Die keuperzeitlich entstandenen Salzmauern Linda und Liane werden von Unterkreideablagerungen bedeckt. Eine leichte Aufwölbung der Unterkreide im Top dieser Salzstrukturen belegt noch geringe Salzbewegungen in diesem Bereich während der Oberkreide.

Ein Teil der Störungen im unteren Paläogen des Fallstudiengebietes können nach Cartwright et al. (2003) auch nicht-tektonische Kompaktionsstrukturen darstellen. Diese sind auf überwiegend tonige Horizonte beschränkt und zeigen meist nur geringe Versätze.

Prominente Reflektoren in den neogenen Abfolgen deuten auf die Schüttungskörper eines nach WSW progradierenden Deltas hin. Deren Geometrie steht offensichtlich im Zusammenhang mit der Genese der Salzmauern Lollo und Lisa. In den Profilen sind in den neogenen Abfolgen außerdem Bereiche mit auffälliger seismischer Charakteristik durch eine Schraffur gekennzeichnet (siehe **Abbildung 22**, Profil 3 und 5). Dabei könnte es sich um quartäre Rinnen handeln. Andere tiefergehende Strukturen, die in den Profilen schraffiert dargestellt wurden, kommen als mögliche Aufstiegswegsamkeiten („chimneys“) für Fluide in Frage.

Die hoch auflösende Interpretation der seismischen Profile in der Fallstudienregion zeigt, dass im Umfeld von Diapiren ein teils sehr komplexes Störungsgeflecht ausgebildet ist. Daraus lässt sich schließen, dass, die in Kapitel 3.4 auf Basis der grobskaligen Modelle definierten und diapirbezogenen Fallensituationen, auch störungsgebunden sein können (kombinierter Fallentyp).

Es zeigt sich in Übereinstimmung mit den gröberskaligen Betrachtungen aus Kapitel 3.3, dass die Barrierekomplexe Oberer Buntsandstein und Unterkreide sowie der Speicherkomplex Mittlerer Buntsandstein über weite Flächen nur gering gestört sind. Somit wären diese für eine detailliertere Potenzialanalyse zu favorisieren. Durch die starke Segmentierung des Prä-Zechstein sind strukturelle Fallen dort eher an schmale, längsgestreckte und störungsgebundene Hochlagen gebunden (siehe Kapitel 4.2.8).

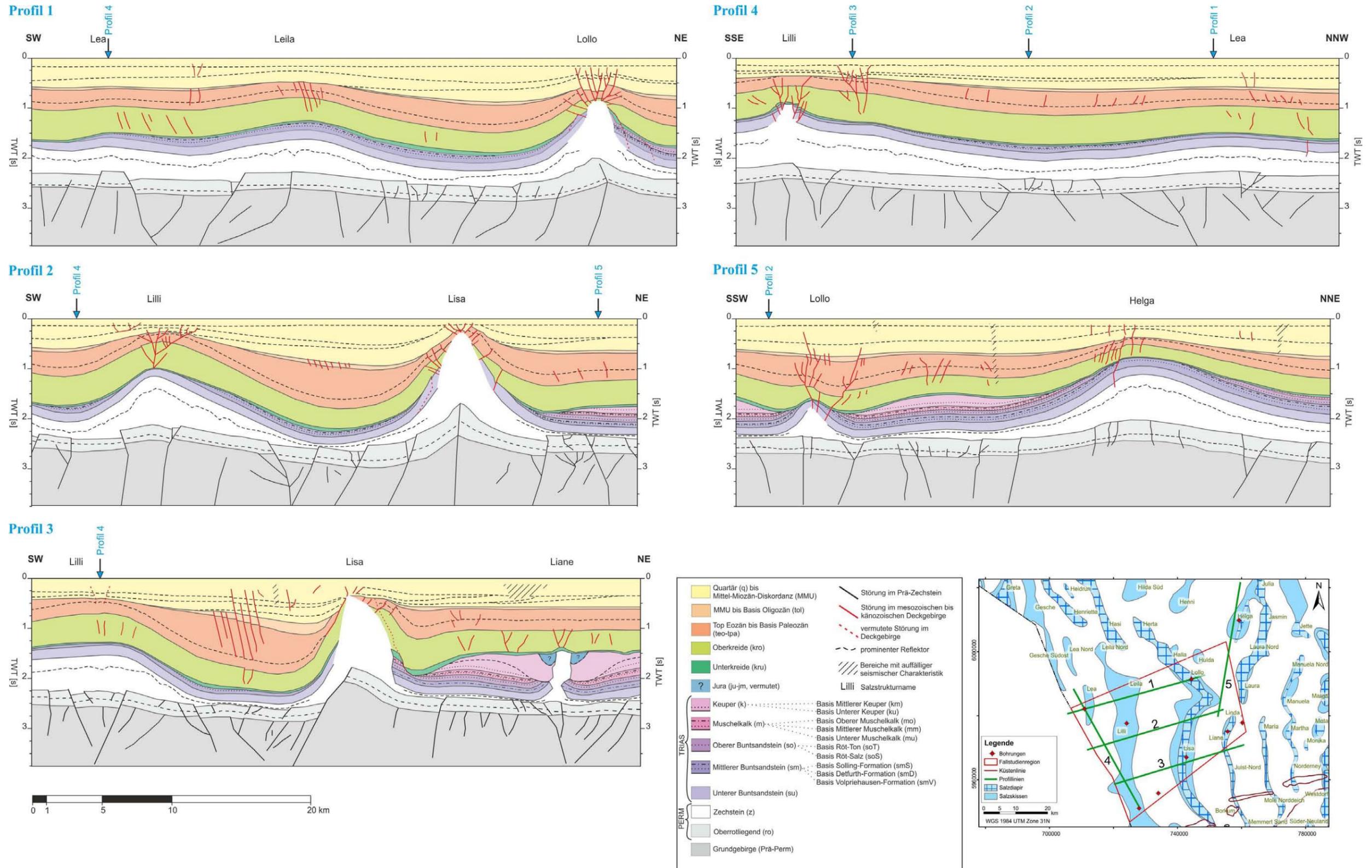


Abbildung 22: Profilschnitte (links 1 bis 3) senkrecht zum Streichen der Salzstrukturen und zwei Profilschnitte (4 & 5) quer dazu in etwa im Verlauf von Randsenken (rechts). Die Profilverläufe werden durch eine Übersichtskarte verdeutlicht (unten rechts, Salzstrukturen stammen aus Reinhold et al. 2008). Die Störungsdichte im Grundgebirge nimmt anscheinend nach Süden hin zu (Profil 3). Im Deckgebirge treten Störungen verstärkt im Bereich von Salzstrukturen auf. Häufig wechselnde Störungscharakteristika entlang des Verlaufes einiger Störungszonen im Grund- und Deckgebirge lassen für diese größere Blattverschiebungsanteile vermuten. Die Störung unter der Salzmauer Lisa (Profil 2 und 3) zeigt entlang ihres Verlaufes sowohl Blattverschiebungsanteile als auch große Abschiebungsversätze. Der Einfluss der Erosion an der Basis Unterkreide und entlang der Mittel-Miozän-Diskordanz auf den Strukturbau in der Fallstudienregion ist deutlich sichtbar. Mehrere Störungen in Profil 4 und 5 sind aufgrund von Anschnitteffekten nur mit einem scheinbaren Einfallen dargestellt.

4.2.3 Mächtigkeitsverteilung der stratigraphischen Einheiten

Signifikante Mächtigkeitschwankungen der Rotliegendablagerungen treten vor allem im Liegenden von Salzdiapiren des Zechstein auf (**Abbildung 23**). Diese könnten auch durch die Prozessierung und Tiefenwandlung der seismischen Daten und darauf basierenden Interpretationen in diesen Bereichen hervorgerufen worden sein („*velocity pull-up*“).

Die Mächtigkeit der Zechstein-Salinare schwankt aufgrund halokinetischer und halotektonischer Prozesse sehr stark. Die größten Mächtigkeiten werden in den Salzmauern Lisa und Lollo erreicht. Die geringsten Mächtigkeiten sind dagegen unterhalb von Randsenken vorhanden. Insbesondere östlich von Lisa und im Umfeld der Struktur Liane sind durch die Abwanderung des Zechstein-Salzes teilweise nur noch Mächtigkeiten < 50 m erhalten.

Die Mächtigkeit des Unteren Buntsandstein zeigt aufgrund der gleichmäßigen Beckensedimentation keine größeren Schwankungen (Jähne et al. 2013). Im äußersten Westen schneidet die Unterkreide-Diskordanz den Unteren Buntsandstein ab (**Abbildung 22**).

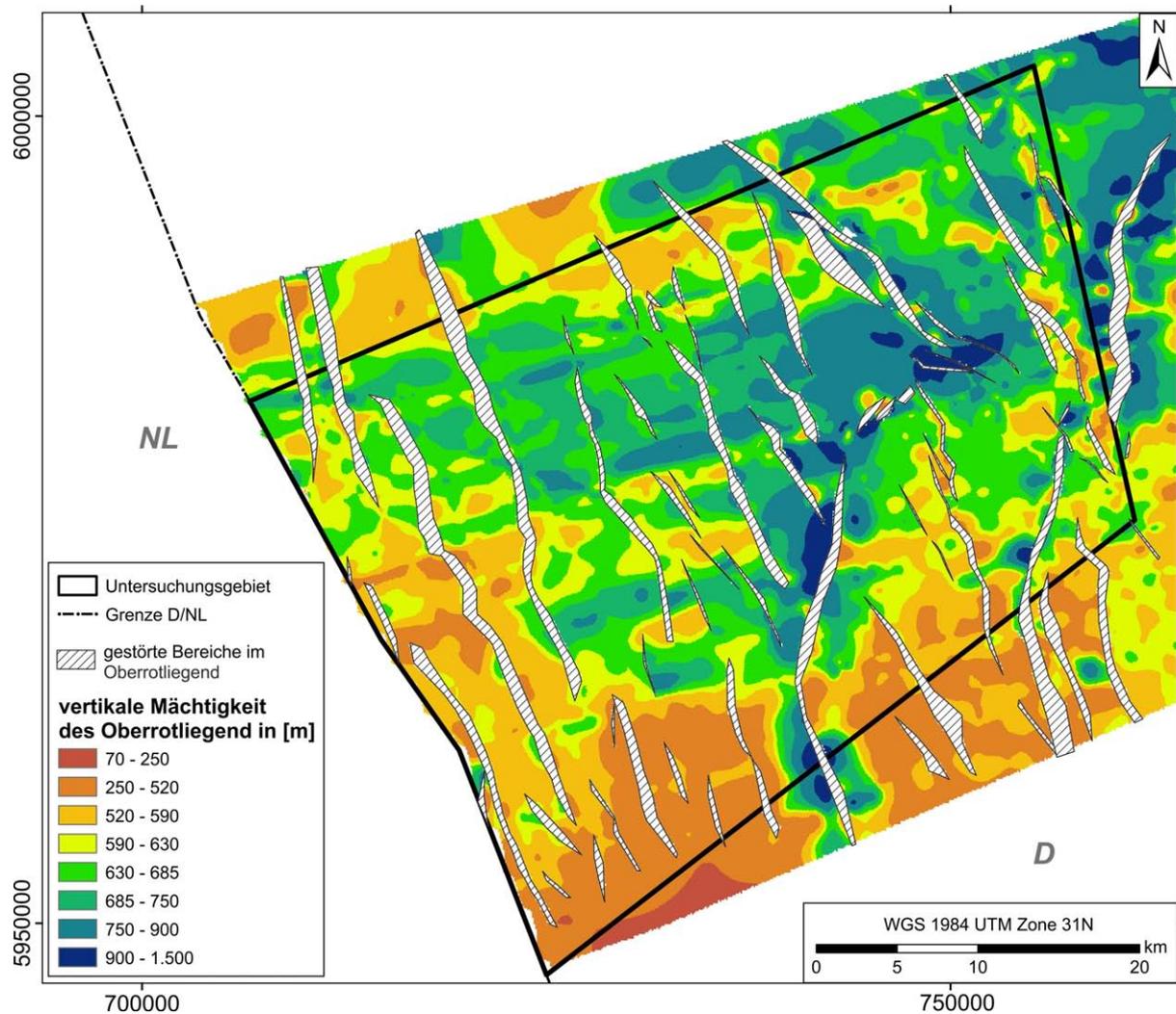


Abbildung 23: Vertikale Mächtigkeit des Speichercomplex Oberrotliegend.

Die Mächtigkeiten der Volpriehausen- und Deffurth-Formation (Mittlerer Buntsandstein) bleiben, bis auf die Hochlagen im Südwesten nahezu konstant. Dort wurden sie sowohl durch die H-Diskordanz (Solling-Diskordanz) als auch durch die Unterkreide-Diskordanz angeschnitten und lokal vollständig abgetragen. Die Solling-Formation ist zwar in den östlichen Randsenkenbereichen flächendeckend erhalten, ist aber, aufgrund des verstärkten Einschneidens der Unterkreide-Diskordanz, auf eine noch geringere Fläche beschränkt als die liegenden Formationen des Mittleren Buntsandstein.

Der Obere Buntsandstein konnte nach der seismischen Interpretation in Röt-Salz und Röt-Ton unterschieden werden. Beide Einheiten sind nur in den östlichen Randsenken vertreten. Dort ist ihre Mächtigkeit relativ konstant. Im Bereich der Salzmauern gibt es keine Hinweise auf Mächtigkeitsschwankungen des Röt, die auf eine Mobilisation des Röt-Salinars oder auf Intrusion des Zechstein-Salinars in den Röt schließen lassen (Kapitel 3.3.4).

Die Verbreitung des Muschelkalk und des Keuper beschränkt sich auf Randsenken in der östlichen Fallstudienregion. Der Untere Keuper zeigt deutliche Mächtigkeitsschwankungen, die auf beginnende Halokinese mit teils aktivem Diapirismus hindeuten. Damit einhergehend ist eine erhöhte Subsidenz, verbunden mit synkinematischen Ablagerungen, im Umfeld der Salzstruktur Liane zu beobachten. Vor allem im Keuper sind zudem deutliche Erosionsdiskordanzen erkennbar (**Abbildung 22**). Im Bereich der Salzmauer Liane besteht die Möglichkeit, dass in geringem Umfang auch unterjurassische Formationen erhalten sein könnten, was aber aufgrund fehlender Bohrdaten und unklarer seismischer Indizien nicht eindeutig belegt werden kann.

Halokinetische Prozesse führten während der Oberkreide zur Aufgliederung in Hebungs- und Senkungsgebiete und dadurch zu einem aktiven Relief mit daraus resultierenden Mächtigkeitsschwankungen. Paläogene Erosionsereignisse haben vermutlich Oberkreidesedimentgesteine im Bereich der Salzmauer Lisa teilweise abgetragen.

Die Mächtigkeit der paläogenen Sedimente variiert in der Fallstudienregion stark. Im Bereich von Randsenken treten die höchsten Mächtigkeiten auf, während am Top der Salzstrukturen durch die Erosion an der Mittel-Miozän-Diskordanz (MMU) die geringsten Mächtigkeiten vorkommen.

4.2.4 Quartäre Rinnen

Für den deutschen Nordsee-Sektor wurde bereits von Lutz et al. (2009) die räumliche Verteilung und Morphologie quartärer Rinnensysteme kartiert (**Abbildung 24**). Dabei konnten bis zu drei Generationen von Rinnen unterschieden werden. Die Rinnen sind bis zu 66 km lang, bis zu 8 km breit und können bis zu 400 m tief in neogene Sedimente eingeschnitten sein. Erosionsstrukturen deuten darauf hin, dass die Rinnen mehrfach teilweise erodiert und wieder verfüllt wurden. Das Entstehungsalter der Rinnen konnte bisher noch nicht genau eingegrenzt werden, wird aber als elsterzeitlich angesehen (Lutz et al. 2009).

In der Fallstudienregion wurden mehrere Rinnenstrukturen kartiert, die zum Teil mehrere Zehnerkilometer lang und bis zu 2 km breit sind. Im Rahmen von Potenzialanalysen und der Abschätzung der Barrierewirksamkeit von Horizonten muss der Einfluss dieser Strukturen berücksichtigt werden, da sie möglicherweise lokal Barrierekomplexe teilweise erodiert haben. Deutlich erkennbar sind Rinnen beispielsweise am Schnittpunkt von Profil 3 und 4 (**Abbildung 22**). Oberhalb des Salzkissens Lilli ist eine Rinne zu beobachten, die anscheinend entlang einer dort von NW nach SE verlaufenden Störungszone orientiert ist.

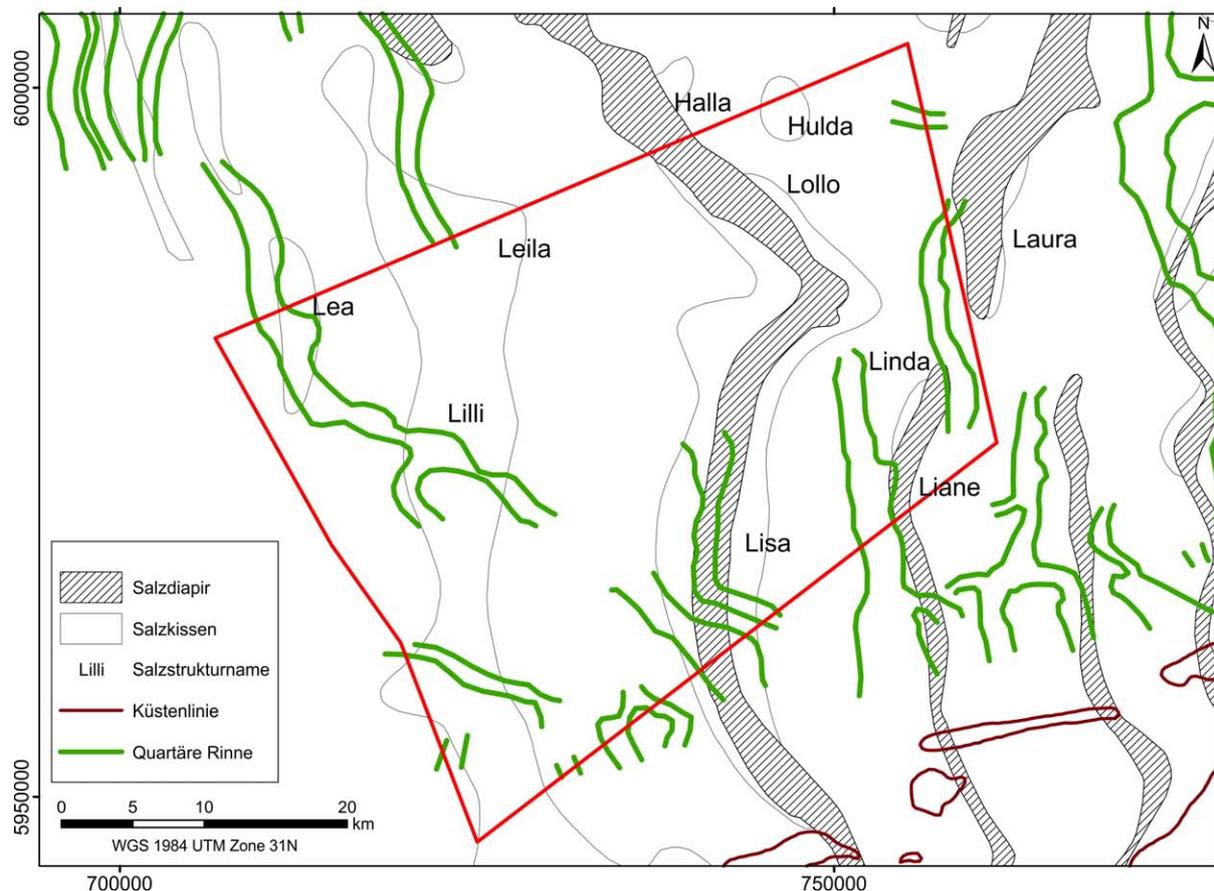


Abbildung 24: Quartäre Rinnensysteme im Bereich der Fallstudienregion nach Lutz et al. (2009).

4.2.5 Geologische Detailkarten

Die nachfolgenden Karten beschreiben die Verbreitung und Tiefenlage von 18 Horizonten auf Basis der seismischen Neukartierung, die mit der Software Schlumberger GeoFrame durchgeführt wurde. Diese Neukartierung basiert auf der Auswertung eines engmaschigen 2D-Seismiknetzes und zehn Tiefbohrungen. Danach erfolgte eine Tiefenwandlung, die sich methodisch an der des GTA orientiert (Jaritz et al. 1979, Groß 1986). Die seismischen Linieninterpretationen wurden mit Hilfe eines, in GeoFrame implementierten Gridding-Algorithmus, zu einem Grid mit einer Zellgröße von 100 x 100 m interpoliert beziehungsweise extrapoliert. Bei der Grid-Erstellung war es notwendig, die Gridding-Parameter anzupassen, um technische Artefakte in den Grids zu vermeiden. Dies erfolgte in Form einer Glättung von stark abweichenden Interpretationsergebnissen. Die Gridding-Parameter wurden in mehreren Testläufen so angepasst, dass ein Maximum des Detailgrades der Grids unter Vermeidung technischer Artefakte erreicht wurde. Aufgrund des verwendeten Gridding-Algorithmus wurden Bereiche (Gridzellen), in denen zu wenige Interpretationsdaten vorhanden waren, und dadurch zu große Unsicherheiten in der Interpolation und Extrapolation aufwiesen, mit Leerwerten geschrieben. Demzufolge zeigen die dargestellten Karten, insbesondere entlang der offshore-Grenze zu den Niederlanden, vereinzelt kleinere Lücken (u. a. Basis Paläogen **Abbildung 39**).

Zusätzlich zu der Neuinterpretation, der im GTA aufgeführten Horizonte, wurden weitere Horizonte der Trias und die Basis des Oberrotliegend untersucht und interpretiert. Zur Orientierung sind außerhalb der Fallstudienregion die Salzstrukturen nach Reinhold et al. (2008) dargestellt. Für den Buntsandstein in der Fallstudienregion existieren zusätzliche Informationen zur Lithologieverteilung (Wolf et al. 2014). Die Ergebnisse des entwickelten Lithofaziesmodells für den Buntsandstein im zentralen deutschen Nordsee-Sektor werden für die Fallstudienregion dargestellt. Die in den folgenden Abbildungen erkennbaren Unterschiede zwischen der Verbreitung der Sedimentgesteine der Lithofazieskarten (Wolf et al. 2014) und den neu erstellten Verbreitungs- und Tiefenlagekarten resultieren aus unterschiedlichen Datengrundlagen und Maßstäben, Generalisierungsschritten und modellierungsspezifischen Arbeitsschritten mit Schlumberger Petrel.

Oberrotliegend

Zu Beginn des Oberrotliegend II (sedimentäres Rotliegend) entwickelte sich das südperimische Becken. In diesem zusammenhängenden Sedimentationsraum entstanden im Bereich der zentralen deutschen Nordsee Schichtfolgen, die über größere Bereiche korrelierbar sind. Nach Stollhofen et al. (2008) werden für das sedimentäre Rotliegend in Norddeutschland vier wesentliche Faziesassoziationen unterschieden: fluviatile, limnische, äolische und Sabkha-Sedimente. Die vulkanoklastischen Ablagerungen des Unter- und Oberrotliegend I treten zurück. In Nordwestdeutschland wird das Oberrotliegend hauptsächlich in die Hannover-Formation eine Wechselfolge aus verschiedenen Salzgesteinslagen mit zwischengelagerten Tonsteinhorizonten und die, an der Basis oft grobklastische, Dethlingen-Formation untergliedert.

Das Oberrotliegend ist in der gesamten Fallstudienregion ausgebildet und wird durch ein überwiegend extensionales NNW-SSE verlaufendes Störungsmuster durchzogen, welches im Streichen deutlich vom Verlauf der hangenden Salzstrukturen abweicht. In der Fallstudienregion dominieren die Salzmauern Lisa und Lollo, bei denen die assoziierten Störungen auch einen verstärkten Blattverschiebungsanteil aufweisen. Zusätzlich treten hier die größten Schwankungen in der Tiefenlage auf. Innerhalb weniger Kilometer tritt eine Höhendifferenz von über 1000 Meter auf. Diese könnte auch durch Artefakte der Tiefenwandlung unterhalb

von Salzstrukturen hervorgerufen worden sein. Im Norden ist eine ENE-streichende Senke zu erkennen, die durch ein NNW-SSE streichendes Störungsmuster und durch ein damit verbundenes Horst- und Grabensystem segmentiert wird (**Abbildung 25**).

Die Mächtigkeit des Oberrotliegend variiert zwischen 70 und 1500 m (**Abbildung 23**). Dabei sind im Süden über einen größeren Bereich geringere Mächtigkeiten ausgebildet. Die größten Mächtigkeiten werden unterhalb der Salzmauern Lisa und Lollo erreicht. Diese großen Mächtigkeiten können unter anderem durch die Mobilisation von Rotliegendesalinenen und deren Abwanderung hin zu den Salzstrukturen erklärt werden.

Die zuvor erwähnte ENE-streichende Senkenstruktur, die sich von Norden bis zum Zentrum der Fallstudienregion erstreckt, ist in der Tiefenlagekarte der Basis des Oberrotliegend (**Abbildung 25**) und der Mächtigkeitsverteilungskarte des Oberrotliegend (**Abbildung 34**) deutlich erkennbar. Bei dieser Struktur handelt es sich wahrscheinlich um eine im Oberrotliegend aktive Grabenstruktur.

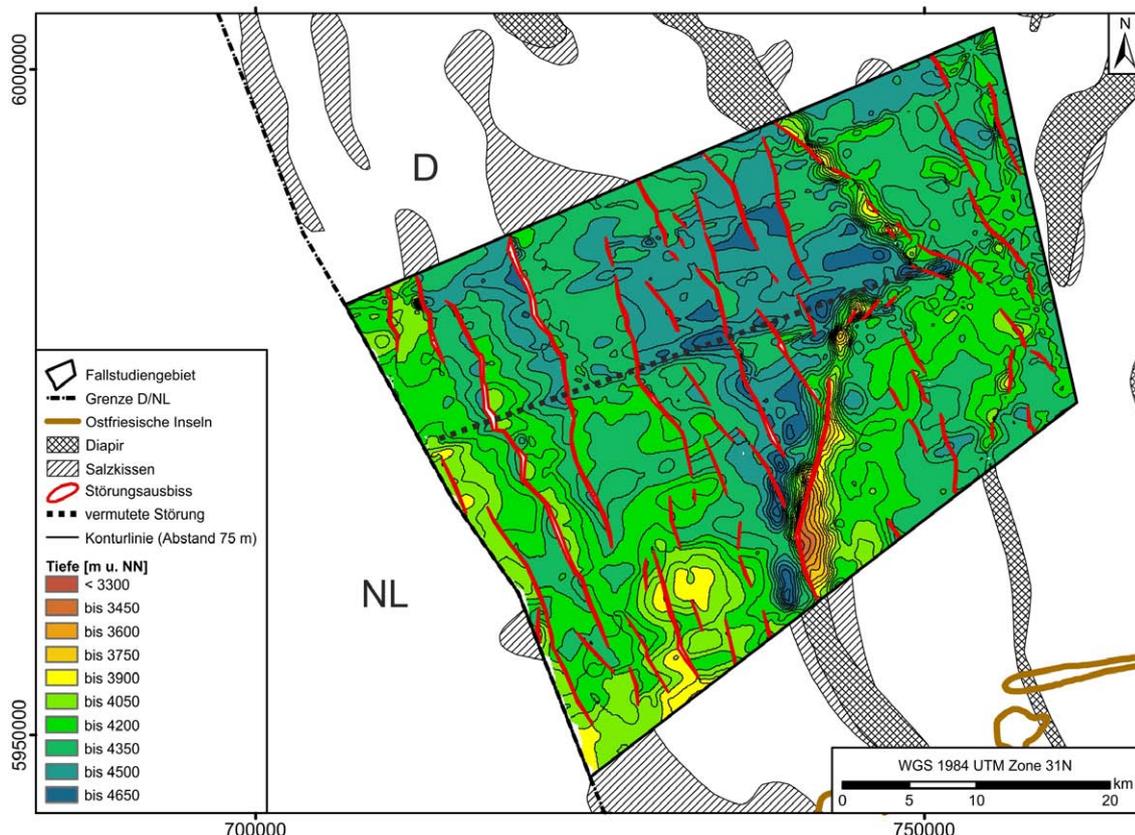


Abbildung 25: Tiefenlage und Verbreitung der Basis Oberrotliegend.

Zechstein

Die Sedimente des Zechstein entstanden durch wiederholte Meerestransgressionen, die zu zyklisch gegliederten Abfolgen zusammengefasst werden. Eine vollständige Abfolge besteht in der Regel aus basalen feinklastischen Sedimenten, überlagernden Karbonaten (z. B. Zechsteinkalk) und Evaporiten (Anhydrit, Steinsalz). Die älteren Zyklen werden zudem durch Tonsteinzwischenmittel getrennt (Baldschuhn et al. 1979, Bornemann et al. 2008). Auf der Basisfläche des Zechstein zeigen sich NNW-SSE streichende Störungsmuster ähnlich wie auf der des Oberrotliegend (**Abbildung 26**). Diese lassen sich jedoch meist nicht weiter bis in das Salinar verfolgen. Auffallend ist, dass sich die Diapire des Zechstein im Deckgebirge nur bedingt in ihrem Verlauf an die Orientierung des Störungsmusters im Prä-Zechstein annähern. Dies deutet auf die Entkopplung von Deformationsprozessen im mesozoisch-känozoischen Deckgebirge von denen im Prä-Zechstein hin.

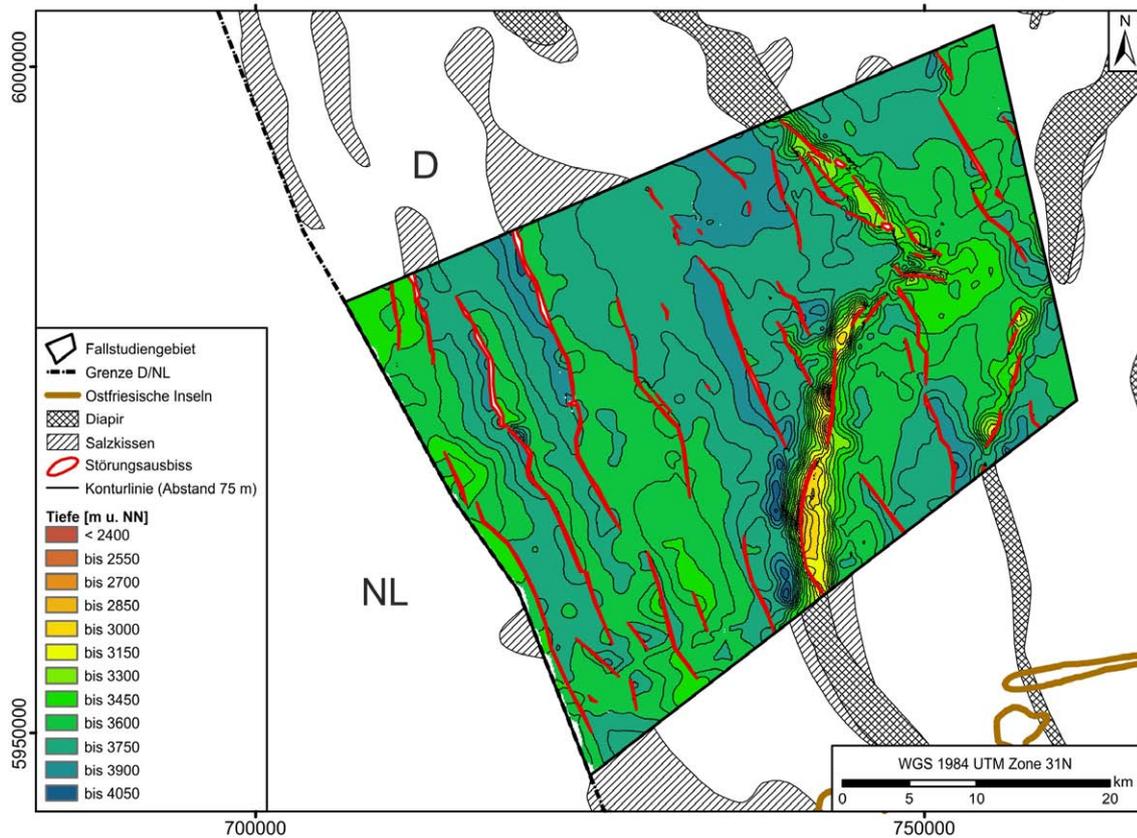


Abbildung 26: Tiefenlage und Verbreitung der Basis Zechstein.

Unterer Buntsandstein (su)

Die im Unteren Buntsandstein vorkommenden Gesteine bestehen nach Röhling (1988) und Wolf et al. (2014) vor allem aus „fining upward“-Sequenzen, die aus feinsandigen, siltigen und tonigen Playa-Sedimenten aufgebaut sind. Im Osten dominieren an der Basis Ton- und Siltsteine (**Abbildung 27**). Im Süden und Norden der Fallstudienregion stehen dagegen vorwiegend reine Tonsteine an. Im zentralen westlichen Bereich der Fallstudienregion sind Ton-, Silt-, sowie Feinsandsteine verbreitet, die von Wolf et al. (2014) nicht weiter differenziert und als feinklastisch-undifferenzierte Klasse zusammengefasst werden. Bereiche des Unteren Buntsandstein sind im östlichen Bereich aus Ton- und Siltsteinen aufgebaut. Im Westen ist die feinklastisch undifferenzierte Klasse weiter verbreitet als an der Basis des Unteren Buntsandstein. Nur im Nordwesten und Süden stehen reine Tonsteine an. Der Untere Buntsandstein ist in der Fallstudienregion weit verbreitet. Die Ablagerungen des Unteren Buntsandstein wurden von Salzstrukturen im südlichen und östlichen Bereich durchbrochen. Die größten Tiefenlagen werden im Süden im Bereich der Randsenken der Salzmauern Liane und Lisa erreicht (**Abbildung 28**).

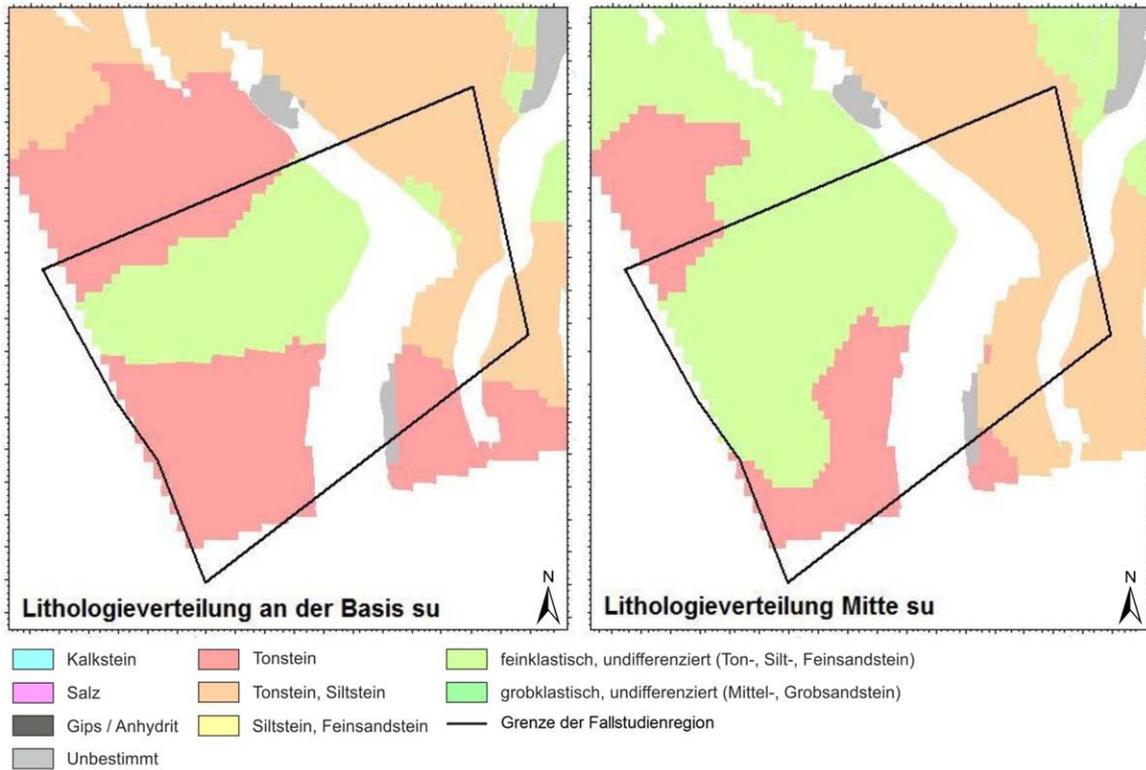


Abbildung 27: Lithologieverteilung an der Basis und im mittleren Bereich des Unteren Buntsandstein (Wolf et al. 2014).

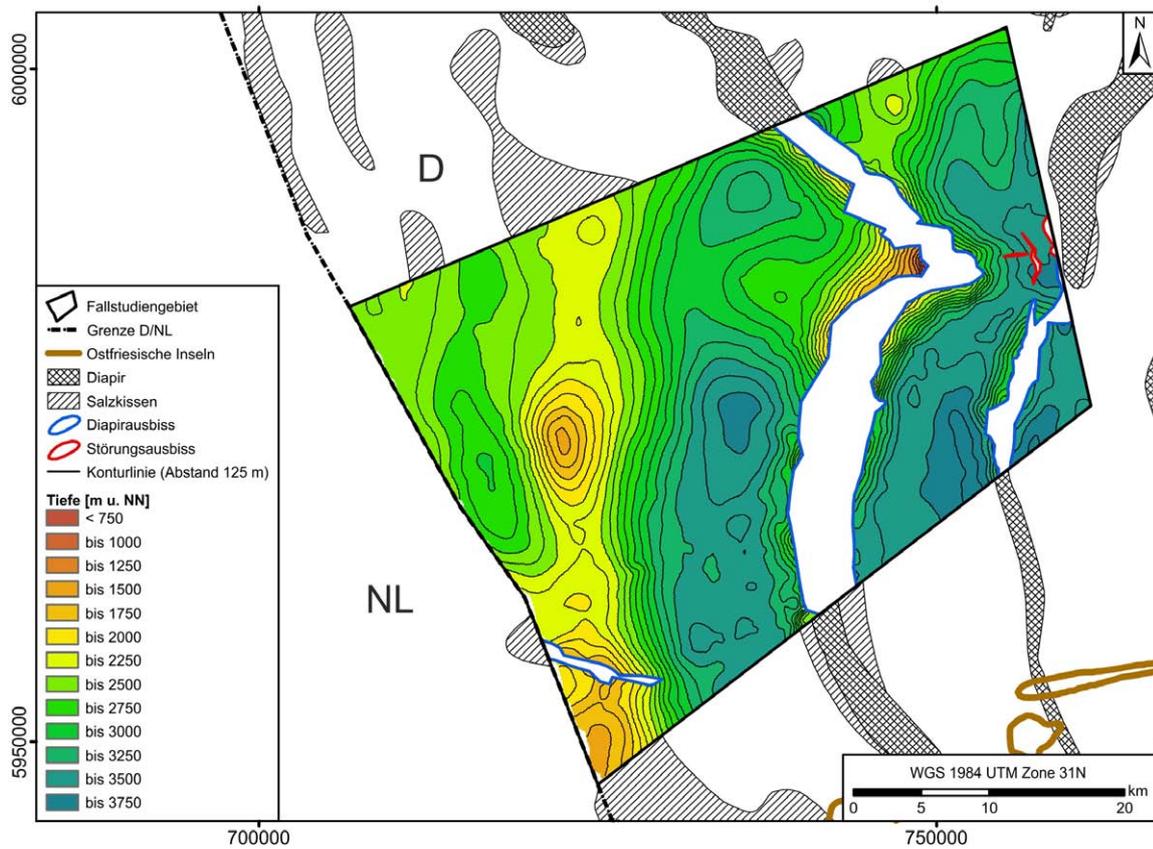


Abbildung 28: Tiefenlage und Verbreitung der Basis Unterer Buntsandstein.

Mittlerer Buntsandstein (sm)

Volpriehausen-Formation (smV)

Die Formation beginnt mit dem, zum Teil ooidführenden und karbonatischen, sogenannten Volpriehausen-Sandstein. Darüber folgt die Volpriehausen-Wechselfolge bestehend aus Sand- sowie Ton- und Siltsteinlagen (**Abbildung 29**), die in mehrere Kleinzyklen unterteilt werden kann. Im Süden und in der Mitte der Fallstudienregion stehen an der Basis der Formation Mittel- und Grobsandsteine an, die von Wolf et al. (2014) als grobklastisch undifferenzierte Klasse beschrieben werden. Nach Norden zeichnet sich ein Trend zu feineren Sedimenten ab. Dort sind Silt- und Feinsandsteine dominant verbreitet. Der gesamte Topbereich der Volpriehausen-Formation besteht aus Tonsteinen. Einzig im äußersten Westen stehen nach Wolf et al. (2014) noch lokal feinklastisch undifferenzierte Sedimentgesteine (Ton-/Silt-/Feinsandsteine) an. Die Volpriehausen-Formation ist in der westlichen Fallstudienregion fast annähernd flächendeckend verbreitet (**Abbildung 30**). Nur am Top des Salzkissens Lilli ist sie erodiert. Außerdem zeigt sich der Einfluss eines kleinen, nicht benannten Diapirs im Südwesten, der die Volpriehausen-Formation durchbricht. Im östlichen Teil der Fallstudienregion wird die Schichtenfolge durch weitere Diapire durchbrochen. Die Tiefenlage nimmt tendenziell von Nordwesten nach Südosten zu (**Abbildung 30**).

Detfurth-/Hardegsen-Formation (smD/smH)

Die Basis der Detfurth-/Hardegsen-Formation ist in der Fallstudienregion durch die hangende H-Diskordanz teilweise (**Abbildung 4**), im Süden der Fallstudienregion sogar komplett erodiert. Nach Wolf et al. (2014) stehen im zentralen östlichen Teil der Fallstudienregion Ton- und Siltsteine an, nördlich davon Silt- und Feinsandsteine sowie nordwestlich davon Mittel- und Grobsandsteine (grobklastisch undifferenzierte Klasse). Im westlichen zentralen Bereich treten feinklastisch undifferenzierte Sedimente (Ton-/Silt-/Feinsandsteine) auf, nördlich davon grobklastisch undifferenzierte Sedimente (Mittel- und Grobsandsteine).

Das Top der Detfurth-/Hardegsen-Formation ist in der Fallstudienregion weitaus stärker durch Erosionsereignisse beeinflusst als die Basis. Im Westen treten nur lokal Reste der Lithologiekategorie Silt- und Tonstein auf. Im Nordosten sind Ton- und Siltsteine verbreitet. Südlich davon ist, lokal begrenzt, ein Rest von grobklastisch undifferenzierten Sedimenten (Mittel- und Grobsandsteine) erhalten (**Abbildung 31**).

Im südlichen Teil der Fallstudienregion und entlang von Salzstrukturen ist die Detfurth/Hardegsen-Formation nicht verbreitet. Das kann zum einen durch die H-Diskordanz und zum anderen durch weitere Erosionsereignisse im Zeitraum vom Mitteljura bis zur Unterkreide erklärt werden. Die Tiefenlage nimmt generell von Nordwesten nach Südosten zu (**Abbildung 32**).

Solling-Formation (smS)

Nach Wolf et al. (2014) sind im zentralen Teil der Fallstudienregion nur noch lokal feinklastisch undifferenzierte (Ton-/Silt-/Feinsandsteine) Sedimente und im Westen Silt- und Feinsandsteine erhalten. Im Südosten kommen feinklastisch undifferenzierte (Ton-/Silt-/Feinsandsteine) Sedimente und im Norden Tonsteine vor. Die obere Solling-Formation wird durch die Unterkreide-Diskordanz angeschnitten und ist deshalb nur lokal verbreitet. Im Westen und Südosten sind nur noch lokal feinklastisch undifferenzierte Sedimentgesteine (Ton-/Silt-/Feinsandsteine) erhalten. Im Nordosten treten Ton- und Siltsteine auf (**Abbildung 33**). Die Tiefenlage nimmt generell von Nordwesten nach Südosten zu (**Abbildung 34**). In der südwestlichen Fallstudienregion sind keine Ablagerungen der Solling-Formation nachweisbar.

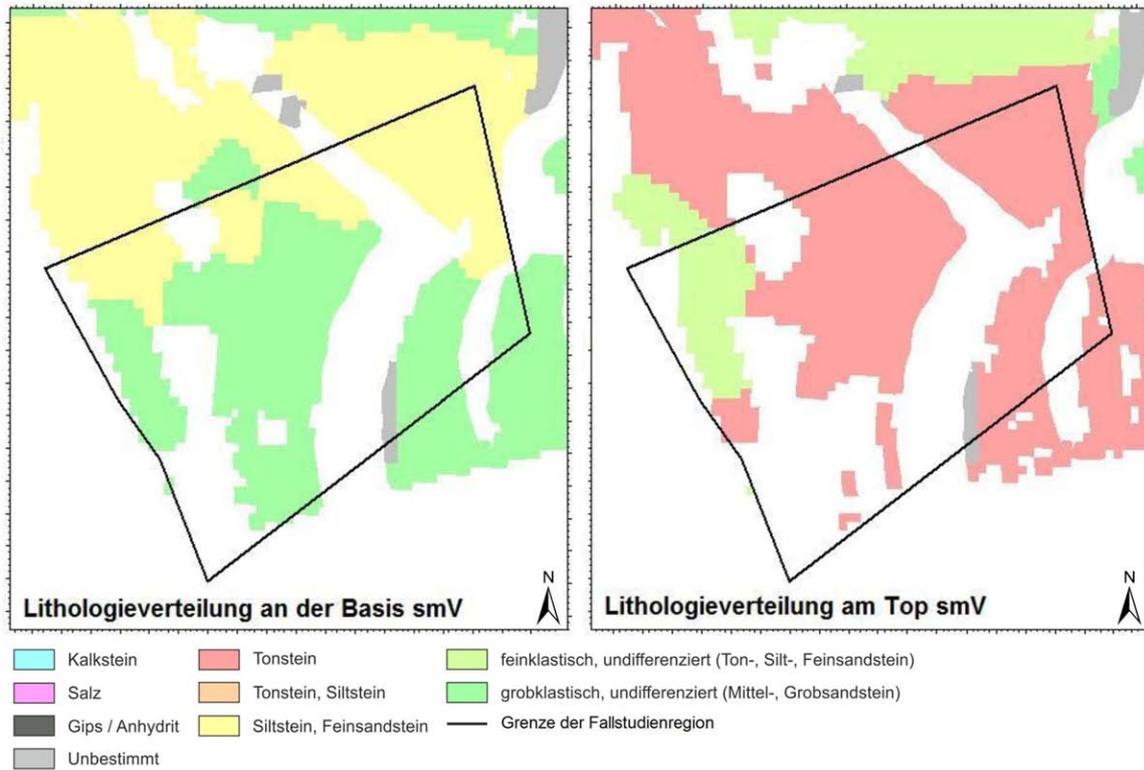


Abbildung 29: Lithologieverteilung der Volpriehausen-Formation in der Fallstudienregion.

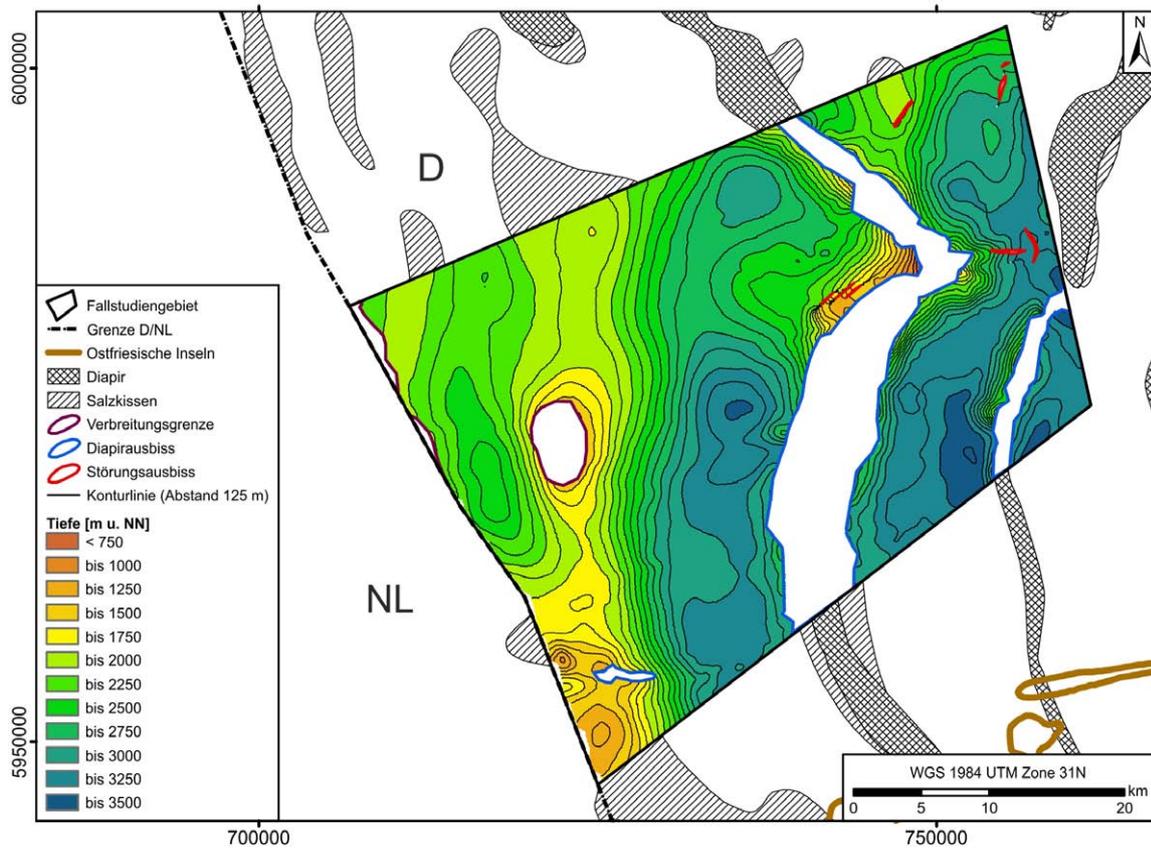


Abbildung 30: Tiefenlage und Verbreitung der Basis Volpriehausen-Formation.

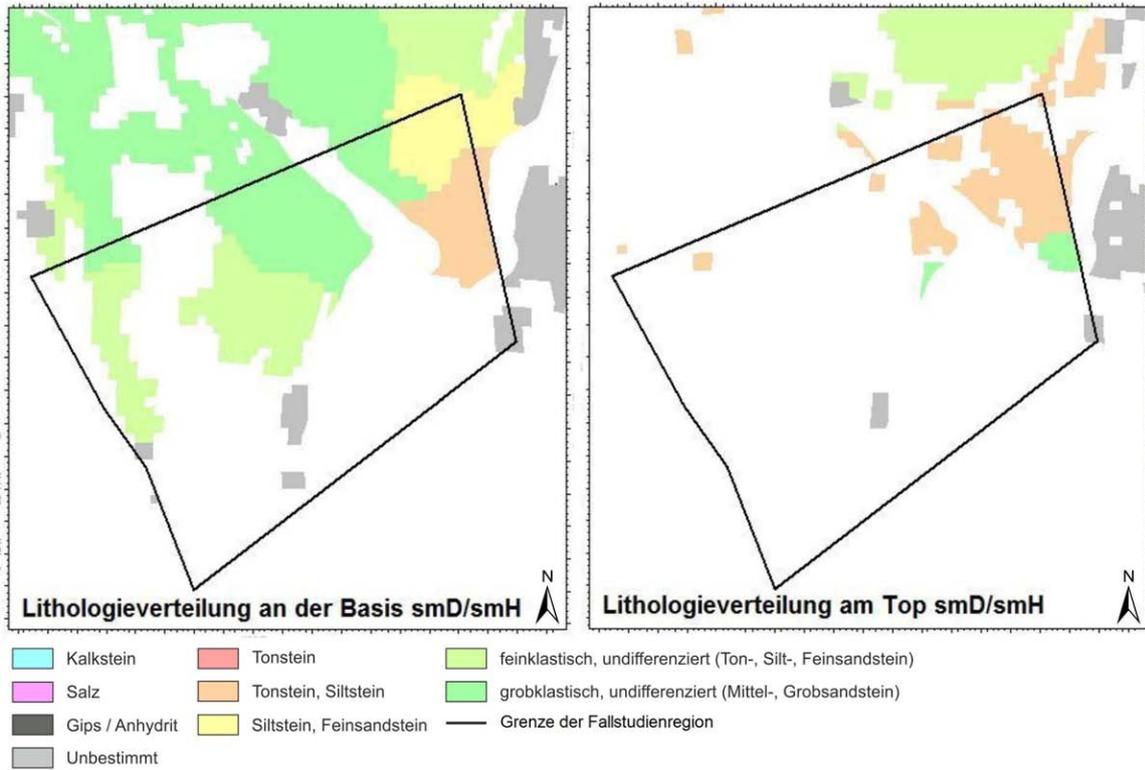


Abbildung 31: Lithologieverteilung der Detfurth/Hardeggen-Formation.

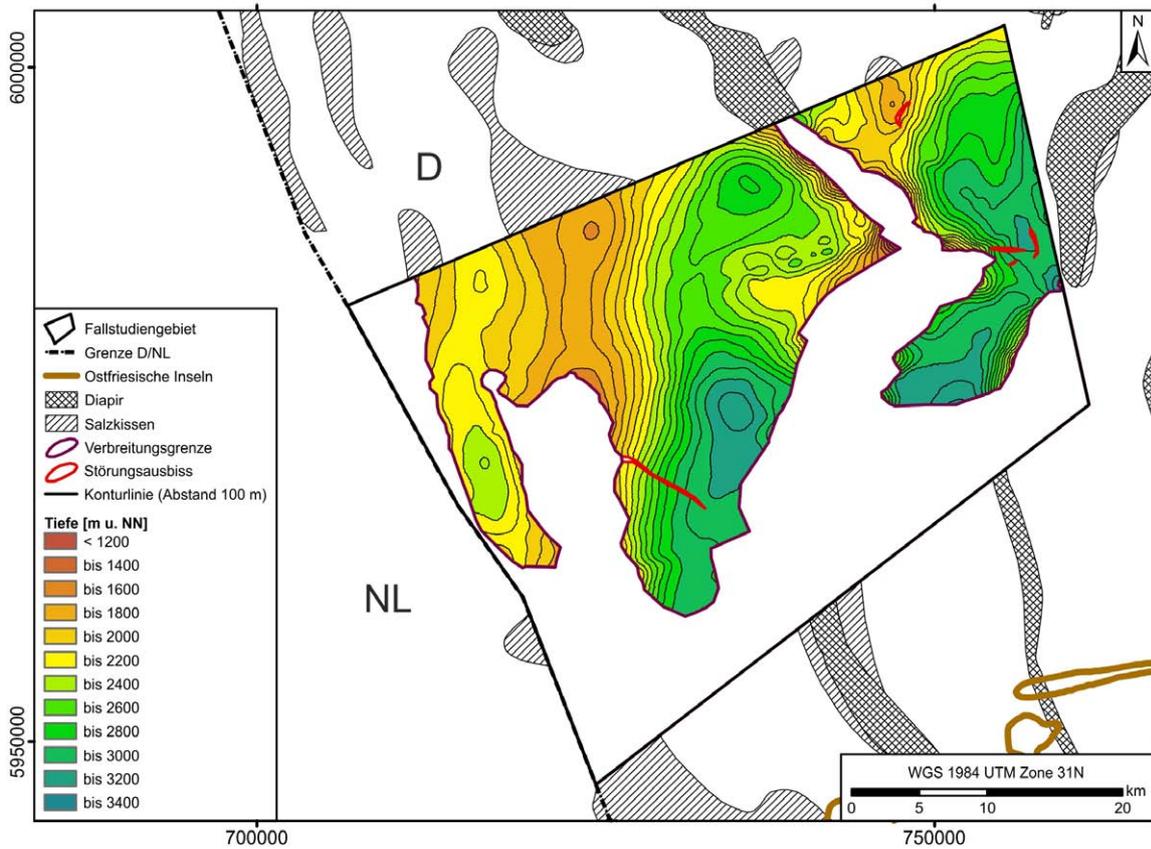


Abbildung 32: Tiefenlage und Verbreitung der Basis Detfurth/Hardeggen-Formation.

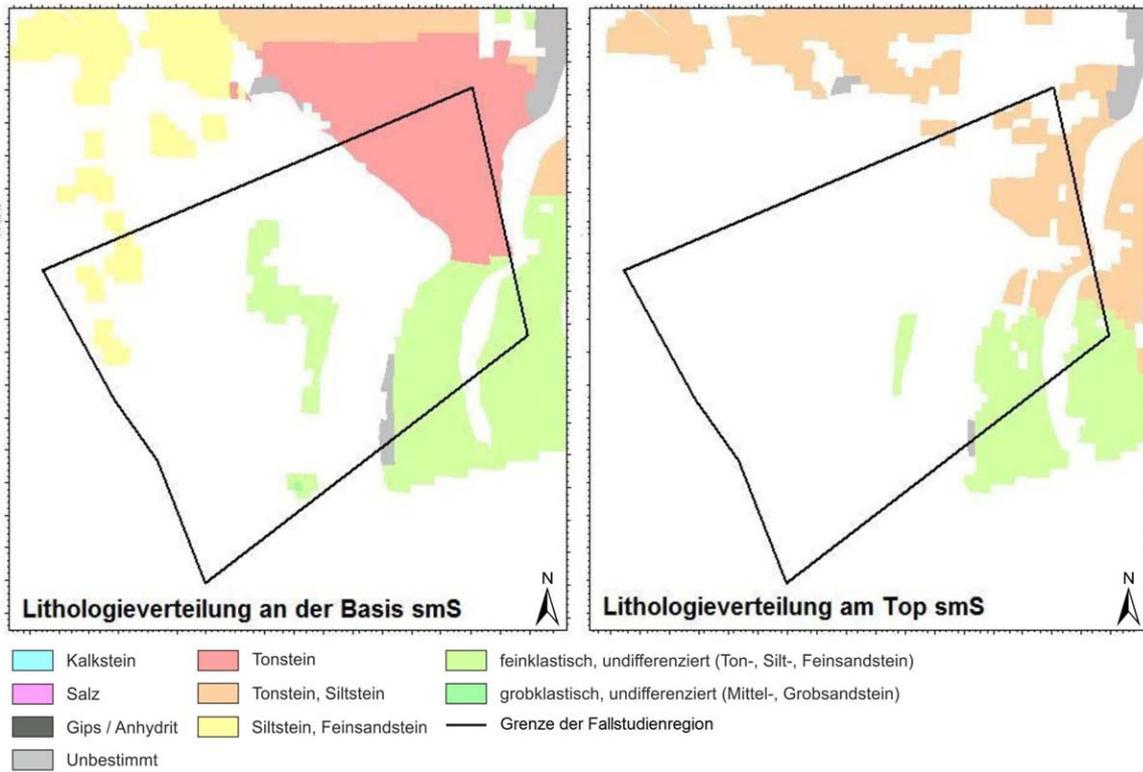


Abbildung 33: Lithologieverteilung an der Basis und am Top der Solling-Formation.

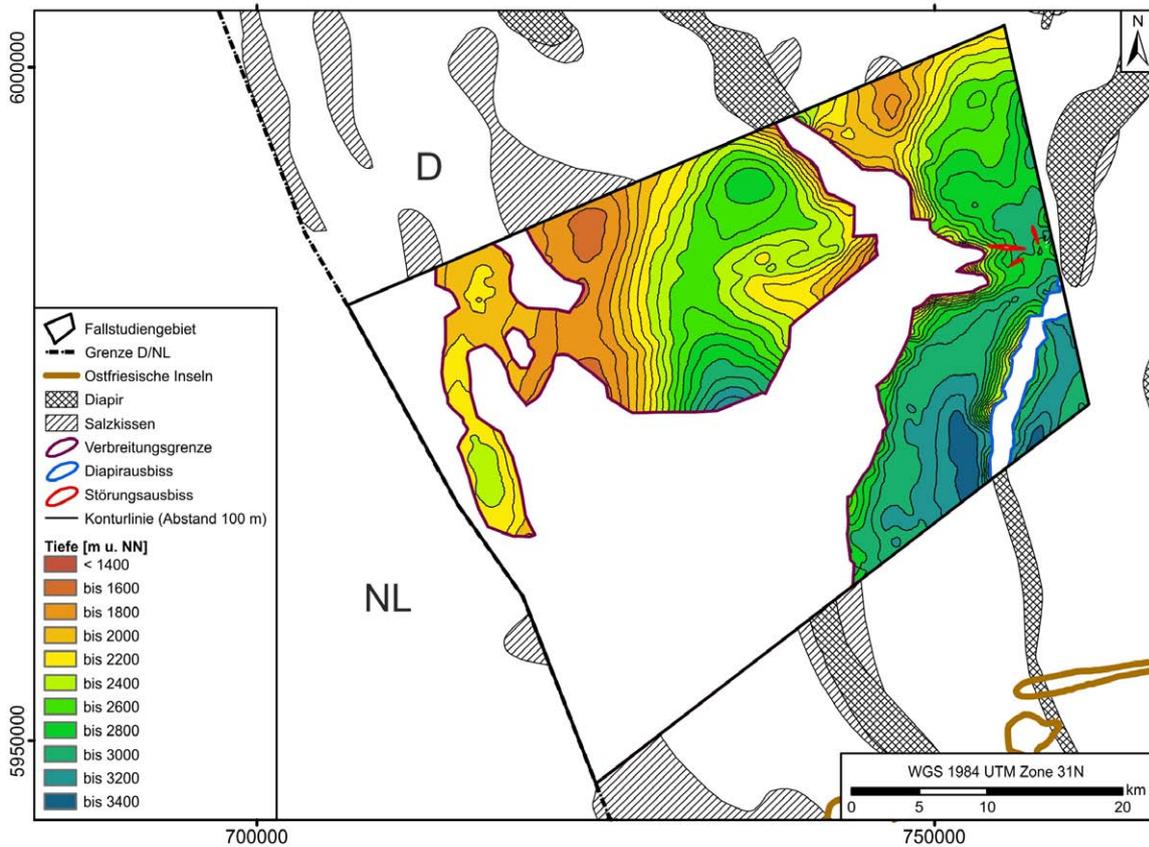


Abbildung 34: Tiefenlage und Verbreitung der Basis Solling-Formation.

Oberer Buntsandstein (so)

Röt-Salz (soS)

Durch eine marine Ingression aus Osten ändert sich zu Beginn des Oberen Buntsandstein die Fazies. Es dominieren Anhydrit und Steinsalz, die durch Ton- und Siltsteinen sowie vereinzelt Dolomiten in zwei größere Komplexe unterteilt werden (das Obere und das Untere Röt-salinar). In der Fallstudienregion sind im Westen durch Erosion (Unterkreide-Diskordanz) keine Ablagerungen des Röt erhalten. Nach Osten ändert sich die lithologische Ausprägung von Steinsalz an der Basis zu vorwiegend Gips/Anhydrit am Top (**Abbildung 35**, Wolf et al. 2014). Das Röt-salinar ist im östlichen Teil der Fallstudienregion nur im Bereich der Randsenken von Salzstrukturen anzutreffen. Die Tiefenlage nimmt generell von Norden nach Süden zu (**Abbildung 36**).

Röt-Ton (soT)

Mit fortschreitender Transgression dominieren während des Oberen Buntsandstein, im Gegensatz zum Röt-Salz, Ton-, Silt- und Feinsandsteine mit vereinzelt Anhydrit-, Kalkstein- oder Dolomitlagen (Wolf et al. 2014). Westlich der Salzmauern Lollo und Lisa sind keine Gesteine des Röt-Ton erhalten. Östlich davon kommen überall in der Fallstudienregion Tonsteine vor, die zum Top hin teilweise in Ton- und Siltsteinen übergehen (**Abbildung 37**). Die Ablagerungen des Röt-Ton sind nur im östlichen Teil der Fallstudienregion im Bereich von Randsenken anzutreffen. Die Tiefenlage nimmt von Norden nach Süden zu (**Abbildung 38**).

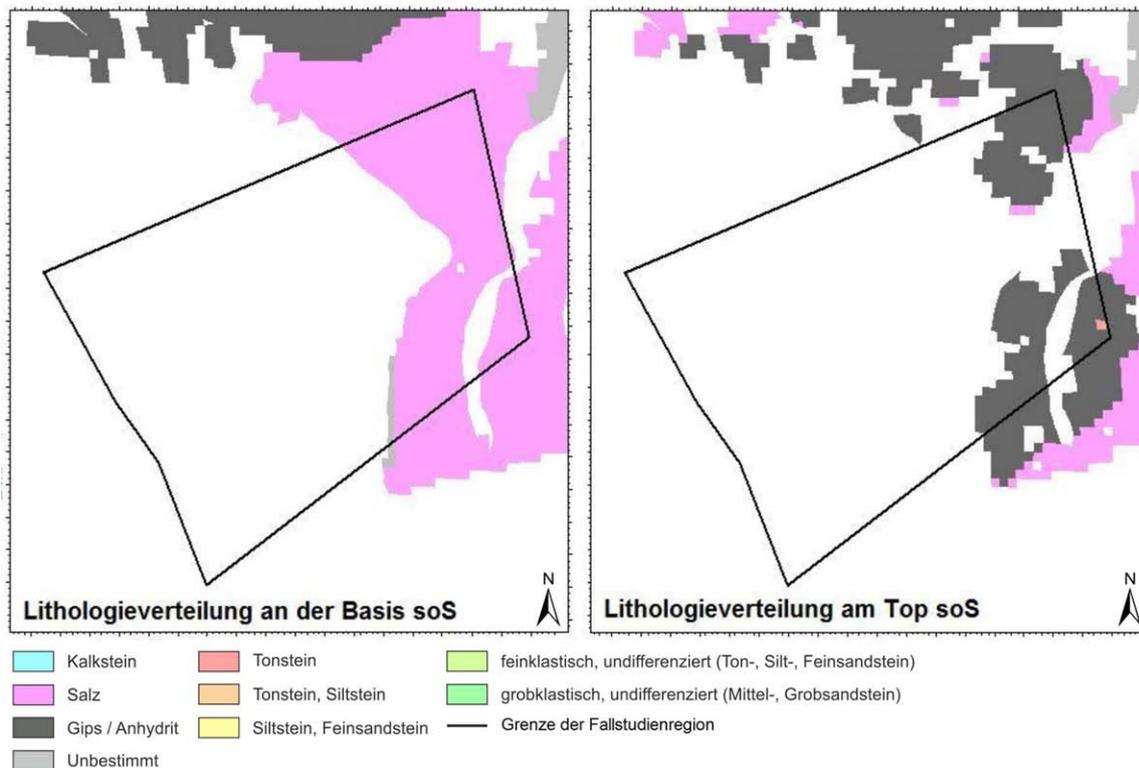


Abbildung 35: Lithologieverteilung des Röt-Salz.

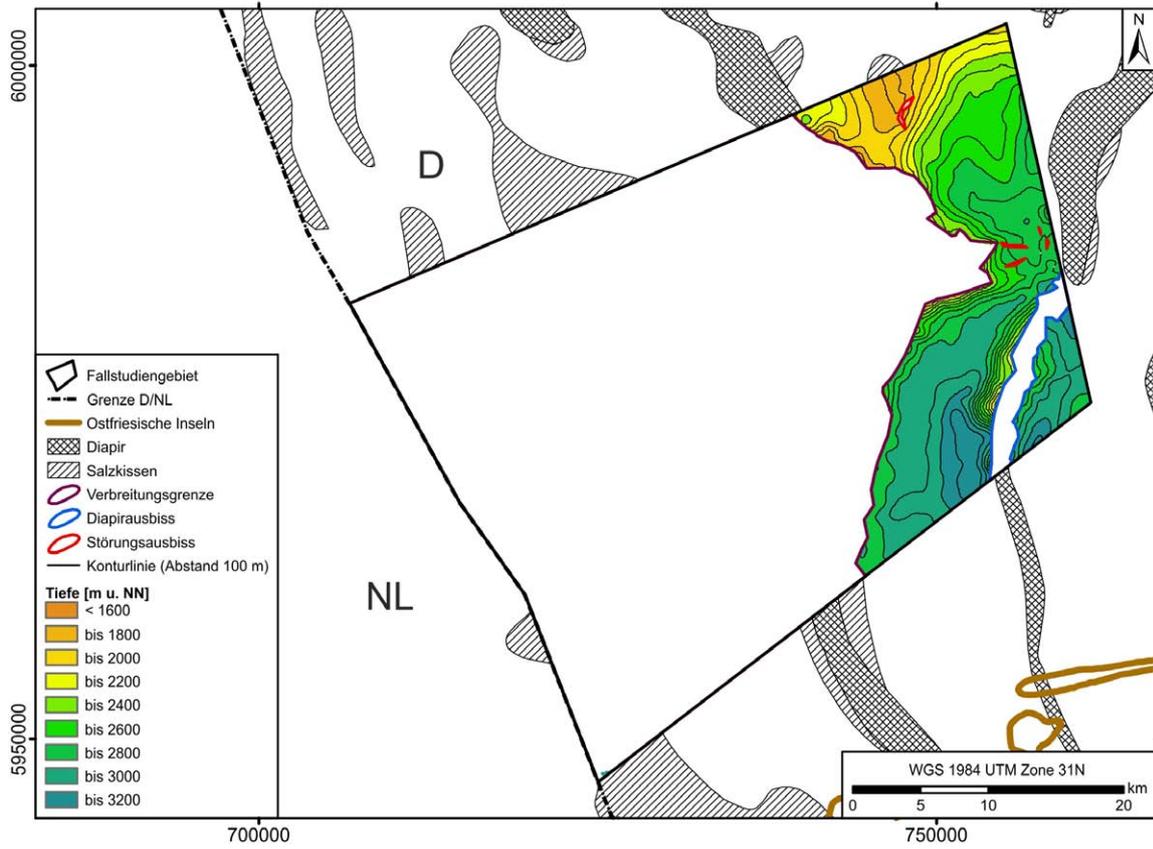


Abbildung 36: Tiefenlage und Verbreitung der Basis Röt-Salz.

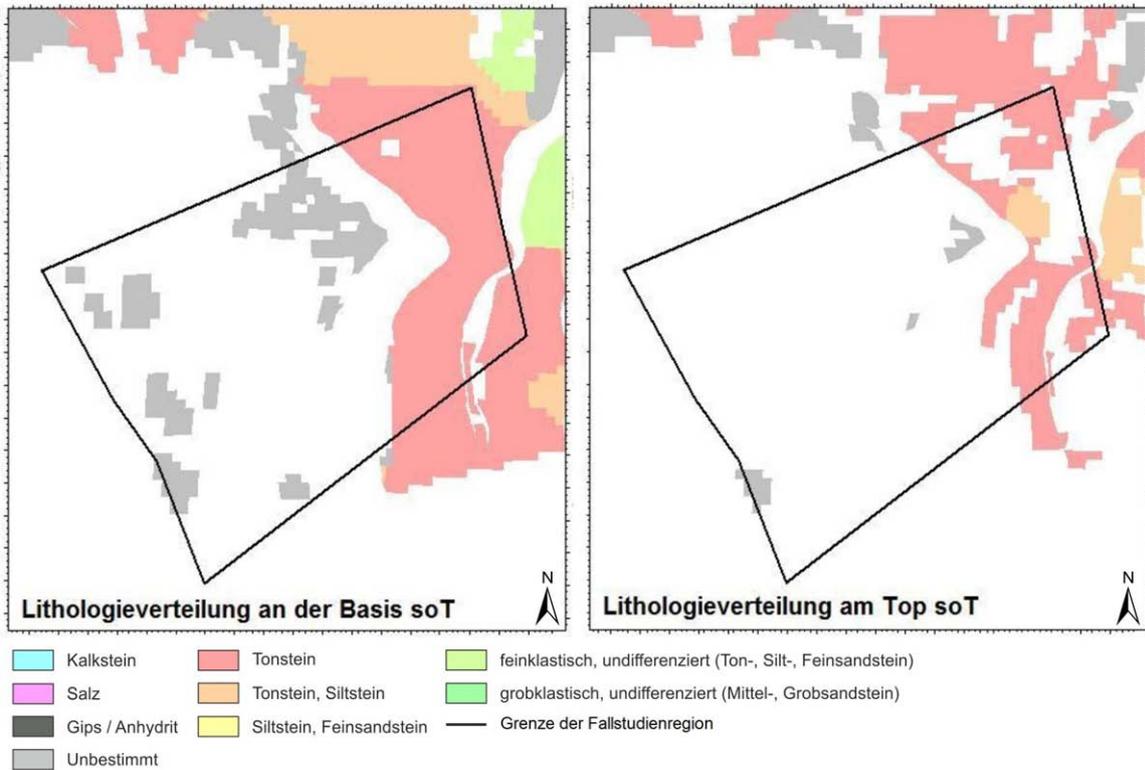


Abbildung 37: Lithologieverteilung des Röt-Ton.

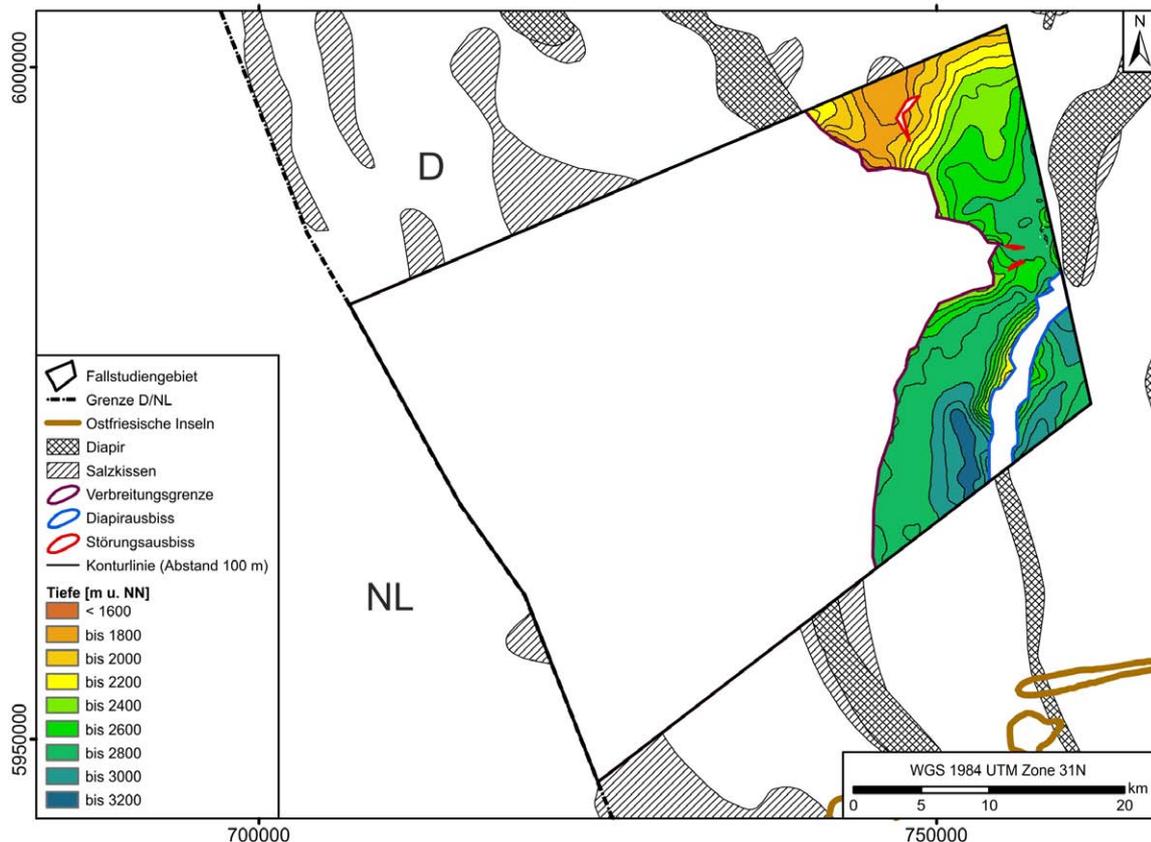


Abbildung 38: Tiefenlage und Verbreitung der Basis Röt-Ton.

Muschelkalk bis Oligozän

In der Fallstudienregion hat die Erosion an der Basis der Unterkreide (Unterkreide-Diskordanz) einen großen Einfluss auf die Erhaltung der älteren Sedimente. Die Verbreitung des Muschelkalk bis Mittlerer Keuper beschränkt sich auf Randsenken im östlichen Teil der Fallstudienregion. Im Westen wurden sie vollständig erodiert. Die Tiefenlage nimmt tendenziell von Norden nach Süden zu. Dabei wird vor allem der Mittlere Keuper durch synsedimentäre Salzbewegungen in seiner Mächtigkeit beeinflusst (**Abbildung 22**).

Die Gesteine des Rhätkeuper und Jura sind in der gesamten Fallstudienregion nicht kartierbar, da sie durch die Erosion an der Basis der Unterkreide größtenteils abgetragen wurden. Es ist nicht auszuschließen, dass sich in den Randsenken der Salzstrukturen Linda und Liane (**Abbildung 22**) noch Reste dieser Gesteine befinden. Diese sind aber mit den zur Verfügung stehenden Daten nicht eindeutig zu identifizieren. Die Gesteine der Kreide und des Paläozän/Eozän sind in der Fallstudienregion weit verbreitet. Nur im östlichen Abschnitt sind sie im Top von Salzdiapiren nicht mehr erhalten. Strukturelle Hochlagen sind vor allem oberhalb der westlich gelegenen Salzkissen und entlang der zentral verlaufenden Salzmauern Lisa und Lollo zu finden, während die größten Tiefen in den südlichen Randsenkenbereichen entlang dieser Salzmauern erreicht werden (**Abbildung 39**). Die Verbreitung der Gesteine nimmt tendenziell zum Hangenden hin zu. So sind die Verbreitungslücken oberhalb von Salzdiapiren an der Basis Paläogen deutlich kleiner als die Lücken in der Kreide. Die Gesteine des Oligozän sind im Bereich struktureller Hochlagen aufgrund von Erosionsereignissen an der Mittel-Miozän-Diskordanz nicht mehr erhalten (**Abbildung 39**). Die Tiefenverteilung orientiert sich an der Tiefenverteilung liegender Einheiten. Die größte Tiefe wird in den südlich gelegenen Randsenken der Salzmauer Lisa erreicht.

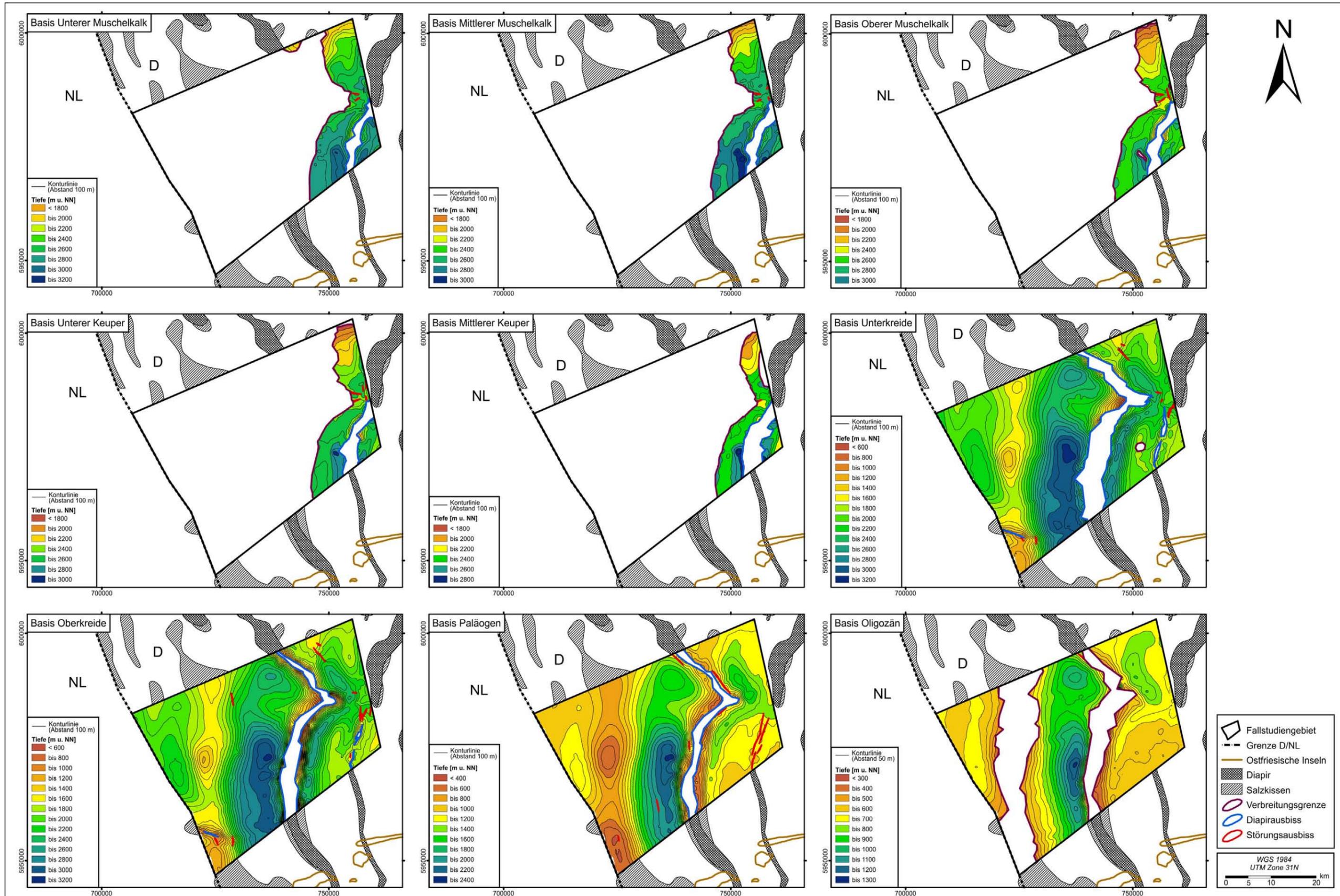


Abbildung 39: Tiefenlage und Verbreitung der Basisflächen stratigraphischer Einheiten vom Unteren Muschelkalk bis zum Oligozän.

Mittel-Miozän-Diskordanz (MMU)

Die Mittel-Miozän-Diskordanz als jüngster kartierter seismischer Horizont ist in der Fallstudienregion flächendeckend verbreitet. Im Bereich der Salzmauern Lisa und Lollo sind deutliche Onlaps und Einflüsse auf die Geometrie der Schüttungskörper zu sehen. Dieser Bereich ist zusätzlich stark gestört (**Abbildung 40**).

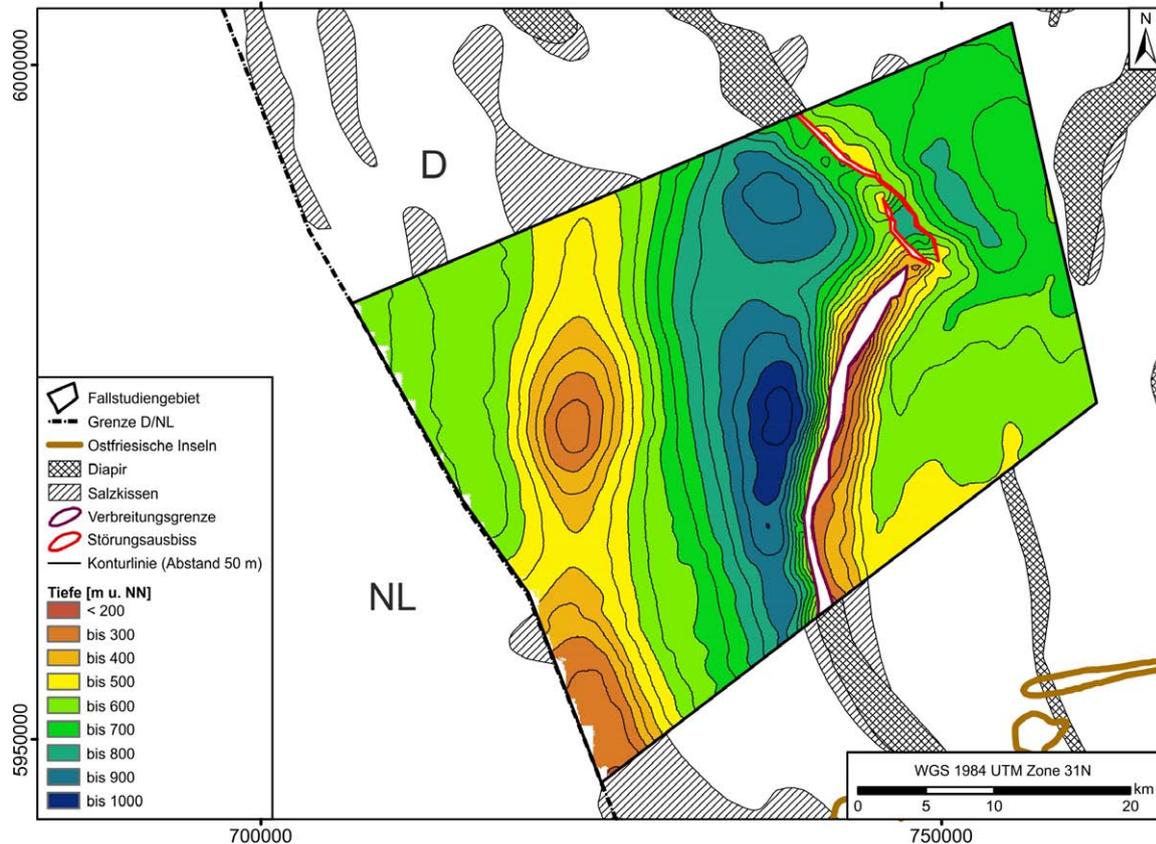


Abbildung 40: Tiefenlage und Verbreitung der Mittel-Miozän-Diskordanz.

4.2.6 Vergleich der Neukartierung mit dem GTA

Im nachfolgenden Kapitel werden die seismische Neukartierung und die Strukturinterpretation des Geotektonischen Atlas von Nordwestdeutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor (GTA) miteinander verglichen. Im Vergleich zum GTA beinhaltet die durchgeführte seismische Neukartierung zusätzliche Daten neueren Datums.

In den folgenden Vergleichskarten wird die Tiefenlage der jeweiligen Horizontbasis durch farbliche Abstufungen gekennzeichnet. Neben der Tiefenlage der jeweiligen Horizonte zeigen die Karten auch die Verbreitungsgrenzen der kartierten Formationen und die wesentlichen Salzstrukturen (vgl. **Abbildung 19**). Zur besseren Übersicht und Hervorhebung der Unterschiede werden beide Datensätze mit identischer Skalierung und Farbkennzeichnung gegenübergestellt.

Ein wesentlicher Unterschied beider Werke ist die Darstellung von Störungen. Während im GTA die Störungsausbisse zu einem Linear generalisiert wurden, weist die seismische Neuinterpretation eine Projektion der Störungsfläche mit dem jeweiligen Liegend- und Hangendabriss auf. Diese Art der Darstellung erlaubt weitere Störungsattribute (z. B. Sprunghöhe, Inklination, Horizontalversatz) aus der Kartenansicht zu entnehmen.

Der Vergleich der auf Basis des GTA erstellten Tiefenlinienkarten mit der seismischen Neukartierung zeigt eine große Übereinstimmung in der Interpretation des Strukturbaus der Fallstudienregion. In Bezug auf kleinräumige Variationen vor allem im Bereich der Salzstrukturen

und deren Randsenken sowie kleinräumigen Störungsstrukturen, weist die Neukartierung jedoch einen höheren Detaillierungsgrad auf.

Oberrotliegend

Deutliche Abweichungen in der Tiefenlage der Basis Oberrotliegend zeigen sich vor allem entlang der Salzmauern Lisa und Lollo (**Abbildung 41**). Im Bereich der südöstlichen Flanke von Lisa sind Differenzen von über 700 m zu beobachten. Weitere geringere Abweichungen befinden sich im südwestlichen Teil der Fallstudienregion auf der L-Plattform.

Während die älteren Daten eine deutlichere SSW-NNE gerichtete Zunahme der Tiefenlage mit zwei Maxima an der nördlichen Grenze der Fallstudienregion zeigen, deuten die Ergebnisse der Fallstudie auf eine im zentralen Untersuchungsgebiet gelegene Senke hin (**Abbildung 41**). Die Geometrie der zentralen Senke deutet auf eine ENE-verlaufende Störung entlang ihres südlichen Randes hin. Auf Basis der vorliegenden Daten kann jedoch nicht gänzlich ausgeschlossen werden, dass die bevorzugte ENE-Orientierung auch ein Artefakt der Interpretation seismischer Daten mit unterschiedlicher Auflösung sein kann (siehe auch Kapitel 4.2.2).

Als Hauptursache für die genannten Unterschiede können eine stärkere Generalisierung der GTA-Daten im Vergleich zur seismischen Neukartierung und die unterschiedlichen technischen Ansätze bei der Erstellung der Karten angenommen werden. Für Bereiche unterhalb von Salzstrukturen können Faktoren wie beispielsweise eine unscharfe seismische Datelage und/oder Unsicherheiten in der Tiefenwandlung (z. B. „velocity pull-up“) Ursache für Abweichungen sein.

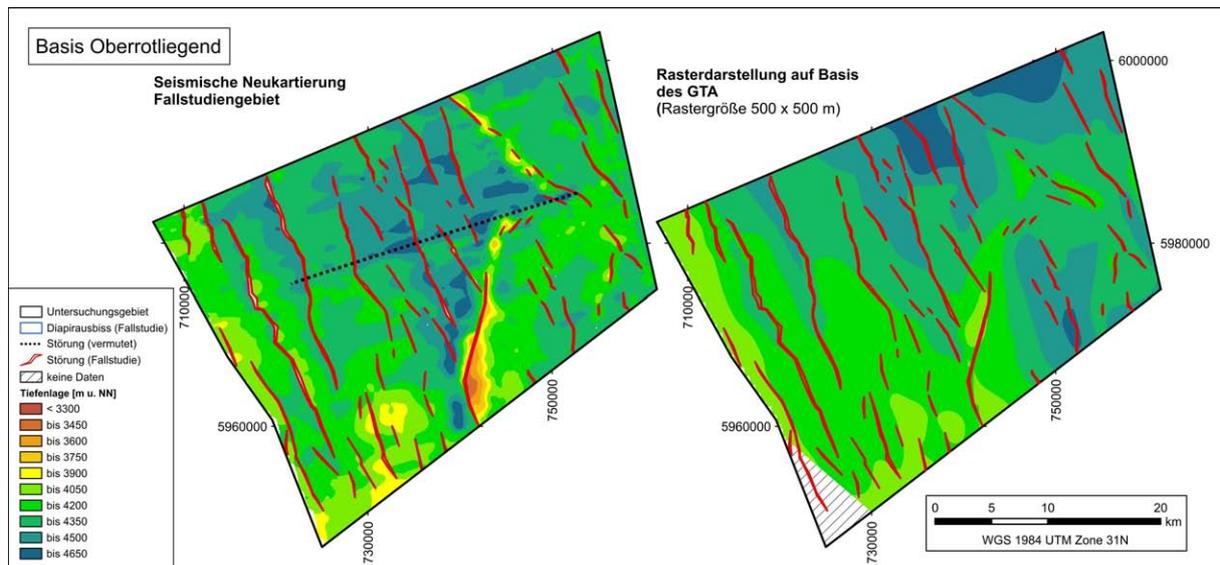


Abbildung 41: Gegenüberstellung der Tiefenlage der Basis Oberrotliegend in der Neukartierung (links) und einer Darstellung auf Basis des GTA (rechts). Diapirabisse, Störungen und Verbreitungsgrenzen basieren auf Daten der Neukartierung und sind zum besseren Vergleich auch auf den Karten des GTA dargestellt. Gleiches gilt auch für die folgenden Abbildungen.

Zechstein

Die Daten der seismischen Neukartierung und des GTA zeigen eine große Übereinstimmung bei der Verteilung von Tief- und Hochlagen. Abweichungen davon sind vor allem im südlichen Bereich der Salzmauern Lisa und Lollo zu beobachten (**Abbildung 42**). Als Ursachen für die Abweichungen sind eine stärkere Generalisierung der GTA-Daten und/oder eine unterschiedliche Tiefenwandlung der seismischen Daten anzunehmen.

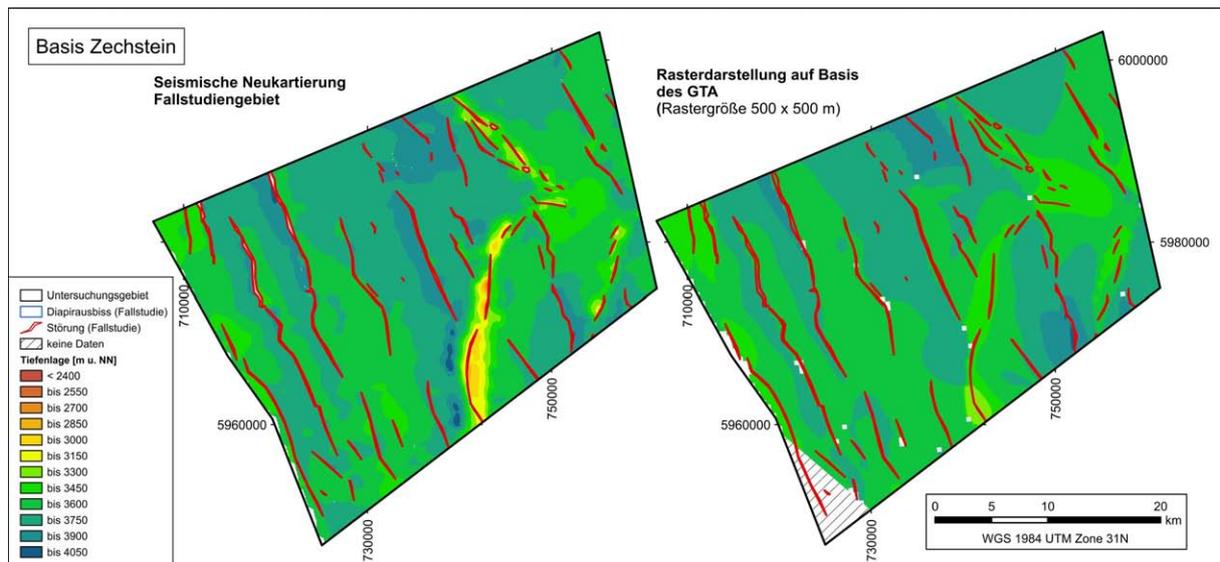


Abbildung 42: Gegenüberstellung der Tiefenlage der Basis Zechstein in der Neukartierung (links) und des GTA (rechts, Baldschuhn et al. 2001).

Unterer Buntsandstein

Die Tiefenlagen zeigen eine hohe Übereinstimmung. Abweichungen sind vor allem entlang der Flanken der zentralen Salzmauern Lollo und Lisa zu beobachten (**Abbildung 43**). Ein kleiner Diapir im südlichen Abschnitt von Lilli ist im GTA nicht dargestellt. Die Abweichungen der Tiefenlage entlang der Salzstrukturen beruhen vorwiegend auf einer unterschiedlichen Interpretation der Horizontabbrisskanten entlang von Salzdiapiren.

Oberer Buntsandstein (Röt)

Für den Oberen Buntsandstein zeigen sich deutliche Unterschiede in den dargestellten Verbreitungsgebieten. Während der Teil östlich der Salzmauern Lisa und Lollo nahezu identisch dargestellt wird, werden im GTA noch weiter westlich gelegene Verbreitungsgebiete ausgewiesen (**Abbildung 44**). Die Ursache dafür könnte sein, dass das Röt wegen seiner geringen Mächtigkeit in diesen Bereichen nicht mehr seismisch aufgelöst werden konnte.

In der Tiefenlage der Basis des Röt-Salz zeigen beide Datensätze östlich der Salzmauern Lollo und Lisa ein annähernd gleiches Bild. Kleinere Abweichungen ergeben sich um Salzstrukturen, so an der östlichen Flanke von Lollo und oberhalb von Hulda (siehe **Abbildung 19**).

Basis Keuper

Die im GTA ausgewiesene Verbreitung des Unteren Keuper ist weitestgehend deckungsgleich mit den Ergebnissen der seismischen Neukartierung. Lediglich im nordöstlichsten Bereich und entlang der Ostflanke der Salzstruktur Lisa ergeben sich Unterschiede für die Verbreitungsgrenzen (**Abbildung 45**). Abweichungen im Tieffenniveau ergeben sich im nordöstlichen Teil der Fallstudienregion und entlang der Salzstruktur Liane.

Basis Unterkreide

Die Tiefenlage der Basis Unterkreide entspricht in weiten Teilen der des GTA (**Abbildung 46**). Auffällig sind Bereiche in denen die Unterkreide nicht verbreitet ist, vor allem oberhalb von Salzstrukturen, welche in der Darstellung des GTA deutlich kleiner ausfallen als in der Neuinterpretation.

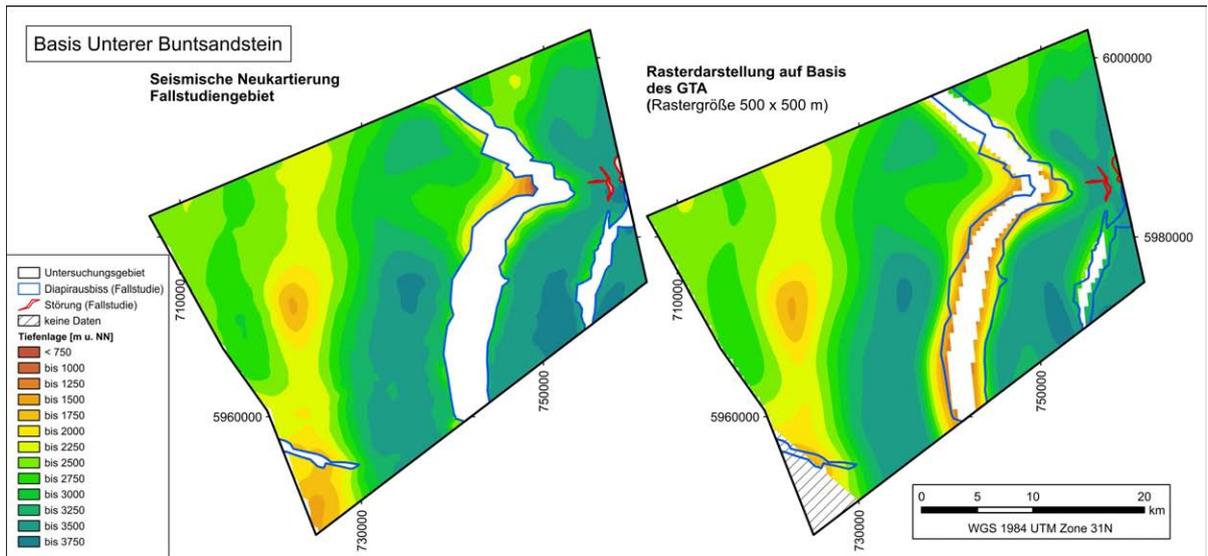


Abbildung 43: Gegenüberstellung der Tiefenlage der Basis Unterer Buntsandstein in der Neukartierung (links) und des GTA (rechts, Baldschuhn et al. 2001).

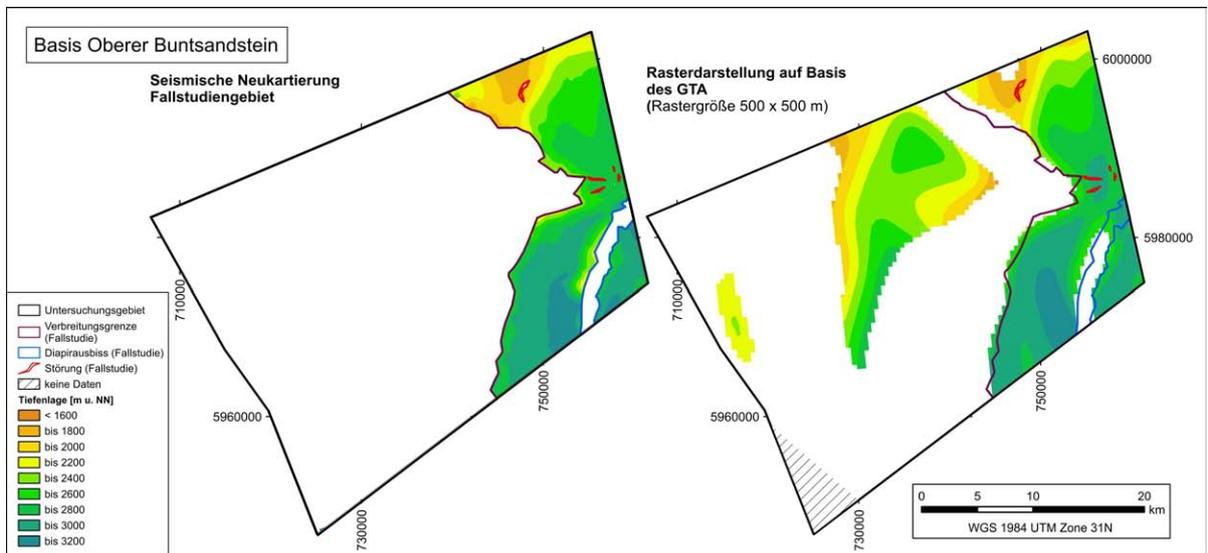


Abbildung 44: Gegenüberstellung der Tiefenlage der Basis Röt (Salz) der Neukartierung (links) und des GTA (rechts, Baldschuhn et al. 2001).

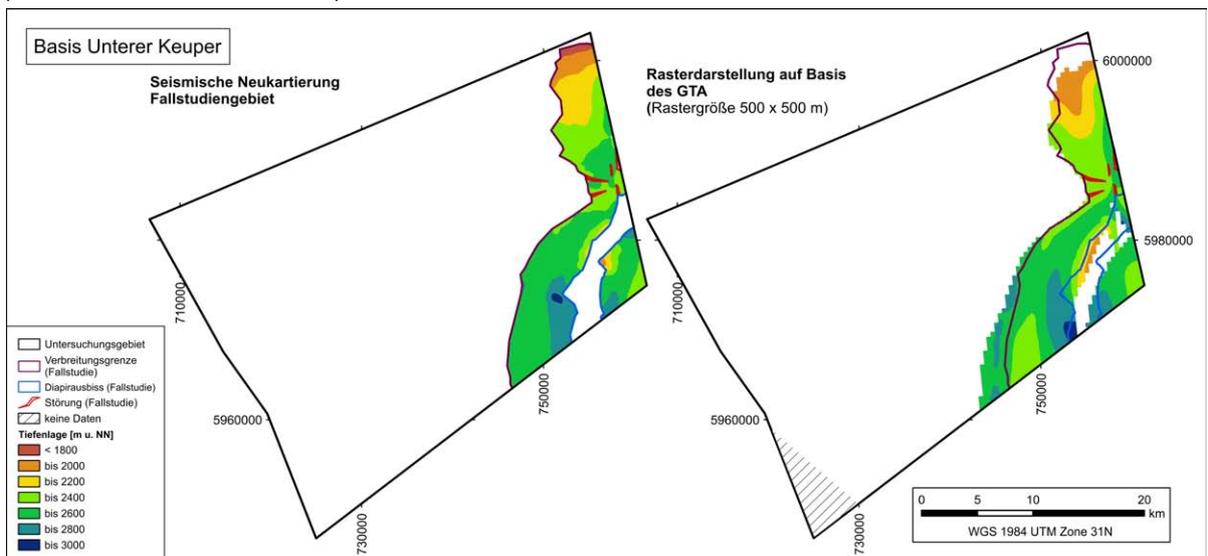


Abbildung 45: Gegenüberstellung der Tiefenlage der Basis Keuper in der Neukartierung (links) und des GTA (rechts, Baldschuhn et al. 2001).

Basis Oberkreide

Die Tiefenlage der Basis Oberkreide auf Basis des GTA und der Neukartierung sind nahezu deckungsgleich. Lediglich oberhalb der Salzmauern Lisa und Lollo ergeben sich Unterschiede in der Interpretation der Oberkreide-Basis. Diese sind in der Neukartierung im Bereich der Salzmauern weniger weit verbreitet (**Abbildung 47**).

Aufgrund des höheren Detaillierungsgrades der Neukartierung können vor allem kleinere Störungszonen besser dargestellt werden als im GTA. Dies trifft beispielsweise auf die Bereiche der Salzmauern Liane und Linda zu, aber auch auf Störungen in Verbindung mit kleineren Diapirstrukturen, so beispielsweise im Süden des Salzkissens Lilli (siehe **Abbildung 22** und **Abbildung 47**).

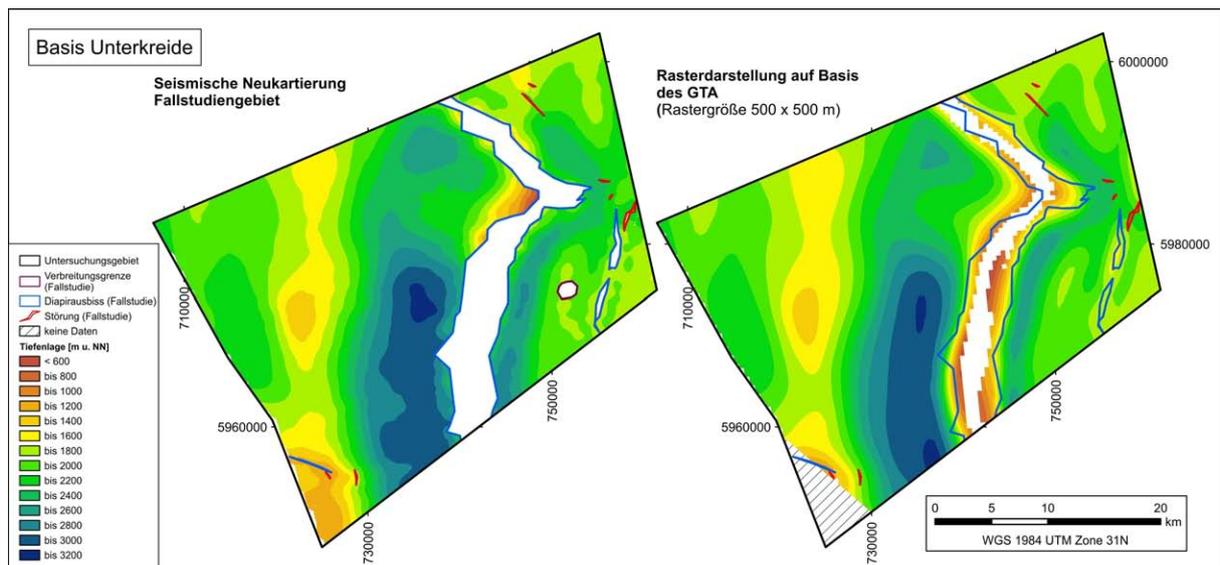


Abbildung 46: Gegenüberstellung der Tiefenlage der Basis Unterkreide in der Neukartierung (links) und des GTA (rechts, Baldschuh et al. 2001).

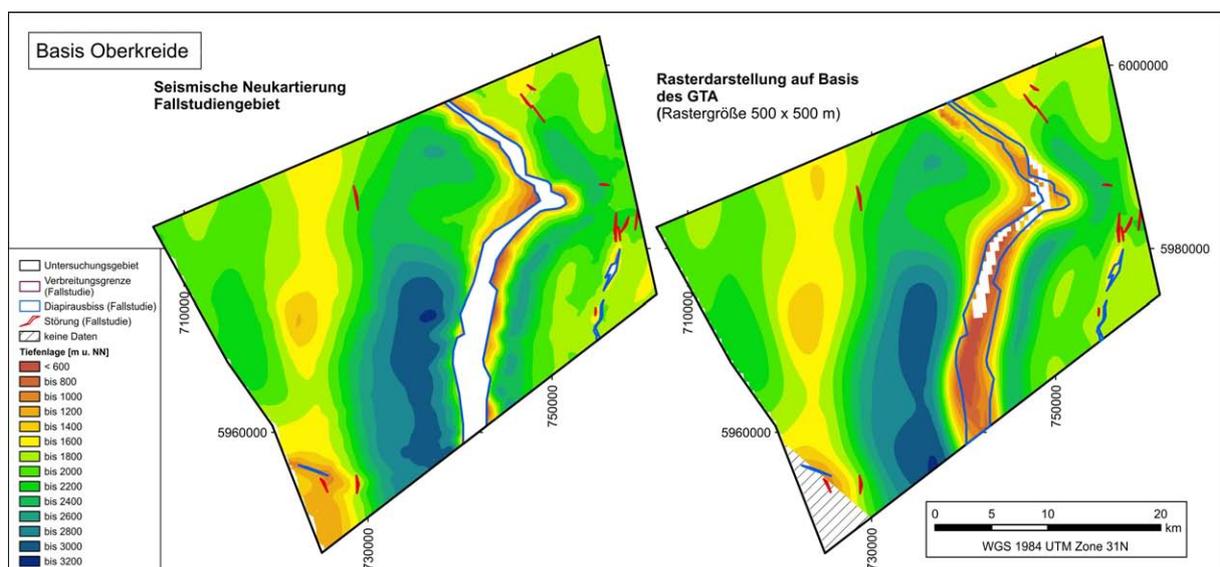


Abbildung 47: Gegenüberstellung der Tiefenlage der Basis Oberkreide in der Neukartierung (links) und des GTA (rechts, Baldschuh et al. 2001).

4.2.7 Verbreitung und Ausprägung von Speicher- und Barrierehorizonten in der Fallstudienregion

In der Fallstudienregion wurde die gesamte angetroffene stratigraphische Abfolge auf die Anwesenheit von Speicher- und Barrierehorizonten exemplarisch untersucht. Kriterien für die Ausweisung eines Speicher- und Barrierehorizontes waren die lithologische Ausprägung und Mächtigkeit (Definition siehe Kapitel 3.2.1). So müssen Speicherhorizonte einer stratigraphischen Einheit eine Nettomächtigkeit > 10 m Speicherlithologie aufweisen. Als untersuchungswürdig ausgewiesene Barrierehorizonte müssen dagegen eine durchgehende Mächtigkeit > 20 m Barrierehorizonte erreichen. Das Tiefenkriterium ist für alle untersuchten mesozoischen und paläozoischen Einheiten erfüllt. Tertiäre Einheiten können dagegen die festgelegten 800 m unter NN unterschreiten. Die Bewertung der lithologischen Ausprägung basiert auf den Schichtenverzeichnissen der verwendeten Bohrungen. Das Ergebnis dieser Bewertung ist für alle Tiefbohrungen in der Fallstudienregion in **Tabelle 5** dargestellt.

Beschreibung der Bohrungen

Ein großer Teil der Bohrungen in der Fallstudienregion endet im Rotliegend. Lediglich die Bohrungen L-1-1, D-1, M-1 und E-1 erreichen das Karbon und belegen im Karbon das Vorhandensein von untersuchungswürdigen Speicherhorizonten. Mit Ausnahme der Bohrung M-1 wurden in Ablagerungen des Karbon auch Barrierehorizonte erteuft. Das Oberrotliegend weist in allen Bohrungen, meist basisnah, untersuchungswürdige Speicherhorizonte auf. Zudem treten in allen Bohrungen im Hangenden dieser basalen Speicherhorizonte mächtige Abfolgen aus Barrieregesteinen auf. Das Zechstein wird in allen Tiefbohrungen der Fallstudienregion erteuft und besitzt meist eine hohe, jedoch auch stark variierende Mächtigkeit. Mit Ausnahme der Werra-Formation weisen alle Formationen des Zechstein Barrierehorizonte auf. Der Untere Buntsandstein besitzt in fast allen Bohrungen der Fallstudienregion Barrierehorizonte aus Tonstein. Zudem kommen in Bohrung L-1-1 in der Calvörde-Formation Speicherhorizonte vor. Der Mittlere Buntsandstein besteht aus „fining upward“ Zyklen, an deren Basis Sandsteine vorkommen. Die Nettomächtigkeit dieser Sandsteine erfüllt oft das Kriterium für einen untersuchungswürdigen Speicherhorizont (**Tabelle 5**). In der Fallstudienregion wird dies durch die Bohrungen L-1-1, L-1-2, D-1, H-18-1, P1-A und M1 gestützt. Gleichzeitig weisen die Schichtenverzeichnisse der Bohrungen L-1-2, D-1, H-18-1, P1-A und M1 im Mittleren Buntsandstein zum Top der „fining upward“-Zyklen zum Teil mergelige Tonsteine aus, die das Mächtigkeitskriterium für einen Barrierehorizont erfüllen. Im Oberen Buntsandstein (Röt) treten in den Bohrungen H-18-1 und L-3-2 mächtige Barrierehorizonte aus Steinsalz und Tonstein auf. Ablagerungen des Muschelkalk sind in zwei Bohrungen (H-18-1 und L-3-2) angetroffen worden. In Bohrung H-18-1 kommen im Mittleren Muschelkalk mächtige Tonsteine vor. Die Gesteine der Ober- und Mitteltrias sind weiträumig erodiert worden. So ist der Keuper nur in einer Bohrung (L-3-2) belegt. Dort ist eine ca. 650 m mächtige Abfolge aus Tonsteinen beschrieben. Eine genauere stratigraphische Zuordnung dieser Gesteine ist aufgrund der vereinfachten geologischen Aufnahme der Bohrung L-3-2 für diesen stratigraphischen Abschnitt nicht sicher durchzuführen. Vermutlich handelt es sich um Ablagerungen des Unteren bis Mittleren Keuper. Es sind in keiner Bohrung Gesteine aus dem Rhätkeuper und Jura erbohrt worden. Die Unterkreide besitzt ebenfalls zum Teil mergelige Tonsteinabfolgen, die das Mächtigkeitskriterium für einen Barrierehorizont erfüllen. Nur in den, oberhalb von Salzstrukturen abgeteufte, Bohrungen A-1 und E-1 wurden keine Unterkreidegesteine angetroffen. Für die Oberkreide wurden in keiner Bohrung Speicher- oder Barrierehorizonte erteuft. Im Känozoikum finden sich lokal Barrierehorizonte mit teils unterschiedlicher stratigraphischer Zuordnung (Eozän bis Oligozän).

Tabelle 5: Auflistung der stratigraphischen Einheiten und der in den Bohrungen der Fallstudienregion erteuften Speicher- oder Barrierehorizonte. Gelb markierte Kästchen zeigen Speicherhorizonte, beige-grüne Kästchen zeigen Barrierehorizonte. Beige-grüne Kästchen mit Schraffur heben gesondert Barrierehorizonte mit tonmergeligen Anteilen hervor. Die weiße Schraffur markiert nicht abgelagerte oder erodierte Abfolgen. Die weißen Kästchen zeigen, dass die Lithologien der jeweiligen stratigraphischen Einheit das Kriterium für die Ausweisung als Speicher- oder Barrierehorizont nicht erfüllen.

Stratigraphische Einteilung		Bohrung																						
		DNS		L-1-1		L-1-2		D-1		E-1		H-18-1		P-1-A		M-1		A-1		L-3-1		L-3-2		
		SK	BK	SK	BK	SK	BK	SK	BK	SK	BK	SK	BK	SK	BK	SK	BK	SK	BK	SK	BK	SK	BK	
Quartär																								
Tertiär	Pliozän																							
	Miozän																							
	Oligozän	Chatt																						
		Rupel																						
	Eozän																							
Paläozän																								
Kreide	Oberkreide	Maastricht																						
		Campan																						
		Santon																						
		Coniac																						
		Turon																						
		Cenoman																						
	Unterkreide	Alb																						
		Apt																						
		Barrême																						
		Hauterive																						
		Valangin																						
Berrias / "Wealden"																								
Jura	Oberjura (Malm)	Tithon																						
		Kimmeridge																						
		Oxford																						
	Mitteljura (Dogger)	Callov																						
		Bathon																						
		Bajoc																						
	Unteljura (Lias)	Aalen																						
		Toarc																						
		Pliensbach																						
Trias	Keuper	O Rhätkeuper																						
		M Steinmergelkeuper																						
		M Oberer Gipskeuper																						
		M Schilfsandstein																						
		M Unterer Gipskeuper																						
	U Lettenkeuper																							
	Muschelkalk	Ob. Muschelkalk																						
		Mittl. Muschelkalk																						
		Unt. Muschelkalk																						
	Buntsandstein	O Röt																						
M Solling-Formation																								
M Hardegsen-Formation																								
M Detfurth-Formation																								
M Volpriehausen-Frm.																								
M Quickborn-Formation																								
U Bernburg-Formation																								
U Calvörde-Formation																								
Perm	Zechstein	Fulda-Formation																						
		Friesland-Formation																						
		Ohre-Formation																						
		Aller-Formation																						
		Leine-Formation																						
		Steißfurt-Formation																						
		Werra-Formation																						
	Rotliegend																							
Oberkarbon	Oberrotliegend																							
	Unteroberrotliegend																							
Stefan																								
	Westfal																							

Erläuterung:

<ul style="list-style-type: none"> Vorkommen der bearbeiteten potenziellen Speicherhorizonte Vorkommen der bearbeiteten potenziellen Barrierehorizonte Vorkommen von Barrierehorizonten mit tonmergeliger Lithologie 	<ul style="list-style-type: none"> Kein Potenzial oder keine Information Alter/Formation nicht vorhanden oder beschrieben ? ungenaue stratigraphische Zuordnung
---	--

Diskussion

Durch die Fokussierung auf Horizonte, losgelöst von der Kategorisierung nach Komplexen (siehe Kapitel 3), konnten eine Reihe von potenziellen Speicher- und Barrierehorizonten ausgewiesen werden. Im Vergleich zur überregionalen Speicherpotenzialbetrachtung (Kapitel 3) in der zentralen deutschen Nordsee sind für die Fallstudienregion Unterschiede in der Ausweisung des Speicher- und Barrierepotenzials festzustellen:

- Die detaillierte Betrachtung einzelner Horizonte führt zu einer genaueren vertikalen wie auch flächigen Auflösung der einzelnen Komplexe. So zeigt sich beispielsweise für den Speicherkomplex Mittlerer Buntsandstein, dass vorwiegend die basalen Sandsteine der „*fining upward*“-Zyklen der Volpriehausen- und Detfurth-Formation Speicherpotenziale aufweisen.
- In der Fallstudienregion werden Speicher- oder Barrierehorizonte beschrieben, die nicht zu einem Komplex zusammengefasst werden. Im Paläogen, Keuper und im Mittleren Muschelkalk treten lokal Barrierehorizonte auf. So weist zum Beispiel das Schichtenverzeichnis von Bohrung L-3-2 Tonsteine für den Keuper aus. Darüber hinaus treten potenzielle Speicher- und Barrierehorizonte im Unteren Buntsandstein und Oberkarbon auf.
- In der Fallstudienregion wurden auch innerhalb eines Komplexes einzelne Horizonte mit gegensätzlicher lithologischer Charakteristik identifiziert. So können innerhalb eines Speicherkomplexes Barriere- und innerhalb eines Barrierekomplexes auch Speicherhorizonte auftreten. Beispielsweise weist das Oberotliegend als Speicherkomplex in der Fallstudienregion zusätzlich in allen Bohrungen Barrierehorizonte auf. In Bohrung M1 tritt eine Wechselfolge von Tonsteinen und Mergeln auf. Auch am Top der „*fining upward*“-Zyklen des Speicherkomplexes Mittlerer Buntsandstein treten vereinzelt Barrierelithologien auf.
- Durch die Einteilung nach stratigraphischen Einheiten werden einzelne formationsübergreifende und gleichartige Lithologien nicht untersucht. Stehen beispielsweise im Top einer Formation 10 m mächtige Barrierelithologien an und an der Basis der hangenden Formation weitere 10 m, so würden, wegen des Nichterreichens des Mächtigkeitskriteriums, für die beteiligten Formationen, keine Barrierehorizonte ausgewiesen werden.

Unschärfen in den Ergebnissen ergeben sich auch durch die unterschiedliche Qualität der verwendeten Bohrdaten. So schwanken beispielsweise die Qualität und der Detailgrad der lithologischen Beschreibungen in den Schichtenverzeichnissen, je nach Explorationsziel und Alter der Bohrung, signifikant. Darüber hinaus sind neue Erkenntnisse zur Stratigraphie in alten Bohraufnahmen nicht berücksichtigt. Beispielsweise wird die Quickborn-Formation (sm) in älteren Bohrungen nicht beschrieben. Auch kann die stratigraphische Zuordnung in den Schichtenverzeichnissen aufgrund des Alters der Bohrung von der heute gültigen Einteilung abweichen (z. B. Bröckelschiefer). Da meist nur die Zielhorizonte der Bohrung im Detail untersucht und beschrieben wurden, ergeben sich für die komplette Bohrung Differenzen in der Qualität der Gesteinsbeschreibung. Besonders känozoische Abfolgen sind in vielen Bohrungen unterbestimmt. Hinzu kommt, dass die Schichtenverzeichnisse nicht anhand geophysikalischer Logs korrigiert (angepasst) wurden, wodurch sich leichte Abweichungen in der Ausweisung der Horizonte ergeben können.

4.2.8 Kapazitätsabschätzung einer exemplarischen Speicherstruktur

Im Rahmen des EU-Projektes GeoCapacity wurde das CO₂-Speicherpotenzial im deutschen Nordsee-Sektor (ohne „Entenschnabel“) erstmals bewertet und quantifiziert (Vangkilde-Pedersen et al. 2009). Auf Basis der digitalisierten Karten des Geotektonischen Atlas von Nordwest-Deutschland (GTA) und des deutschen Nordsee-Sektors (Baldschuhn et al. 2001) wurden potenzielle Speicherstrukturen (Fallenstrukturen) im Oberrotliegend, im Mittleren Buntsandstein, im Keuper, im Jura und im Mittleren Eozän erfasst und charakterisiert. Diese umfassten vorrangig Antiklinalstrukturen sowie an Störungen und Salzstrukturflanken gebundene Fallenstrukturen. Auf Basis von Informationen über die regionale Verbreitung von lithostratigraphischen Einheiten wurde bei der Analyse für jede Struktur vorausgesetzt, dass im Hangenden barrierewirksame Gesteinshorizonte vorhanden sind. Die Berechnung der CO₂-Speicherkapazität der Struktur erfolgte nach Vangkilde-Pedersen et al. (2009) mit folgender Formel:

$$K = A * M * \Theta * \rho * E$$

Mit:

K=Kapazität,

A=flächenhafte Ausdehnung der Speicherstruktur,

M=Mächtigkeit des Speichergesteins,

Θ=Porosität des Speichergesteins,

ρ=CO₂-Dichte sowie *E*=Flutungseffizienz (Parameterbezeichnung gegenüber GeoCapacity verändert).

Für alle Berechnungen wurde eine CO₂-Dichte von 700 kg/m³ und eine Flutungseffizienz von 20 % angenommen. Der Wert der Flutungseffizienz wurde unter der Annahme gewählt, dass die erfassten Strukturen hydraulisch offen sind. Die flächige Ausdehnung der Speicherstrukturen wurde anhand von Tiefenlinienplänen aus dem GTA ermittelt. Die mittlere Mächtigkeit des Speichergesteins sowie die Porosität wurden anhand (über-) regionaler Informationen und Trendabschätzungen festgelegt. Diese Angaben basieren nicht auf strukturspezifischen Daten. Das Produkt der Parameter *A* und *M* ergibt eine Abschätzung des Speichergesteinsvolumens für die jeweilige Speicherstruktur.

Im Rahmen von GeoCapacity wurden in der Fallstudienregion Strukturen im Oberrotliegend, im Mittleren Buntsandstein sowie im Unteren/Mittleren Keuper erfasst und für die Speicherkapazität abgeschätzt (**Abbildung 48**). Die kumulative CO₂-Speicherkapazität dieser Strukturen wurde mit ca. 162 Mt. bestimmt.

Für die Fallstudie wurde eine Struktur im Oberrotliegend ausgewählt, um daran exemplarisch eine Abschätzung der Speicherkapazität mit einer detaillierteren Erfassung des Speichervolumens vorzunehmen. Die ausgewählte Struktur ist eine strukturelle Falle auf einer NNW-SSE streichenden Horststruktur, die sich im Nordwesten der Fallstudienregion unterhalb des Salzkissens Lea befindet (**Abbildung 48, Abbildung 49**).

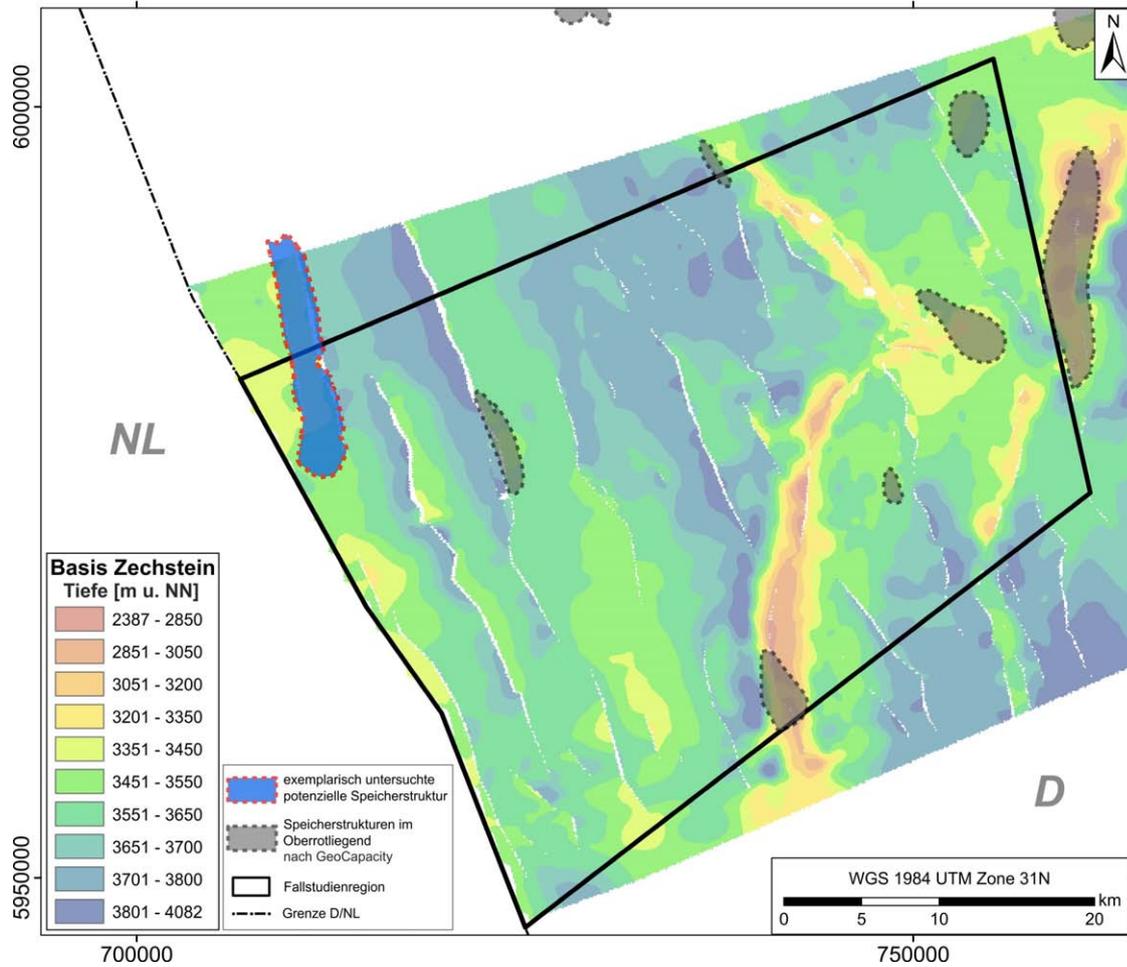


Abbildung 48: Lage der untersuchten Struktur. Zum Vergleich sind die nach GeoCapacity ausgewiesenen potenziellen Speicherstrukturen im Oberrotliegend dargestellt. Auf Basis der seismischen Neukartierung der Basis Zechstein (Abbildung 37) sind diese Strukturen nur noch bedingt nachvollziehbar.

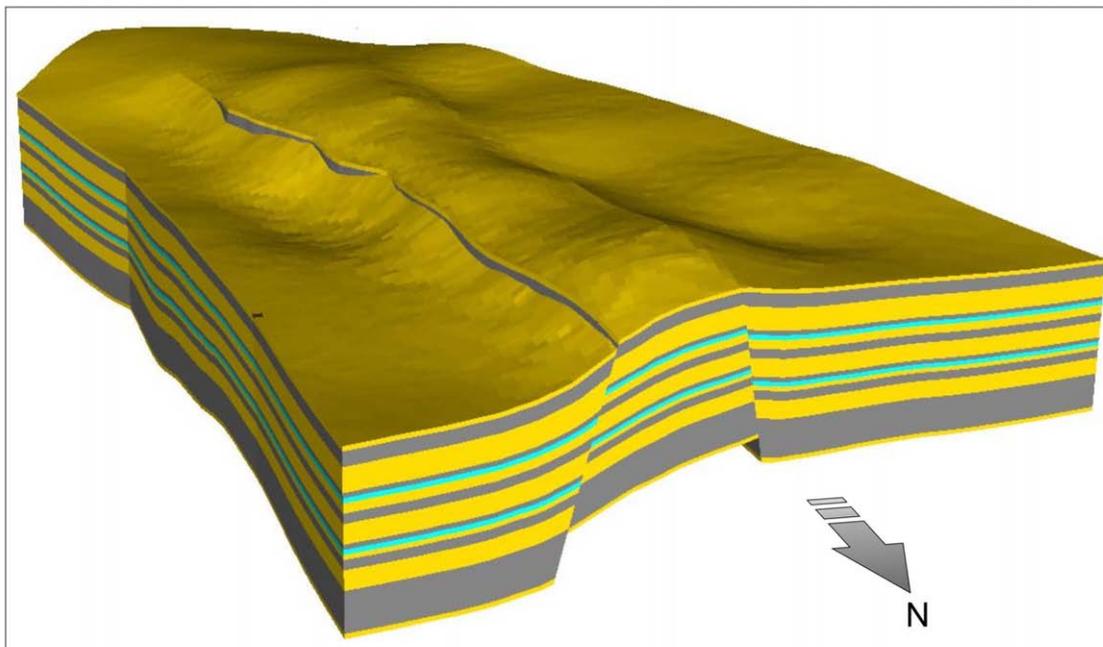


Abbildung 49: Schematische 3D-Ansicht der untersuchten Speicherstruktur mit Blick nach SSW. Der leistenförmige Aufbau dieser Horststruktur und die östliche der begrenzenden Abschiebungen sind deutlich zu erkennen. Die Farbgebung soll beispielhaft eine lithologische Wechsellagerung des Oberrotliegend andeuten, entspricht jedoch nicht unbedingt den lithologischen Gegebenheiten.

Als Speichergestein kommen Sandsteine an der Basis Oberrotliegend infrage, die in Bohrung L-1-1 überwiegend mittel- bis grobkörnig ausgebildet sind. Im Schichtenverzeichnis der Bohrung L-1-1 wird für diese Sandsteine eine Mächtigkeit von 22 m angegeben. Der Speicherhorizont wurde anhand von Daten aus den Bohrungen L-1-1 und weiteren Bohrungen im Bereich der Fallstudienregion modelliert. Im Schichtenverzeichnis der Bohrung L-1-1 wird für den Rotliegend-Basissandstein eine mittlere Porosität von 13,9 % angegeben. Im Verzeichnis ist zusätzlich vermerkt, dass die, in Dünnschliffen nachgewiesenen Salzzemente, bei der Porositätsbestimmung nicht untersucht wurden, sodass die Angaben über die Speicherqualitäten als „optimistisch“ angesehen werden müssen. Der Speicherhorizont wird zum Teil von mehreren hundert Meter mächtigen Abfolgen von Barrieregesteinen des Rotliegend (Rotliegend-Tonstein, Rotliegend-Salinar sowie Oberrotliegend-Tonstein) überlagert. Direkt im Hangenden sind mehr als 50 m Tonstein ausgebildet. Dieser Barrierehorizont wurde unter Verwendung von Bohrungsangaben für das Gebiet der Speicherstruktur in die Modellierung mit einbezogen. Die seitlich begrenzenden Störungen versetzen den Speicherhorizont gegen die Oberrotliegend-Barrierehorizonte (vgl. **Abbildung 49**) und wirken vermutlich hydraulisch isolierend. Nach Norden und Süden ist die Struktur hingegen (nach Vangkilde-Pedersen et al. (2009) hydraulisch offen („*semi-closed system*“). Der tiefste Punkt der Struktur („*spill-point*“) liegt bei 4060 m u. NN und der Scheitelpunkt bei etwa 3760 m u. NN. Die Abschiebungen im Westen und Osten sowie der Verlauf der tiefsten geschlossenen Tiefenlinien am Top des Speicherhorizontes („*spill-point*“) im Norden und Süden begrenzen die Ausdehnung der Struktur (**Abbildung 50**). Die Speicherstruktur nimmt eine Fläche von ca. 36 km² ein, erstreckt sich über eine Länge von ca. 16 km und variiert in der Breite zwischen 1,5 km im mittleren Bereich der Struktur und 3,2 km im Süden (Mittlere Breite ca. 2,2 km). Die Berechnung der CO₂-Speicherkapazität erfolgte mit der gleichen Formel, die auch im Projekt GeoCapacity verwendet wurde (Vangkilde-Pedersen et al. 2009):

$$K = V * \Theta * \rho * E$$

Mit:

V = Speichergesteinsvolumen,

Θ = Porosität des Speichergesteins,

ρ = CO₂-Dichte,

E = Flutungseffizienz.

Der Unterschied zu GeoCapacity besteht darin, dass das Speichergesteinsvolumen direkt über ein detailliertes 3D-Modell der Struktur bestimmt wurde. Mit Hilfe des Programms Paradigm SKUA wurde für die untersuchte Struktur ein Speichergesteinsvolumen von ca. 720 Mio. m³ ermittelt. Für die Flutungseffizienz wurden in Anlehnung an Vangkilde-Pedersen et al. (2009) und Knopf et al. (2010) Werte von 5, 10 und 20 % angenommen. Für die CO₂-Dichte wurde nach Knopf et al. (2010) ein Durchschnittswert von 625 kg/m³ angenommen; (Minimalwert = 550 kg/m³, Maximalwert = 700 kg/m³). Die verwendeten Parameterwerte sowie die Resultate der Berechnung sind in **Tabelle 6** aufgeführt. Die berechnete Speicherkapazität variiert zwischen 2,75 Mt. und 14 Mt., in Abhängigkeit der verwendeten Werte für die CO₂-Dichte und die Flutungseffizienz. Die Fallenstruktur bietet nur nach Norden und Süden, über die hydraulische Verbindung zum umgebenden Speicherhorizont, mögliche Migrationswege für verdrängte Formationswässer. Nach Vangkilde-Pedersen et al. (2009) muss bei solchen halbgeschlossenen Speichersystemen von einer geringeren Flutungseffizienz ausgegangen werden als dies bei hydraulisch offenen Speichersystemen der Fall ist. Demzufolge scheint eine Flutungseffizienz von 5 – 10 % für diese Struktur vermutlich realistischer zu sein als ein Wert von 10 – 20 %.

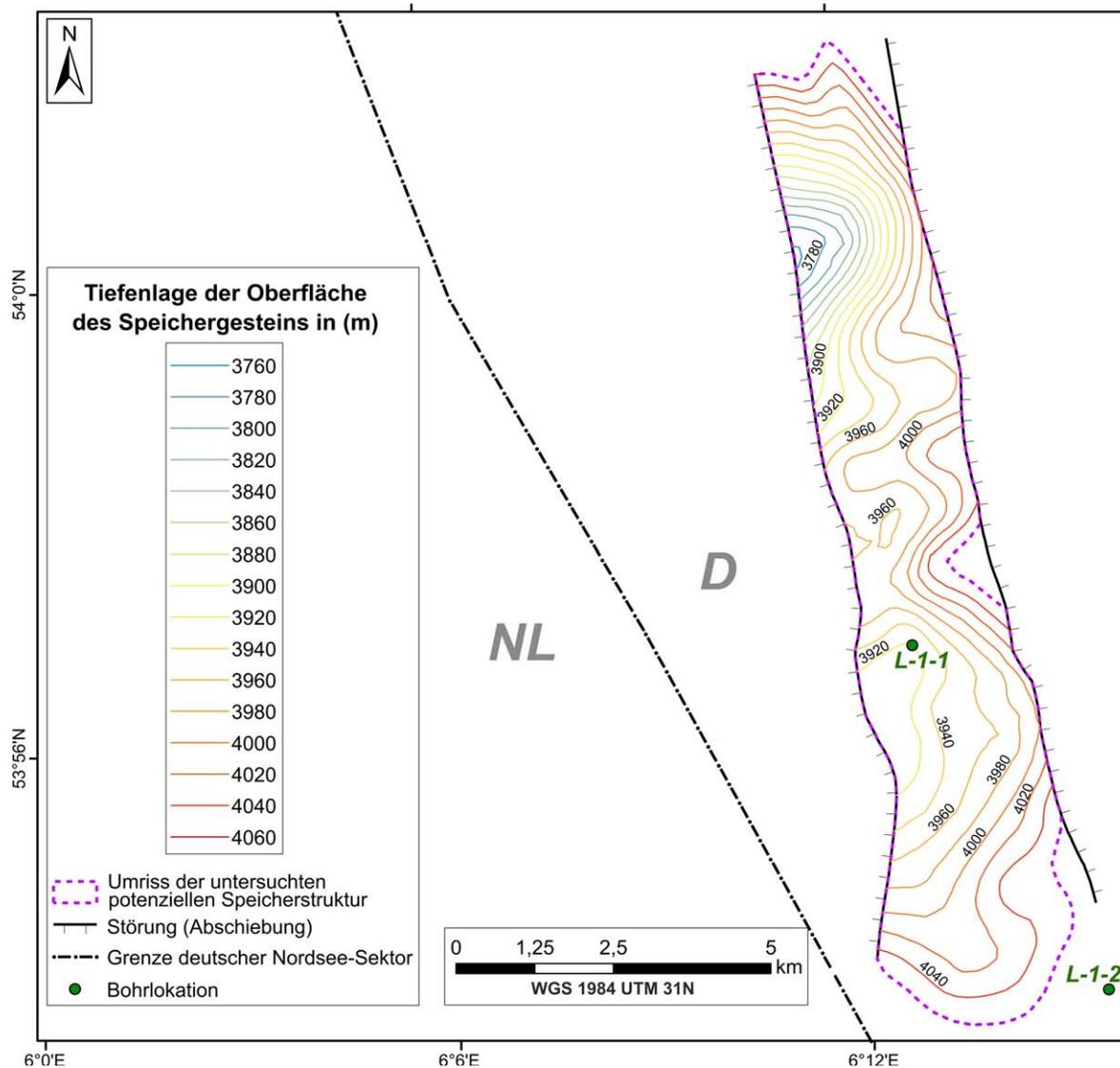


Abbildung 50: Tiefenlage des Tops der Speicherstruktur.

Die in GeoCapacity berechnete grobe Abschätzung des Speichergesteinsvolumens über das Produkt der Parameter A und M berücksichtigt nicht die exakte Geometrie einer Speicherstruktur bei der Volumenberechnung. Es werden zum Beispiel in den Randbereichen der potenziellen Speicherstrukturen auch Speichergesteinsvolumina unterhalb des „spill-points“ in die Volumenberechnung einbezogen.

Tabelle 6: Parameterwerte und Resultate der Speicherkapazitätsberechnung.

Parameter	Rechnung 1			Rechnung 2			Rechnung 3		
Volumen	720 Mio. m ³			720 Mio. m ³			720 Mio. m ³		
Porosität	0,139			0,139			0,139		
CO ₂ -Dichte	550 kg/m ³			625 kg/m ³			700 kg/m ³		
E	0,05	0,10	0,20	0,05	0,10	0,20	0,05	0,10	0,20
K	2,75 Mt.	5,50 Mt.	11,01 Mt.	3,13 Mt.	6,25 Mt.	12,51 Mt.	3,50 Mt.	7,01 Mt.	14,01 Mt.

So kann durch die in der Fallstudie verwendete Methode das Speichergesteinsvolumen anhand eines 3D-Modells viel genauer bestimmt werden, da durch die Einbeziehung der Geometrie der Speicherstruktur nur die effektive Speichergesteinsmächtigkeit oberhalb des Spill-points zur Bestimmung des Speichergesteinsvolumens herangezogen wird (**Abbildung 51**). Weiterhin kann die Lage des „spill-points“ direkt im 3D-Modell ermittelt werden, wodurch die flächenhafte Ausdehnung der Speicherstruktur viel genauer bestimmt werden kann. Die in dieser Fallstudie ausgewählte Struktur wurde in GeoCapacity nicht beschrieben, da die damals verwendete Datengrundlage diese nicht ausreichend auflöste. Erst durch die Berücksichtigung einer höheren Datendichte und Neukartierungen im GPDN-Projekt wurde diese Speicherstruktur erfasst, charakterisiert und bewertet. Dabei war die Modellierung der innerhalb des Speicherkomplexes auftretenden Speicher- und Barrierehorizonte eine wesentliche Voraussetzung für die Abschätzung des Speichergesteinsvolumens.

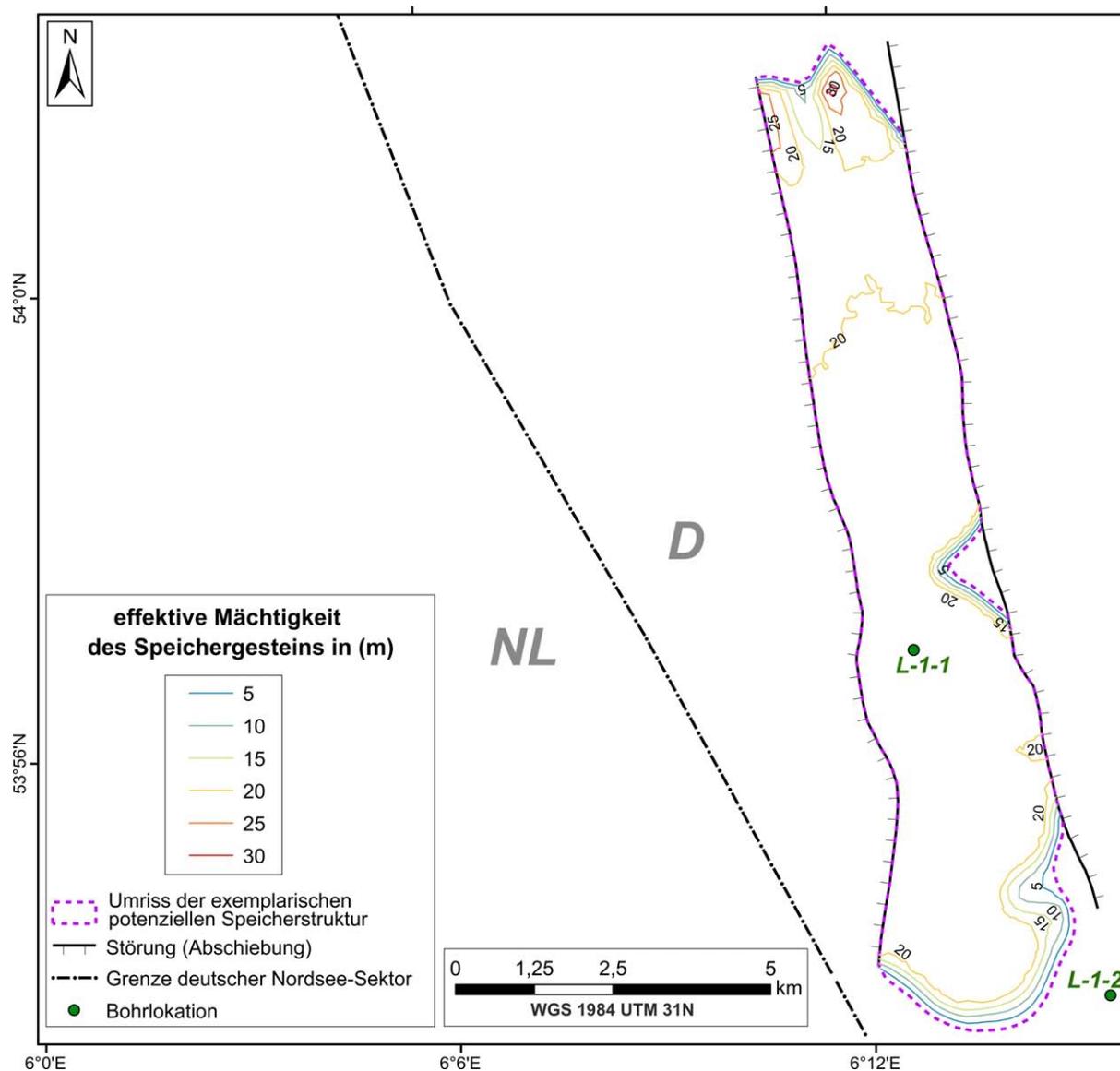


Abbildung 51: Effektive Mächtigkeit des Speichergesteins innerhalb der Speicherstruktur (oberhalb „spill-point“).

5. Zusammenfassung und Ausblick

Der tiefere Untergrund der zentralen deutschen Nordsee wurde, ergänzend zu den Onshore-Untersuchungen im Projekt Speicher-Kataster Deutschland, auf seine Potenziale für die Speicherung von Fluiden in salinaren Aquiferen untersucht. Dazu wurde zunächst die stratigraphische Abfolge in Speicher- und Barrierekomplexe unterteilt. In einem Komplex können unterschiedliche Lithologien zusammengefasst sein. So kann zum Beispiel ein Speicherkomplex auch aus mehreren Horizonten einer für die Speicherung günstigen Lithologie (z. B. Sandstein) aufgebaut sein. Es wurden insgesamt vier Speicherkomplexe (Oberrotliegend, Mittlerer Buntsandstein, Rhäteuper, Mitteljura) und vier Barrierekomplexe (Zechstein, Oberer Buntsandstein, Unterjura, Unterkreide) definiert. Kriterien waren die Mächtigkeit (> 10 m für Speicher- und > 20 m für Barrierekomplexe) und die Mindestdiefe (> 800 m). Aufbauend auf die im Projekt Speicher-Kataster Deutschland angewendete Methodik, erfolgte in dieser Studie, neben der großflächigen Analyse stratigraphischer Mächtigkeiten, eine Prüfung der lithologischen Ausprägung über die Schichtenverzeichnisse von etwa 50 verfügbaren Bohrungen. Auf dieser Basis wurden untersuchungswürdige Gebiete in Kartenform ausgewiesen. Die in dieser Studie vorgestellten Ergebniskarten sind auch im Internet auf dem GPDN-Kartenserver verfügbar (www.gpdn.de).

Die Speicherkomplexe Oberrotliegend und Buntsandstein sowie die Barrierekomplexe Zechstein, Oberer Buntsandstein und Unterkreide erfüllen großflächig die Mindestkriterien für die Untersuchungswürdigkeit. Die Speicherkomplexe Rhätkeuper und Mitteljura sowie der Barrierekomplex Unterjura sind nur küstennah lokal erhalten und erfüllen dort in Teilgebieten die Mindestkriterien.

Durch die Verwendung eines im Rahmen des GPDN-Projektes erarbeiteten generalisierten 3D-Modells (GSN) wurde, in Erweiterung der bisherigen Betrachtungen der Speicher- und Barrierepotenziale (z. B. wie im Projekt Speicher-Kataster Deutschland), eine vertiefte Analyse der strukturellen Beziehungen zwischen Speicher- und Barrierekomplexen durchgeführt. Die große Variation der strukturellen Beziehungen der Komplexe zueinander ergibt eine Vielzahl an möglichen Fallensituationen, deren Anzahl und Ausbildung in den neun in der zentralen deutschen Nordsee definierten Strukturräumen deutlich variieren. Dabei zeigt sich auch ein ausgeprägter Einfluss von Halotektonik/Halokinese und Erosion auf die Ausbildung von Fallen.

Die Ausweisung untersuchungswürdiger Speicher- und Barrierekomplexe sowie die Ergebnisse zu den Fallensituationen bildeten die Grundlage für weiterführende Untersuchungen, die im Rahmen einer Fallstudie durchgeführt wurden. Im Süden der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) wurde dazu eine ausgewählte Region mit möglichen Speicherstrukturen näher untersucht. Diese Region zeichnet sich durch eine hohe Dichte an verfügbaren geologischen und geophysikalischen Daten (Reflexionsseismik, Bohrdaten etc.) aus. In der Fallstudienregion wurde basierend auf einer seismischen Neukartierung eine detaillierte geologische Charakterisierung vorgenommen und ein Vergleich mit bestehenden Strukturinterpretationen durchgeführt. Die Betrachtung der gesamten stratigraphischen Abfolge zeigt, dass die für überregionale Studien verwendete Gliederung in Speicher- und Barrierekomplexe für lokale und detaillierte Untersuchungen zu unscharf ist. So können beispielsweise kleinräumige laterale Verzahnungen der Lithologien nicht aufgelöst werden. Daher wurde in Erweiterung der Komplexbetrachtung eine „Horizontbetrachtung“ durchgeführt, anhand derer die stratigraphischen Abfolgen innerhalb der Komplexe, auf Basis von Daten zur lithologischen Ausprägung, zwischen Speicher- und Barrierehorizonte differenziert wurden. So ergeben sich neben den bereits definierten Potenzialen innerhalb der Speicher- und Barrierekomplexe lokal weitere Speicher- und Barriere-

potenziale. Die Ergebnisse der Fallstudie zeigen, dass zumindest in der Fallstudienregion der Speicherkomplex Oberrotliegend, neben Speicherhorizonten im unteren Oberrotliegend auch mächtige Barrierehorizonte im jüngeren Oberrotliegend, aufweist. Vergleichbares gilt auch für den Speicherkomplex Mittlerer Buntsandstein, der in den Wechselfolgen seiner Formationen Barrierehorizonte besitzt. Auf Basis der vorliegenden Daten ist davon auszugehen, dass vergleichbare und somit zusätzliche Potenziale auch in anderen Bereichen der zentralen deutschen Nordsee gegeben sind. Dies lässt sich jedoch nur durch weiterführende regionale Studien genauer untersuchen.

Ein detailliertes Strukturmodell der Fallstudienregion, das eine bessere Abschätzung des Speichergesteinsvolumens im Vergleich zu überregional angelegten Studien ermöglicht, wurde als Grundlage für eine Kapazitätsabschätzung einer exemplarischen Speicherstruktur verwendet. Die volumetrisch abgeschätzte Speicherkapazität dieser Struktur liegt im Bereich von 2,75 bis 14 Mt. CO₂. Maßgeblich für eine genauere Abschätzung der Speicherkapazität ist die genauere Erfassung der Parameter Flutungseffizienz und Porosität. Diese müssen für jede in Betracht kommende Speicherstruktur durch weiterführende reservoirskalige Untersuchungen bestimmt werden.

Neben den hier vorgestellten regionalen bis lokalen Analysen müssen für eine genauere Abschätzung von Speicherkapazitäten noch eine Reihe weiterer, insbesondere reservoirskaliger, Untersuchungen und methodischer Entwicklungen erfolgen, die weitere geologische und geotechnische Aspekte berücksichtigen: Untersuchungen zur Gebirgsmechanik, Sedimentologie, Lithofazies sowie diagenetischen Veränderungen der Speicher- und Barrieregesteine, zur Parametrisierung von Reservoirmodellen, Simulationen zum Fluidfluss und zur Druckausbreitung sowie die Berücksichtigung von Unsicherheiten geologischer Modelle. Dennoch können diese meist modellbasierten Untersuchungen nicht die nutzungsorientierte Erkundung eines Standortes ersetzen.

Durch die ebenfalls im Rahmen des GPDN-Projektes durchgeführte Aufarbeitung der geologischen und geophysikalischen Daten, Bohrungsanalysen, eine Strukturinterpretation und darauf aufbauende 3D-Modellierung dieser Region wurden die Grundlagen für eine weiterführende Speicherpotenzialanalyse in Folgeprojekten geschaffen.

6. Literaturverzeichnis

- Arfai, J., Jähne, F., Lutz, R., Reinhardt, L., Thöle, H. & Wirth, H. (2011): Datengrundlage, Arbeitskonzepte und erste vorläufige Ergebnisse zum Projekt Geopotenzial Deutsche Nordsee (2009-2010). – 147 S., Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S. & Kockel, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. – Geologisches Jahrbuch, **Reihe A 153**: 1-88.
- Baldschuhn, R., Jaritz, W., Kockel, F. & Roth, W. (1979): Katalog der niedersächsischen Salzlagerstätten. Teil I & II. – 217 & 221 S., Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- Beutler, G. (2005): Stratigraphie von Deutschland IV: Keuper. – Courier Forschungsinstitut Senckenberg, **253**: 1-296.
- Bombien, H., Hoffers, B., Breuckmann, S., Helms, M., Lademann, K., Lange, M., Oelrich, A., Reimann, R., Rienäcker, J. & Schmidt, K. (2012): Der Geotektonische Atlas von Niedersachsen und dem deutschen Nordseesektor als geologisches 3D-Modell. – GMIT, **48**: 6-13.
- Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G. & Schramm, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben Teil 3 – Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. – Geologisches Jahrbuch, Reihe **C 73**: 1-211.
- Brandes, J. & Obst, K. (2009): Isobathenkarte für den Aquiferkomplex Mittlerer Buntsandstein in NE-Deutschland. – Brandenburgische geowissenschaftliche Beiträge, **16**: 19-28.
- Cartwright, J. A., James, D. & Bolton, A. (2003): The genesis of polygonal fault systems: a review. – In: Van Rensbergen, P., Hillis, R. R., Maltman, A. J. & Morley, C. K. [Hrsg.] – Subsurface Sediment Mobilization, Special Publication, **216**: 223-243; London (Geological Society London, Special Publication).
- Chadwick, A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S. & Zweigel, P. (2008): Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers – observations and guidelines from the SACS and CO₂STORE projects. – British Geological Survey Occasional Publication, **14**: 1-267.
- Christensen, N. & Holloway, S. (2004): Geological storage of CO₂ from combustion of fossil fuel. – European Union Fifth Framework Programme for Research and Development. Project No. ENK6-CT-1999-00010, Summary Report: 1-15.
- Doornenbal, J. C. & Stevenson, A. G. [Hrsg.] (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area. – 341 S.; Houten (EAGE Publications b.v.).
- Feist-Burkhardt, S., Götz, A. E., Szulc, J., Borkatharia, R., Geluk, M., Haas, J., Hornung, J., Jordan, P., Kempf, O., Michalik, J., Nawrocki, J., Reinhard, L., Ricken, W., Röhling, H. G., Rüffer, T., Török, A. & Zuhlke, R. (2008): Triassic. – In: McCann, T. [Hrsg.] – The Geology of Central Europe: 749-821; London (The Geological Society of London).
- Gast, R. (1988): Rifting im Rotliegenden Niedersachsens. – Die Geowissenschaften, **6** (4): 115-122.
- Gast, S., Wirth, H., Fischer, M. & Weber, K. (2012): Planungsgrundlagen und geologische Informationen für die Entwicklung potenzieller CO₂-Speichervorhaben (COOSKA). – 45 S., Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- Geluk, M. & Röhling, H.-G. (1997): High-resolution sequence stratigraphy of the Lower Triassic 'Buntsandstein' in the Netherlands and northwestern Germany. – Geologie en Mijnbouw, **76** (3): 227-246.

- Geluk, M. C. (2005): Stratigraphy and tectonics of Permo-Triassic basins in the Netherlands and surrounding areas, 171 S., Dissertation, Utrecht University.
- Gerling, J. P. (2008): Geologische CO₂-Speicherung als Beitrag zur nachhaltigen Energieversorgung. – *Bergbau*, **10**: 472-475.
- Groß, U. (1986): Gaspotential Deutsche Nordsee – Die regionale Verteilung der seismischen Anfangsgeschwindigkeiten in der Deutschen Nordsee. – 58 S., Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- Hable, R., Kaufhold, H., Liebsch-Dörschner, T. & Thomsen, C. (2011): Endbericht Speicher-Kataster Deutschland für die Bundesländer Hamburg und Schleswig Holstein. – Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; Flintbek.
- Holloway, S., Rochelle, C., Bateman, K., Pearce, J., Baily, H. & Metcalfe, R. (1996): The underground disposal of carbon dioxide: Final report. – 355 S., report; Nottingham (British Geological Survey).
- Hoth, P., Wirth, H., Reinhold, K., Bräuer, V., Krull, P. & Feldrappe, H. (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands: Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. – 124 S., Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Berlin/Hannover.
- Huckriede, H., Zander, I. (2011): Geologische Charakterisierung der Speicher- und Barrieregesteine im tiefen Untergrund des Freistaats Thüringen (Deutschland). – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, **74**: 188-204.
- Jähne, F., Weitkamp, A., Wolf, M. & Steuer, S. (2013): Structural evolution of the Triassic within the German North Sea sector. – Tagungsband Sedimentary Basins Jena: 49 S.
- Jaritz, W., Best, G., Hildebrand, G. & Jürgens, U. (1979): Regionale Analyse der seismischen Geschwindigkeiten in Nordwestdeutschland. – 37 S., Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- Jeremiah, J., Duxbury, S. & Rawson, P. (2010): Lower Cretaceous of the southern North Sea Basins: reservoir distribution within a sequence stratigraphic framework. – *Netherlands Journal of Geosciences – Geologie en Mijnbouw*, **89** (3-4): 203-237.
- Kaufmann, D., Heim, S., Jähne, F., Steuer, S., Bebiolka, A., Wolf, M. & Kuhlmann, G. (2014): GSN – Generalisiertes, erweitertes Strukturmodell des zentralen deutschen Nordsee-Sektors – Konzept zur Erstellung einer konsistenten Datengrundlage für weiterführende Modellierungen im Bereich des zentralen deutschen Nordsee-Sektors. – Zweite überarbeitete Auflage. – 30 S., Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- Kley, J., Franzke, H.-J., Jähne, F., Krawczyk, C., Lohr, T., Reicherter, K., Scheck-Wenderoth, M., Sippel, J., Tanner, D. & van Gent, H. (2008): Strain and Stress. – In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D. & Nelskamp, S. [Hrsg.] – *Dynamics of complex intracontinental basins. The Central European Basin System*: 97-124; Berlin (Springer).
- Knopf, S. (2011): Verbreitung und Charakterisierung von tiefliegenden Speicher- und Barrierehorizonten in Niedersachsen und Bremen. – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, **74**: 127-147.
- Knopf, S., May, F., Müller, C. & Gerling, J. P. (2010): Neuberechnung möglicher Kapazitäten zur CO₂-Speicherung in tiefen Aquifer-Strukturen. – *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, **60** (4): 76-80.
- Kockel, F. (1995): Structural and palaeogeographical development of the German North Sea sector – Beiträge zur regionalen Geologie der Erde. – 96 S.; Stuttgart (Gebrüder Bornträger).
- Kombrink, H., ten Veen, J. & Geluk, M. (2012): Exploration in the Netherlands, 1987-2012. – *Netherlands Journal of Geosciences – Geologie en Mijnbouw*, **91** (4): 403-418.

- Lutz, R., Kalka, S., Gaedicke, C., Reinhardt, L. & Winsemann, J. (2009): Pleistocene tunnel valleys in the German North Sea: spatial distribution and morphology [Pleistozäne Rinnen in der deutschen Nordsee: Verbreitung und Morphologie]. – Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, **160** (3): 225-235.
- May, F., Brune, S., Gerling, J. P. & Krull, P. (2003): Möglichkeiten zur untertägigen Speicherung von CO₂ in Deutschland – Eine Bestandsaufnahme. – Geotechnik, **26** (3): 162-172.
- May, F., Müller, C. & Bernstone, C. (2005): How much CO₂ can be stored in deep saline aquifers in Germany? – VGB powertech, **85** (6): 32-37.
- Osman, A., Pollok, L., Brandes, C. & Winsemann, J. (2013): Sequence stratigraphy of a Paleogene coal bearing rim syncline: interplay of salt dynamics and sea-level changes, Schöningen, Germany. – Basin Research, **25** (6): 675-708.
- Overeem, I., Weltje, G., Bishop-Kay, C. & Kroonenberg, S. (2001): The Late Cenozoic Eridanos delta system in the Southern North Sea Basin: a climate signal in sediment supply? – Basin Research, **13** (3): 293-312.
- Plein, E. (1995): Stratigraphie von Deutschland I: Norddeutsches Rotliegendebcken, Rotliegend-Monographie Teil 2. – Courier Forschungsinstitut Senckenberg, **183**: 1-193.
- Preuss, H., Vinken, R. & Voss, H.-H. (1991): Symbolschlüssel Geologie - Symbole für die Dokumentation und Automatische Datenverarbeitung geologischer Feld- und Aufschlußdaten. – 328 S., Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- Reinhold, K., Krull, P. & Kockel, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands 1:500 000. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Berlin/Hannover.
- Reinhold, K. & Müller, C. (2011): Speicherpotenziale im tieferen Untergrund – Übersicht und Ergebnisse zum Projekt Speicher-Kataster Deutschland. – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, **74**: 9-27.
- Röhling, H.-G. & Gast, R. E. (1991): A lithostratigraphic subdivision of the Lower Triassic in the Northwest German Lowlands and the German sector of the North Sea, based on gamma-ray and sonic logs. – 31 S., Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- Röhling, H. G. (1988): Paläogeographie des Unteren und Mittleren Buntsandsteins im Nordwestdeutschen Becken. BMFT-Förderungsvorhaben Nr. 03E 6336 A. – 107 S., Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- Stollhofen, H., Bachmann, G., Barnasch, J., Bayer, U., Beutler, G., Franz, M., Kästner, M., Legler, B., Mutterlose, J. & Radies, D. (2008): Upper Rotliegend to Early Cretaceous basin development. – In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D. & Nelskamp, S. [Hrsg.] – Dynamics of complex intracontinental basins. The Central European Basin System: 181-210; Berlin (Springer).
- ten Veen, J., van Gessel, S. & den Dulk, M. (2012): Thin - and thick-skinned salt tectonics in the Netherlands: a quantitative approach. – Netherlands Journal of Geosciences, **91** (4): 447-464.
- Thöle, H., Gaedicke, C., Kuhlmann, G. & Reinhardt, L. (2014): Late Cenozoic sedimentary evolution of the German North Sea – A seismic stratigraphic approach. – Newsletters on Stratigraphy, **47** (3): 299-329.
- Vangkilde-Pedersen, T., Kirk, K., Smith, N., Maurand, N., Wojcicki, A., Neele, F., Hendriks, C. A., Le Nindre, Y.-M. & Lyng Anthonsen, K. (2009): Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide. – the EU GeoCapacity Project. – Energy Procedia, **1**: 2663-2670.
- Vejbaek, O. V. & Andersen, C. (1987): Cretaceous-Early Tertiary inversion tectonism in the Danish Central Trough. – Tectonophysics, **137**: 221-238.

- Vejbaek, O. V. & Andersen, C. (2002): Post Mid-Cretaceous Inversion Tectonics in the Danish Central Graben – regionally synchronous tectonic events? – Bulletin of the Geological Society of Denmark, **49**: 139-144.
- Vejbaek, O. V., Bidstrup, T., Britze, P., Erlström, M., Rasmussen, E. S. & Sivhed, U. (2007): Chalk depth structure maps, Central to Eastern North Sea, Denmark. – Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin, **13**: 9-12.
- Warren, J. K. (2006): Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons. – 1035 S.; Berlin (Springer).
- Wolf, M., Steuer, S., Bebiolka, A., Jähne, F., Kaufmann, D. & Weitkamp, A. (2014): 3D-Lithofaziesmodell des Buntsandstein in der zentralen deutschen Nordsee. – 37 S., Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- Ziegler, P. A. (1990): Geological Atlas of Western and Central Europe. – 130 S.; Amsterdam (Shell Internationale Petroleum Maatschappij B.V.; Elsevier).

7. Abkürzungsverzeichnis

AWZ	Ausschließliche Wirtschaftszone
BK	Barrierekomplex
CAD	Computer Aided Design (rechnerunterstütztes Konstruieren)
DNS	Deutscher Nordsee-Sektor
GPDN	Projekt Geopotenzial Deutsche Nordsee (www.gpdn.de)
GSN	Generalisiertes, erweitertes Strukturmodell des zentralen deutschen Nordsee-Sektors
GTA	Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor
GTA-3D	Der Geotektonische Atlas von Niedersachsen und dem deutschen Nordsee-Sektor als geologisches 3D-Modell
NI	Niedersachsen
SH	Schleswig-Holstein
SPBA	Southern Permian Basin Atlas
SK	Speicherkomplex
TWT	Two Way Travel Time
WGS	World Geodetic System

Verwendete stratigraphische Kurzbezeichnungen:

ro	Oberrotliegend	mm	Mittlerer Muschelkalk
z	Zechstein	mo	Oberer Muschelkalk
su	Unterer Buntsandstein	ku	Unterer Keuper
sm	Mittlerer Buntsandstein	km	Mittlerer Keuper
smV	Volpriehausen-Formation	ko	Oberer Keuper
smD	Dethfurth-Formation	ju	Unterjura (Lias)
smH	Hardeggen-Formation	jm	Mitteljura (Dogger)
smS	Solling-Formation	jo	Oberjura (Malm)
so	Oberer Buntsandstein (Röt)	kru	Unterkreide
soS	Röt-Salinar	kro	Oberkreide
soT	Röt-Ton	MMU	Mittel-Miozän-Diskordanz
mu	Unterer Muschelkalk		

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über den deutschen Nordsee-Sektor und die Lage der Fallstudienregion.	3
Abbildung 2: Die Abbildung zeigt die Lage und Zuordnung der neun Strukturräume zu tektonischen Großstrukturen (Blau: Graben- und Beckenbereiche, Braun: Plattformgebiete, Gelb: Hochlage, Grün: teils stark gestörte Übergangsbereiche). Der Verlauf der drei geologischen Übersichtsprofile aus Abbildung 3 ist zusätzlich dargestellt.	6
Abbildung 3: Geologische Profile auf Basis des GSN und GTA-3D. Profile 1, 2 und 3 verlaufen jeweils über das südliche, zentrale und nördliche Untersuchungsgebiet in etwa von Westen nach Osten. Eine 3D-Ansicht (unterhalb von Profil 2) der Basis Zechstein (basierend auf GSN) und der Profilverläufe dient zur Korrelation der in den Profilen dargestellten Strukturen. Die Anzahl der untersuchten Komplexe nimmt nach Westen deutlich ab. Die Profile verdeutlichen weiterhin den Einfluss der Salzstrukturentwicklung auf den Strukturbau des Deckgebirges. Die Unterkreide-Diskordanz, im Liegenden des Barrierekomplex Unterkreide (BK kru), schneidet nach Westen zunehmend in die liegenden frühtriassischen bis paläozoischen Abfolgen (Profile 2 und 3). Weitläufige Trends in der Mächtigkeit der Komplexe sind aus den Profilen zu entnehmen (nach Osten Mächtigkeitszunahme des SK ro ; Profile 1 und 2). Auffallend ist, dass es sowohl Gebiete gibt, die tief versenkt wurden und stark gestört sind (z. B. Horn-Graben) als auch kaum gestörte Plattformgebiete (z. B. Westschleswig-Block).....	7
Abbildung 4: Darstellung der an der Basis der Solling-Formation austreichenden Abfolgen (verändert nach Röhling 1988).....	10
Abbildung 5: Darstellung der an der Basis Unterkreide austreichenden Abfolgen (verändert nach Baldschuhn et al. 2001). Die Variabilität der anstehenden Einheiten verdeutlicht den nach Westen zunehmenden Einfluss der Unterkreide-Diskordanz.....	11
Abbildung 6: Salzstrukturen im Untergrund der deutschen Nordsee (Reinhold et al. 2008). Bezogen auf die dargestellten Strukturräume unterscheiden sich die Strukturrichtung, Genese und Geometrie von Salzstrukturen teilweise deutlich.....	12
Abbildung 7: Lage der im Projekt GPDN verwendeten seismischen Linien und Tiefbohrungen.	13
Abbildung 8: Tiefenlage am Top (A), Mächtigkeit (B) und Untersuchungswürdigkeit (C) des Speicherkomplexes Oberrotliegend.	19
Abbildung 9: Tiefenlage an der Basis (A), Mächtigkeit (B) und Untersuchungswürdigkeit (C) des Barrierekomplexes Zechstein.	21
Abbildung 10: Tiefenlage am Top (A), Mächtigkeit (B) und Untersuchungswürdigkeit (C) des Speicherkomplexes Mittlerer Buntsandstein.	23
Abbildung 11: Tiefenlage an der Basis (A), Mächtigkeit (B) und Untersuchungswürdigkeit (C) des Barrierekomplexes Oberer Buntsandstein.	25
Abbildung 12: Untersuchungswürdigkeit des Speicherkomplexes Rhätkeuper.....	26
Abbildung 13: Tiefenlage an der Basis (A), Mächtigkeit (B) und Untersuchungswürdigkeit (C) des Barrierekomplexes Unterjura.....	29
Abbildung 14: Tiefenlage am Top (A), Mächtigkeit (B) und Untersuchungswürdigkeit (C) des Speicherkomplexes Mitteljura.....	30
Abbildung 15: Tiefenlage an der Basis (A), Mächtigkeit (B) und Untersuchungswürdigkeit (C) des Barrierekomplexes Unterkreide.....	32

Abbildung 16: Schematischer Aufbau der betrachteten geologischen Fallentypen. Diese sind den Fallentypen strukturelle Falle und stratigraphische Falle (für den Typ Erosionsdiskordanz-Falle) zuzuordnen. Im zentralen deutschen Nordsee-Sektor sind häufig Fallen vorhanden, die eine Kombination aus den vier aufgeführten Grundtypen darstellen. Die Fallensituation beschreibt die Kombination aus einem Speicherkomplex und den assoziierten Barrierekomplexen in Verbindung mit dem Fallentyp. Die Fallenposition markiert den Bereich, in dem sich gespeicherte Fluide anreichern würden.	35
Abbildung 17: Lage der ausgewählten Fallstudienregion. Dargestellt ist die Blockkennung in der AWZ.....	47
Abbildung 18: Lage der verwendeten reflexionsseismischen Linien und Bohrungen in der Fallstudienregion. Die Umrissse der Salzstrukturen stammen aus Reinhold et al. (2008).....	47
Abbildung 19: Salzstrukturen im Bereich der Fallstudienregion (stammen aus Reinhold et al. 2008).....	48
Abbildung 20: Ausweisung möglicher Speicherstrukturen nach stratigraphischen Positionen im Projekt GeoCapacity (Vangkilde-Pedersen et al. 2009). Die Umrissse der Salzstrukturen stammen aus Reinhold et al. (2008).	48
Abbildung 21: Exemplarischer Ablauf der Konstruktion von geologischen Profilen. Diese basieren auf Horizonten und Störungen, die in 2D-seismischen Profilen (1) mithilfe der Software GeoFrame interpretiert wurden (2). Auf dieser Grundlage wurden die geologischen Profile (Abbildung 22) konsistent konstruiert (3).	49
Abbildung 22: Profilschnitte (links 1 bis 3) senkrecht zum Streichen der Salzstrukturen und zwei Profilschnitte (4 & 5) quer dazu in etwa im Verlauf von Randsenken (rechts). Die Profilverläufe werden durch eine Übersichtskarte verdeutlicht (unten rechts, Salzstrukturen stammen aus Reinhold et al. 2008). Die Störungsdichte im Grundgebirge nimmt anscheinend nach Süden hin zu (Profil 3). Im Deckgebirge treten Störungen verstärkt im Bereich von Salzstrukturen auf. Häufig wechselnde Störungscharakteristika entlang des Verlaufes einiger Störungszonen im Grund- und Deckgebirge lassen für diese größere Blattverschiebungsanteile vermuten. Die Störung unter der Salzmauer Lisa (Profil 2 und 3) zeigt entlang ihres Verlaufes sowohl Blattverschiebungsanteile als auch große Abschiebungsversätze. Der Einfluss der Erosion an der Basis Unterkreide und entlang der Mittel-Miozän-Diskordanz auf den Strukturbau in der Fallstudienregion ist deutlich sichtbar. Mehrere Störungen in Profil 4 und 5 sind aufgrund von Anschnitteffekten nur mit einem scheinbaren Einfallen dargestellt.	53
Abbildung 23: Vertikale Mächtigkeit des Speicherkomplex Oberrotliegend.....	55
Abbildung 24: Quartäre Rinnensysteme im Bereich der Fallstudienregion nach Lutz et al. (2009).	57
Abbildung 25: Tiefenlage und Verbreitung der Basis Oberrotliegend.	59
Abbildung 26: Tiefenlage und Verbreitung der Basis Zechstein.	60
Abbildung 27: Lithologieverteilung an der Basis und im mittleren Bereich des Unteren Buntsandstein (Wolf et al. 2014).	61
Abbildung 28: Tiefenlage und Verbreitung der Basis Unterer Buntsandstein.....	61
Abbildung 29: Lithologieverteilung der Volpriehausen-Formation in der Fallstudienregion.	63
Abbildung 30: Tiefenlage und Verbreitung der Basis Volpriehausen-Formation.	63
Abbildung 31: Lithologieverteilung der Detfurth/Hardegsen-Formation.	64
Abbildung 32: Tiefenlage und Verbreitung der Basis Detfurth/Hardegsen-Formation.....	64
Abbildung 33: Lithologieverteilung an der Basis und am Top der Solling-Formation.	65
Abbildung 34: Tiefenlage und Verbreitung der Basis Solling-Formation.	65
Abbildung 35: Lithologieverteilung des Röt-Salz.....	66

Abbildung 36: Tiefenlage und Verbreitung der Basis Röt-Salz.....	67
Abbildung 37: Lithologieverteilung des Röt-Ton.	67
Abbildung 38: Tiefenlage und Verbreitung der Basis Röt-Ton.....	68
Abbildung 39: Tiefenlage und Verbreitung der Basisflächen stratigraphischer Einheiten vom Unteren Muschelkalk bis zum Oligozän.	69
Abbildung 40: Tiefenlage und Verbreitung der Mittel-Miozän-Diskordanz.....	71
Abbildung 41: Gegenüberstellung der Tiefenlage der Basis Oberrotliegend in der Neukartierung (links) und einer Darstellung auf Basis des GTA (rechts). Diapirausbisse, Störungen und Verbreitungsgrenzen basieren auf Daten der Neukartierung und sind zum besseren Vergleich auch auf den Karten des GTA dargestellt. Gleiches gilt auch für die folgenden Abbildungen.....	72
Abbildung 42: Gegenüberstellung der Tiefenlage der Basis Zechstein in der Neukartierung (links) und des GTA (rechts, Baldschuhn et al. 2001).....	73
Abbildung 43: Gegenüberstellung der Tiefenlage der Basis Unterer Buntsandstein in der Neukartierung (links) und des GTA (rechts, Baldschuhn et al. 2001).	74
Abbildung 44: Gegenüberstellung der Tiefenlage der Basis Röt (Salz) der Neukartierung (links) und des GTA (rechts, Baldschuhn et al. 2001).	74
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Tiefenlage der Basis Keuper in der Neukartierung (links) und des GTA (rechts, Baldschuhn et al. 2001).	74
Abbildung 46: Gegenüberstellung der Tiefenlage der Basis Unterkreide in der Neukartierung (links) und des GTA (rechts, Baldschuhn et al. 2001).....	75
Abbildung 47: Gegenüberstellung der Tiefenlage der Basis Oberkreide in der Neukartierung (links) und des GTA (rechts, Baldschuhn et al. 2001).....	75
Abbildung 48: Lage der untersuchten Struktur. Zum Vergleich sind die nach GeoCapacity ausgewiesenen potenziellen Speicherstrukturen im Oberrotliegend dargestellt. Auf Basis der seismischen Neukartierung der Basis Zechstein (Abbildung 37) sind diese Strukturen nur noch bedingt nachvollziehbar.....	80
Abbildung 49: Schematische 3D-Ansicht der untersuchten Speicherstruktur mit Blick nach SSW. Der leistenförmige Aufbau dieser Horststruktur und die östliche der begrenzenden Abschiebungen sind deutlich zu erkennen. Die Farbgebung soll beispielhaft eine lithologische Wechsellagerung des Oberrotliegend andeuten, entspricht jedoch nicht unbedingt den lithologischen Gegebenheiten.	80
Abbildung 50: Tiefenlage des Tops der Speicherstruktur.	82
Abbildung 51: Effektive Mächtigkeit des Speichergesteins innerhalb der Speicherstruktur (oberhalb „spill-point“).....	83

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die Tabelle zeigt die stratigraphische Abfolge und die Ausweisung von Speicher- und Barrierekomplexen in der zentralen deutschen Nordsee (DNS), Niedersachsen (NI) und Schleswig-Holstein (SH). Die Unterschiede resultieren aus landesspezifischen Annahmen.....	16
Tabelle 2: Wesentliche geologische Attribute von Speicher- und Barrierekomplexen innerhalb der neun Strukturräume der zentralen deutschen Nordsee.	37
Tabelle 3: Typische Fallensituationen in den neun Strukturräumen der zentralen deutschen Nordsee.	39
Tabelle 4: Die Häufigkeit einer spezifischen Fallensituation bezogen auf die neun Strukturräume der deutschen zentralen Nordsee mit Angabe der jeweils assoziierten Fallentypen.	40
Tabelle 5: Auflistung der stratigraphischen Einheiten und der in den Bohrungen der Fallstudienregion erteuften Speicher- oder Barrierehorizonte. Gelb markierte Kästchen zeigen Speicherhorizonte, beige-grüne Kästchen verweisen auf Barrierehorizonte. Beige-grüne Kästchen mit Schraffur heben gesondert Barrierhorizonte mit tonmergeligen Anteilen hervor. Die weiße Schraffur markiert nicht abgelagerte oder erodierte Abfolgen. Die weißen Kästchen zeigen, dass die Lithologien der jeweiligen stratigraphischen Einheit das Kriterium für die Ausweisung als Speicher- oder Barrierehorizont nicht erfüllen.....	77
Tabelle 6: Parameterwerte und Resultate der Speicherkapazitätsberechnung.	82

Anhang

Auflistung und Kurzbeschreibung der identifizierten Fallensituationen

Aufbau des verwendeten Benennungsschlüssel:

- Die jeweilige Kurzbezeichnung des Speicherkomplexes (**SK**) bildet den Anfang und wird durch einen Gedankenstrich von den im direkt Hangenden folgenden Barrierekomplexen (**BK**) getrennt. Für die Benennung der Einheiten werden die stratigraphischen Kurzbezeichnungen nach Preuss et al. (1991) verwendet (z. B. Mittlerer Buntsandstein = *sm*) => z. B.: **SK sm – BK so**.
- Um zwischen dem Barrierekomplex Zechstein in söhlicher (**BK z**) oder in saigerer Lagerung (als begrenzende Salzstruktur z. B. durch einen Salzdiapir) zu unterscheiden, wird der Barrierekomplex in saigerer Lagerung mit der Bezeichnung **BK z(diapir)** gekennzeichnet.
=> z. B.: **SK sm – BK so/BK z(diapir)/BK kru**
- In Fällen, in denen ein **SK** von mehreren **BK** begrenzt wird, werden die beteiligten **BK** aufgezählt und durch einen Schrägstrich (/) ohne Leerzeichen voneinander getrennt.
=> z. B.: **SK sm – BK so/BK kro**.

SK ro – BK z

Fallentyp	störungsgebundene Falle	<p>(1.) X Fallenposition</p>	
Vorkommen in den Strukturräumen	- Gesamte zentrale Deutsche Nordsee		<p>(2.) X Fallenposition</p>
Aufbau / Auftreten	<p>Variante 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Störungsgebundene Falle des SK ro innerhalb einer Horststruktur - Lateral meist durch eine oder zwei Störungen begrenzt, seltener vollständig von gestörten Bereichen umschlossen - Meist deutlich längsgestreckte, leistenförmige Fallenstruktur <p>Variante 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Im Hangenden von listrischen Abschiebungen mit größeren Versätzen - Meist entlang von Halbgräben - Störungsgebundene kleinere Antiklinal-Strukturen („rollover“ Antiklinale) 		

SK ro – BK z/BK kru

Fallentyp	Kombination aus störungsgebundener Falle & Erosionsdiskordanz-Falle	<p>X <i>Fallenposition</i> - - - - <i>Erosionsdiskordanz</i></p>
Vorkommen in den Strukturräumen	- Typisch für Schillgrund-Hoch	
Aufbau / Auftreten	<ul style="list-style-type: none"> - Störungsgebundene Falle des SK ro innerhalb einer Horst-Hochlage - SK ro im Top entlang der Unterkreide-Diskordanz erodiert - Lateral meist durch eine oder zwei Störungen begrenzt, seltener vollständig von gestörten Bereichen umschlossen - Meist deutlich längsgestreckte, leistenförmige Fallenstruktur 	

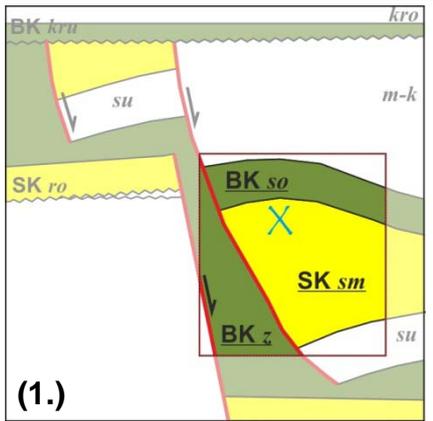
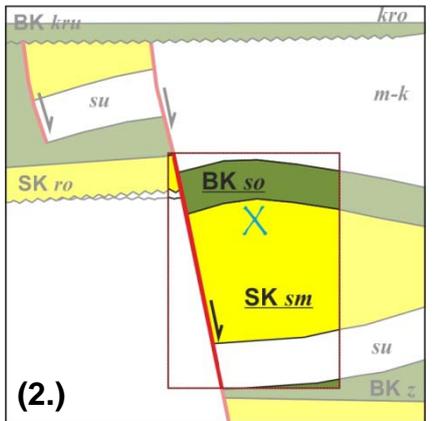
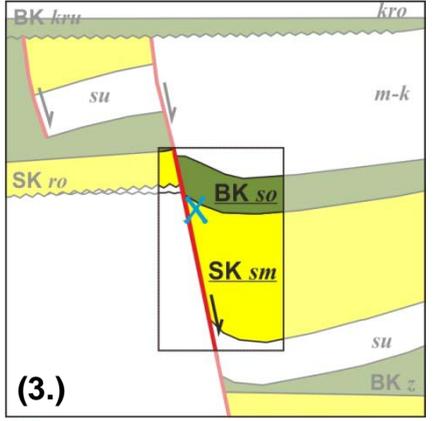
SK sm – BK so

Fallentyp	Antiklinal-Falle	<p>X <i>Fallenposition</i></p>
Vorkommen in den Strukturräumen	<ul style="list-style-type: none"> - Häufige Fallensituation - Typisch für Plattformgebiete (G- & L-Plattform, Westschleswig-Block) 	
Aufbau / Auftreten	<ul style="list-style-type: none"> - Antiklinalstruktur über einem Zechstein-Salzkissen - SK sm konkordant vom BK so überlagert - Kreisförmige bis elliptische Strukturen in Tiefenlagekarten der Trias 	

SK sm – BK so/BK z(diapir)

Fallentyp	Diapir-Falle	<p>X <i>Fallenposition</i></p>
Vorkommen in den Strukturräumen	<ul style="list-style-type: none"> - Häufige Fallensituation - Ist in allen Strukturräumen bis auf Hochlagen und Plattformen vertreten - Z. B. Ostfriesland-Emsmündungs-Region 	
Aufbau / Auftreten	<ul style="list-style-type: none"> - Entlang von Diapirflanken (BK z(diapir)) teils steil einfallende Abfolgen aus SK sm und konkordant überlagernden BK so - Schichten des SK sm und des BK so durch steil einfallende Grenzfläche eines Zechstein-Diapirs (BK z(diapir)) begrenzt 	

SK *sm* – BK *so* / (BK *z*)

Fallentyp	störungsgebundene Falle	
Vorkommen in den Strukturräumen	<ul style="list-style-type: none"> - Seltene Fallensituation - Vorwiegend entlang der westlichen Flanke des Horn-Graben 	(1.) X <i>Fallenposition</i>
Aufbau / Auftreten	<ul style="list-style-type: none"> - Im Hangenden von Abschiebungen mit sehr große Versätzen - Die Ausprägung der Falle kann mit dem Störungsverlauf zwischen den drei dargestellten Varianten wechseln - Je nach Kinematik der Störungen liegen andere Abrissgeometrien im Hangendblock vor und damit verbunden andere Geometrien der Falle - SK <i>sm</i> wird konkordant von BK <i>so</i> überlagert. In Variante 1 wird der SK <i>sm</i> entlang einer Störung vom BK <i>z</i> begrenzt 	
	<p>Variante 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> - In Bereichen in denen das Zechsteinsalz die Deformation im Grund- und Deckgebirge entkoppelt hat, kann es zur Ausbildung eines sogenannten „salt rollover“ im Deckgebirge kommen - Zwischen dem Störungsabbriss im Prä-Zechstein und dem im Deckgebirge ist Zechsteinsalz intrudiert 	(2.) X <i>Fallenposition</i>
	<p>Variante 2 & 3:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Eine größere Störung, die vom Grundgebirge bis ins Deckgebirge zu verfolgen ist - Die Fallenposition befindet sich entweder in steil aufgestellten Abfolgen entlang der Störung (<i>Variante 3</i>) oder in einer störungsgebundenen Antiklinalstruktur (<i>Variante 2</i>) 	
(3.) X <i>Fallenposition</i>		

SK sm – BK so/BK kru

Fallentyp	Kombination aus Antiklinal-Falle & Erosionsdiskordanz-Falle	
Vorkommen in den Strukturräumen	<ul style="list-style-type: none"> - Häufige Fallensituation - Typisch für den südwestlichen Westschleswig-Block, den südlichen Ausläufer des Horn-Graben und die G- & L-Plattform - Die Verteilung ist durch den Grad der Erosion entlang der Unterkreide-Diskordanz und durch das Tiefenniveau der triassischen Ablagerungen bestimmt 	<p>X Fallenposition ~~~ Erosionsdiskordanz</p>
Aufbau / Auftreten	<ul style="list-style-type: none"> - Eine im Top, entlang der Unterkreide-Diskordanz (BK kru), erodierte Aufwölbung des SK sm und BK so - Überwiegend an Salzkissen gebunden - Je nach dem Einfallen der Flanken der Salzkissen ist eine meist deutliche Winkeldiskordanz zum überlagernden BK kru ausgebildet 	

SK sm – BK so/BK z(diapir)/BK kru

Fallentyp	Kombination aus Diapir-Falle & Erosionsdiskordanz-Falle	
Vorkommen in den Strukturräumen	<ul style="list-style-type: none"> - Typisch für die Übergangsbereiche zwischen Plattformen und tief versenkten Becken- oder Grabenbereichen - Z. B. Ostfriesland-Emsmündungs-Region 	<p>X Fallenposition ~~~ Erosionsdiskordanz</p>
Aufbau / Auftreten	<ul style="list-style-type: none"> - Eine Abwandlung der Fallensituation SK sm – BK so/BK z(diapir) - Einschneiden der Unterkreide-Diskordanz im Top des SK sm 	

SK sm – BK z(diapir)/BK kru

Fallentyp	Kombination aus Diapir-Falle & Erosionsdiskordanz-Falle	
Vorkommen in den Strukturräumen	- Vermutlich nur entlang von Diapiren auf der G- & L-Plattform	
Aufbau / Auftreten	<ul style="list-style-type: none"> - Sehr tiefer Einschnitt der Unterkreide-Diskordanz entlang von Salzdiapirflanken (BK z(diapir)) - Vom Mittleren Buntsandstein (SK sm) sind oft nur die Volpriehausen- und Detfurth-Formation erhalten - Erosionsdiskordanz im Liegenden des BK kru nur teilweise als deutliche Winkeldiskordanz zum SK sm ausgebildet 	

SK sm – BK kru

Fallentyp	Kombination aus Antiklinal-Falle & Erosionsdiskordanz-Falle	
Vorkommen in den Strukturräumen	- Fallensituation vermutlich nur auf der G- & L-Plattform vertreten	
Aufbau / Auftreten	<ul style="list-style-type: none"> - Aufwölbung im Top von Salzkissen - Sehr tiefer Einschnitt der Unterkreide-Diskordanz in die Abfolgen des SK sm - Meist sind mit der Volpriehausen- und Detfurth-Formation nur die unteren Abfolgen des SK sm erhalten - BK kru mit kaum ausgeprägter Winkeldiskordanz im Hangenden des Mittleren Buntsandstein 	

SK ko – BK ju

Fallentyp	Antiklinal-Falle	
Vorkommen in den Strukturräumen	<ul style="list-style-type: none"> - Seltene Fallensituation - Vermutlich nur im Strukturräum westliche Ausläufer des Glückstadt-Graben vorhanden 	
Aufbau / Auftreten	<ul style="list-style-type: none"> - SK ko konkordant vom BK ju überlagert - Aufwölbung vermutlich im Zusammenhang mit der Genese angrenzender Salzdiapire und Randsenken entstanden 	

SK ko – BK ju/BK z(diapir)

Fallentyp	Diapir-Falle	
Vorkommen in den Strukturräumen	- In halotektonisch geprägten Becken- und Grabenbereichen mit deutlich erhöhter Subsidenz während des Mesozoikum	
Aufbau / Auftreten	<ul style="list-style-type: none"> - Die teils steil aufsteigende Abfolge aus SK ko und konkordant überlagernden BK ju wird durch eine steil einfallende (70 – 90°) Diapirflanke (BK z(diapir)) begrenzt - Tritt häufig an Salzmauern auf 	

SK ko - BK ju/BK kru

Fallentyp	Erosionsdiskordanz-Falle	
Vorkommen in den Strukturräumen	- In halotektonisch geprägten Becken- und Grabenbereichen mit deutlich erhöhter Subsidenz während des Mesozoikum	
Aufbau / Auftreten	<ul style="list-style-type: none"> - Eine von der Unterkreide-Diskordanz gekappte Salzstruktur-Randsenke - Der SK ko wird unterhalb dieser Diskordanz konkordant vom BK ju überlagert - An den Außenrändern der Randsenke begrenzt im Top der diskordant auflagernde BK kru die Fallensituation - Unterschiedlich stark ausgeprägte Winkeldiskordanz im Top 	

SK jm – BK kru

Fallentyp	Erosionsdiskordanz-Falle	
Vorkommen in den Strukturräumen	<ul style="list-style-type: none"> - Selten & in halotektonisch geprägten Becken- und Grabenbereichen mit deutlich erhöhter Subsidenz während des Mesozoikum - In den westlichen Ausläufern des Glückstadt-Graben - Möglicherweise im Strukturraum nördliches nordwestdeutsches Becken & Pompeckj-Block 	
Aufbau / Auftreten	<ul style="list-style-type: none"> - Eine von der Unterkreide-Diskordanz gekappte Aufwölbung zwischen angrenzenden Salzstrukturen - Der winkeldiskordant aufliegende BK kru schließt die Falle im Top ab 	

SK jm – BK kru/BK z(diapir)

<p>Fallentyp</p>	<p>Kombination aus Diapir-Falle & Erosionsdiskordanz-Falle</p>	
<p>Vorkommen in den Strukturräumen</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Seltene Fallensituation - Im Strukturraum westliche Ausläufer des Glückstadt-Graben - Möglicherweise im Strukturraum nördl. nordwestdeutsches Becken & Pompeckj-Block vorhanden 	
<p>Aufbau / Auftreten</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Im Bereich von Diapiren (BK z(diapir)) wurden die Schichten des SK jm und des diskordant überlagernden BK kru teils steil gestellt - Zwischen dem SK jm und dem BK kru ist häufig eine deutliche Winkeldiskordanz ausgebildet 	