

Geologisches 3D-Modell der Quartärbasis von Niedersachsen

Zwischenbericht 2025



Niedersachsen

Titelbild

Screenshot des 3D-Modells der Quartärbasis für die ersten sechs Kacheln in Nordwestniedersachsen (Aspen SKUA® V14.5). Landesfläche von Niedersachsen 1 : 250 000 © GeoBasis-DE / BKG 2015 (Daten verändert).

Informationen zum Projekt

Projekt:	Erstellung eines aktualisierten geologischen 3D-Modells der Quartärbasis von Niedersachsen
Projektleitung:	Janine Meinsen
Autoren:	Janine Meinsen, Dr. Cornelia Wangenheim, Dr. Ines Bruns, Marcus Helms, Sabine Sattler, Kerstin Fischer, Dr. Robert Schöner
Unter Mitwirkung von:	Alexander Engeler, Guntram Herrendorf, Jörn Kasch, Asdis Keßel, Dr. Roberto Pierau, Edgars Rudzitis, Heike Schönfeld
Projektlaufzeit:	seit 2021
Berichtsdatum:	April 2025

Zitierweise

Modell:	LBEG (2026): Geologisches 3D-Modell der Quartärbasis von Niedersachsen, <i>ggf. Kachel [Kachelkürzel (Kachelname)]</i> – NIBIS® Kartenserver, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover, <i>ggf. Link (URL) und Datum des Abrufs</i>
Zwischenbericht:	Meinsen, J., Wangenheim, C., Bruns, I., Helms, M., Sattler, S., Fischer, K., Schöner, R. (2026): Geologisches 3D-Modell der Quartärbasis von Niedersachsen – Zwischenbericht 2025 – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), 25 Seiten; Hannover, https://doi.org/10.48476/qbasis.ni.2025

© Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie

Referat L2.4 – Geologische Grundlagen

Stilleweg 2

30655 Hannover

Telefon: 0511 643 0

E-Mail: GeolLandesaufnahme@lbeg.niedersachsen.de

DOI: 10.48476/qbasis.ni.2025

Download: <https://doi.org/10.48476/qbasis.ni.2025>

Inhaltsverzeichnis

0	Einleitung	4
1	Geologischer Überblick	5
2	Datengrundlage	7
2.1	Topographische Grundlagen	7
2.2	Karten und Profilschnitte	7
2.3	Bohrungen	8
2.4	Seismik.....	8
2.5	3D-Modelle.....	8
3	Methodik.....	10
3.1	Kachelung	10
3.2	Karten und Profilschnitte	11
3.3	Auswertung der Bohrungsdaten	11
3.4	Datenaufbereitung der Seismikdaten	13
3.5	Seismikinterpretation.....	14
3.6	3D-Modellierung	16
3.7	Grenzüberschreitende Abstimmung	17
4	Ergebnisse und Diskussion.....	18
4.1	Bisherige Ergebnisse.....	18
4.2	Einflussfaktoren auf die Qualität der Ergebnisse	23
5	Zusammenfassung	24
6	Literaturverzeichnis	25

0 Einleitung

Die oberflächennahe Geologie großer Teile von Niedersachsen ist sehr stark durch Ablagerungen des Quartärs geprägt. Die Basis der quartären Ablagerungen wurde während der Kaltzeiten durch hoch-energetische Prozesse beeinflusst. Insbesondere während der Elster-Kaltzeit wurden Rinnen in den präquartären Untergrund erodiert, die bis in Tiefen von 400 m unter Normalhöhennull (NHN) reichen (Kuster & Meyer, 1979).

Die Lockersedimente des Quartärs sind für die Rohstoffgewinnung und die Wasserwirtschaft von großer Bedeutung. Darüber hinaus kann die Tiefenlage der Quartärbasis einen Anhaltspunkt liefern, um die Erosionstiefe möglicher zukünftiger Vergletscherungen zu prognostizieren, z.B. im Hinblick auf die Suche nach einem Endlager für radioaktive Abfälle. Für die oberflächennahe Erdwärmegewinnung werden in sehr großer Zahl Bohrungen niedergebracht, für die die Tiefenlage der Quartärbasis relevant ist. Die Verfügbarkeit eines neuen 3D-Modells der Quartärbasisfläche auf aktueller Datenlage ist daher in mehrfacher Hinsicht von großem Interesse.

Für Niedersachsen lag mit der Veröffentlichung der Quartärgeologischen Übersichtskarte von Niedersachsen 1:500.000 (Kuster & Meyer, 1995) ein nahezu flächendeckender Datensatz im Maßstab 1:500.000 für die Tiefenlage der Quartärbasis vor. Für die Erstellung dieser Karte wurden vorwiegend Bohrdaten verwendet, aus denen mit regionalgeologischen Kenntnissen Verläufe quartärer Rinnen interpretiert wurden. Zum Teil wurde ergänzend auf seismische Daten zurückgegriffen.

Diese Karte war Grundlage für die Erstellung eines ersten 3D-Modells der Quartärbasis im Rahmen des Projektes GTA3D (Bombien et al., 2012). Dabei wurde die Karte originalgetreu in 3D umgesetzt.

Seit 2021 wird auf Grundlage neuerer und zusätzlicher Datengrundlagen ein aktualisiertes geologisches 3D-Modell der Quartärbasis erstellt. Dazu werden sowohl Bohrungen aus der Bohrdatenbank Niedersachsen (BDN) inklusive Datierungen und Bohrlochmessungen und der Kohlenwasserstoff-Bohrungsdatenbank (KW-DB) als auch vorhandene geologische Profilschnitte und kleinräumige 3D-Modelle der Lockergesteine herangezogen. Darüber hinaus werden insbesondere zur Kartierung der quartären Rinnen systematisch die am LBEG vorhandenen 2D- und 3D-Seismik-Daten der KW-Industrie ausgewertet.

Die umfangreiche Bohrdatenauswertung der BDN ist abgeschlossen. Die Modellierung erfolgt kachelweise für die Landesfläche Niedersachsens mit der Software Aspen SKUA® V14.5. Zum jetzigen Zeitpunkt (April 2025) sind sechs Kacheln im Nordwesten Niedersachsens fertiggestellt und werden in einem ersten Schritt der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Die weiteren Modellkacheln werden schrittweise veröffentlicht. Zu jeder Modellkachel wird eine Dokumentation erstellt, in der die Datengrundlage und die Ergebnisse beschrieben werden.

Verfügbarkeit des Modells

Das Modell der Quartärbasis ist über den NIBIS® KARTENSERVEN (<https://nibis.lbeg.de/cardomap3/>) und browserbasiert im NIBIS3D-Viewer (<https://3d.lbeg.de/>) zugänglich. Die Modelldaten werden auf Anfrage bereitgestellt.

1 Geologischer Überblick

Das heutige Landschaftsbild Niedersachsens ist vor allem geprägt durch die Ablagerungen des jüngsten Erdzeitalters, des Quartär, das vor etwa 2,6 Mio. Jahren begann. Während des Pleistozäns, der älteren Epoche des Quartär, wechselten sich wiederholt Kalt- und Warmzeiten ab, wobei vor allem während der Kaltzeiten viel Sediment bewegt und akkumuliert wurde und somit formgebend für die Landschaftsentwicklung war (z.B. Ehlers, 2020).

Niedersachsen war während des mittleren Pleistozäns innerhalb der Elster-Kaltzeit und des Saale-Komplexes, d. h. vor etwa 400 000 bis 130 000 Jahren, mehrmals von Inlandeis bedeckt (s. Abb. 1, z.B. Litt et al., 2007; Ehlers et al., 2011).



Abbildung 1: Die maximale Ausdehnung des Inlandeises in Niedersachsen während der drei großen Kaltzeiten im Pleistozän, wobei das Eis der Weichsel-Kaltzeit Niedersachsen nicht mehr erreicht hat. Linien der Eisausdehnung verändert nach Ehlers et al., 2011. Die Höhendaten basieren auf dem Digitalen Geländemodell in der Auflösung 50 m © GeoBasis-DE/LGLN [2021] und die kombinierte Schummierung basiert auf ATKIS® DGM5 © GeoBasis-DE / BKG (2025) CC BY 4.0.

Im Rahmen der Elster-Kaltzeit war die Landesfläche von Niedersachsen erstmalig weitestgehend flächendeckend von Eis bedeckt. Zu diesem Zeitpunkt entstanden unterhalb des Eises Erosionsrinnen, indem sich unter hydrostatischen Druck stehende glaziale Schmelzwässer tief in die darunter befindlichen präquartären Schichten eingeschnitten haben (z.B. Kuster & Meyer, 1979; Stackebrandt, 2009; Kirkham et al., 2022). Die subglazial entstandenen Rinnen verlaufen in Niedersachsen größtenteils in

Nord-Süd-Richtung, passend zur elsterzeitlichen Eisbewegungsrichtung (Kuster & Meyer, 1979). Sie sind häufig zwischen 3 - 5 km breit und können Tiefen bis über 400 m unter NHN erreichen, während die Basis der quartären Sedimente außerhalb der Rinnen normalerweise eher zwischen 50 - 100 m unter NHN liegt (Kuster & Meyer, 1979; Stackebrandt, 2009). Die tiefsten Rinnen befinden sich offenbar bevorzugt in Gebieten, in denen die Mächtigkeit der darunter befindlichen halbverfestigten tertiären Sedimente besonders hoch ist (Stackebrandt, 2009; Lang et al., 2025).

Die subglazial entstandenen Rinnen wurden direkt nach der Entstehung auch weitestgehend wieder mit glazialen Sedimenten verfüllt. Nachfolgende Vereisungen scheinen keine subglazialen Rinnen in vergleichbarem Umfang ausgebildet zu haben (z.B. Stackebrandt, 2009).

Die Quartärbasis in Niedersachsen ist beeinflusst von der Vielzahl an subglazialen Rinnen, die während der Elster-Kaltzeit entstanden sind. Aufgrund des heterogenen Reliefs der Basis variiert die Mächtigkeit der lockeren, quartären Sedimente stark über die Landesfläche von Niedersachsen.

2 Datengrundlage

In diesem Kapitel werden die Datengrundlagen aufgelistet. Maßgeblich für die in den einzelnen Kacheln verwendeten Daten ist die jeweilige Kacheldokumentation.

2.1 Topographische Grundlagen

Koordinatenreferenzsystem

Im Projekt wird als Koordinatenreferenzsystem das Europäische Terrestrische Referenzsystem 1989 (ETRS89) in Verbindung mit dem UTM-Koordinatensystem (UTM32 Nord) und Zonenkennziffer 32 verwendet (EPSG:4647 - ETRS89 / UTM Zone 32N (zE-N)).

Digitales Geländemodell

Den oberen Abschluss des Modells im fertiggestellten Bereich bildet ein digitales Geländemodell (DGM) mit einem regelmäßigen Raster von 50 m, das durch das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie aus dem durch das Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen bereitgestellten DGM1 abgeleitet wird (© GeoBasis-DE/LGLN 2025).

Modellgrenze

Als Grenze des Modellgebietes zu den anderen Bundesländern und den Niederlanden dient die Landesfläche Niedersachsens, abgeleitet aus dem Digitalen Landschaftsmodell (Basis-DLM) DLM25, Stand 04/2015 (© 2015 LGLN).

2.2 Karten und Profilschnitte

Für Niedersachsen liegen eine Vielzahl von Profilschnitten und Karten aus unterschiedlichen Quellen vor, die ggf. qualitativ oder quantitativ berücksichtigt werden. Es folgt eine Auflistung der Datensätze, die eine maßgebliche Grundlage für die Modellierung darstellen.

Quartärgeologische Übersichtskarte von Niedersachsen 1:500.000 (Kuster & Meyer, 1995)

Die Quartärgeologische Übersichtskarte von Niedersachsen 1:500.000 (Kuster & Meyer, 1995) stellt die Basis der quartären Ablagerungen als Isolinienkarte für die Landesfläche Niedersachsens und Bremens dar. Eine Differenzierung der quartären Schichten erfolgte nicht. Grundlage für die Erstellung dieser Karte war vor allem ein repräsentativ verteilter Datensatz von Bohrdaten und vereinzelt Auswertungen seismischer Daten, aus denen unter Einbeziehung regionalgeologischer Kenntnisse eine schlüssige Quartärbasiskarte erarbeitet wurde, die die charakteristischen Strukturen wie quartäre Rinnen (siehe Kapitel Geologischer Überblick) darstellt.

Geologische Karte von Niedersachsen 1: 50 000 – Grundkarte (GK50) (NIBIS® KARTENSERVEN, 2000)

In der GK50 werden die geologischen Verhältnisse Niedersachsens in einer landesweit einheitlichen, fachlich abgestimmten Form und Nomenklatur dargestellt. Es werden Informationen zur Verbreitung, Beschaffenheit und Abfolge der Gesteine bis zu einer Tiefe von zwei Metern unter der Geländeoberfläche abgebildet. Als thematische Datenbasis für die Kartenerstellung wurden überwiegend die Kartenblätter der Geologischen Karte von Niedersachsen 1:25 000 (GK25) sowie daraus abgeleitete digitale Datensätze verwendet.

Geologische und hydrostratigraphische Profilschnitte des LBEG (NIBIS® KARTENSER, 2021)

Zum Verständnis des geologischen Untergrundes im räumlichen Zusammenhang werden niedersachsenweit geologische Profilschnitte im Maßstab 1:50.000 erstellt. Zur Erstellung der geologischen Profilschnitte werden alle verfügbaren Informationen (z.B. Bohrungen, geologische Karten, geophysikalische Daten) zusammengetragen und ausgewertet. Diese Auswertung führt zur Darstellung eines räumlichen Gesamtbildes der geologischen Entwicklung im Untergrund. Diese basieren im Lockergesteinsbereich vorrangig auf Bohrungen der BDN, im Festgesteinsbereich zusätzlich auf Lagerungs- und Mächtigkeitsangaben der Gesteinsschichten. Im Anschluss an die geologische Profilerstellung folgt die hydrogeologische Auswertung mit dem Ergebnis der Zuordnung in Grundwasserleiter und Grundwassergeringleiter. Für die Modellierung wurden nur die geologischen Profilschnitte herangezogen.

2.3 Bohrungen

Bohrdatenbank Niedersachsen (BDN)

In der Bohrdatenbank Niedersachsen (BDN) werden Bohrergebnisse aus ca. 150 Jahren geologischer Erkundung vorgehalten. Zum Projektbeginn lagen 451.000 Bohrungen in der BDN in Niedersachsen vor. Für die Neumodellierung der Quartärbasis wurden etwa 180.000 Schichtenverzeichnisse aus der BDN ausgewertet bzw. überprüft (vgl. Kapitel 3.3.).

KW-Bohrungsdatenbank (KW-DB)

Die Kohlenwasserstoff-Bohrungsdatenbank (KW-DB) ist Teil des Kohlenwasserstoff-Fachinformationssystems (KW-FIS) des LBEG. Die KW-DB enthält Informationen zu KW-Explorations- und Produktionsbohrungen sowie für andere Zwecke abgeteufte Tiefbohrungen, inklusive Titeldaten und Schichtenverzeichnissen. Für das Projekt TUNB3D-NI wurden ca. 9200 Bohrungen aus Niedersachsen und Bremen ausgewertet und Informationen zur Quartärbasis ausgelesen, die im aktuellen Projekt weiterverwendet werden.

2.4 Seismik

In den vergangenen acht Jahrzehnten wurde in Niedersachsen eine Vielzahl von seismischen Messungen zur Erkundung des tieferen Untergrundes, insbesondere auf Kohlenwasserstoffe, durchgeführt. Die Ergebnisse werden beim LBEG gesammelt und archiviert. Nicht alle in Niedersachsen akquirierten Seismikdaten liegen in einer digitalen und darüber hinaus für die 3D-Modellierung auswertbaren Form vor. Im Rahmen des Projektes wurde eine Sichtung und Auswahl der beim LBEG vorliegenden reflexionsseismischen Daten auf erkennbare Rinnenstrukturen zur Kartierung subglazialer Rinnen durchgeführt. Nach Aufbereitung dieser Daten stehen aktuell 1549 2D-seismische Sektionen und 115 3D-seismische Datensätze für die Modellierung zur Verfügung (s. Abb. 5 in Kapitel 3.4). Dabei konnte z. T. auf aufbereitete Datensätze aus anderen Projekten (TUNB3D-NI, TUNB Velo 2.0) zurückgegriffen werden.

2.5 3D-Modelle

Für die Modellierung der Quartärbasis wurden weitere verfügbare (regionale) 3D-Modelle auf das Vorhandensein von Informationen zur Quartärbasis gesichtet und ggf. einbezogen.

3D-Modelle des Lockergesteins des LBEG (NIBIS® KARTENSER, 2025)

Die 3D-Modelle des Lockergesteins zeigen ein Abbild des Untergrundes der quartär- und tertiärzeitlichen Ablagerungen. In die regionalen Modelle fließen alle zum Zeitpunkt der Erstellung verfügbaren

Grundlagendaten des LBEG wie Bohrungen, Profilschnitte und geophysikalische Daten, z.B. aeroelektromagnetische Daten, ein. Seismische Daten sind bislang nicht berücksichtigt worden. Zusätzlich zu den LBEG-eigenen Modellen werden auch Modelle z.B. der Wasserverbände, geprüft, ggf. überarbeitet und in den Datenbestand des LBEG übernommen.

3D-Strukturmodell Bremen und Bremerhaven (Panteleit & Seiter, 2021)

Das 3D-Strukturmodell für Bremerhaven und Bremen wurde auf Basis von Profilschnitten und Bohrungen der Bohrdatenbank des Geologischen Dienstes für Bremen (GDfB) erstellt und reicht bis zur Quartärbasis bzw. der Basis des oberen Grundwasserstockwerks. Zur Interpretation der elsterzeitlichen Rinnen wurde zusätzlich Kartenmaterial von Kuster (2005) verwendet.

Geologische Übersichtsmodelle des tieferen Untergrundes GTA3D (Bombien et al., 2012) und TUNB3D-NI (Sattler et al., 2024)

Die Modelle des tieferen Untergrundes von Niedersachsen stellen die Geologie Niedersachsens und Bremens bis in mehrere Kilometer Tiefe dar und beruhen überwiegend auf Daten von Tiefbohrungen und 2D- sowie 3D-Seismik. Für die Neubearbeitung der Quartärbasis wurden diese 3D-Modelle hauptsächlich genutzt, um die Lage der Salzstrukturen (TUNB3D-NI) und teilweise auch der tertiären Horizonte (TUNB3D-NI und GTA3D) berücksichtigen zu können.

3 Methodik

3.1 Kachelung

Für das vorliegende Modell wurde eine Kachelung gewählt, die sich am Blattschnitt der TK100 und TK25 orientiert und möglichst gleich große Kacheln erzeugt. Das Gesamtmodell wurde dabei in ca. 26 Modellkacheln unterteilt.

Die Benennung wird in Kachelkürzel und Kachelnamen aufgeteilt. Das Schema für die Kachelkürzel ist „Q_[Kachelkürzel]“, wobei das Kachelkürzel aus drei Buchstaben einer in der Kachel liegenden Stadt oder eines Landkreises besteht. Der Kachelname entspricht der Langfassung des gleichen Ortes. Bisher vergebene Kachelkürzel und -namen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

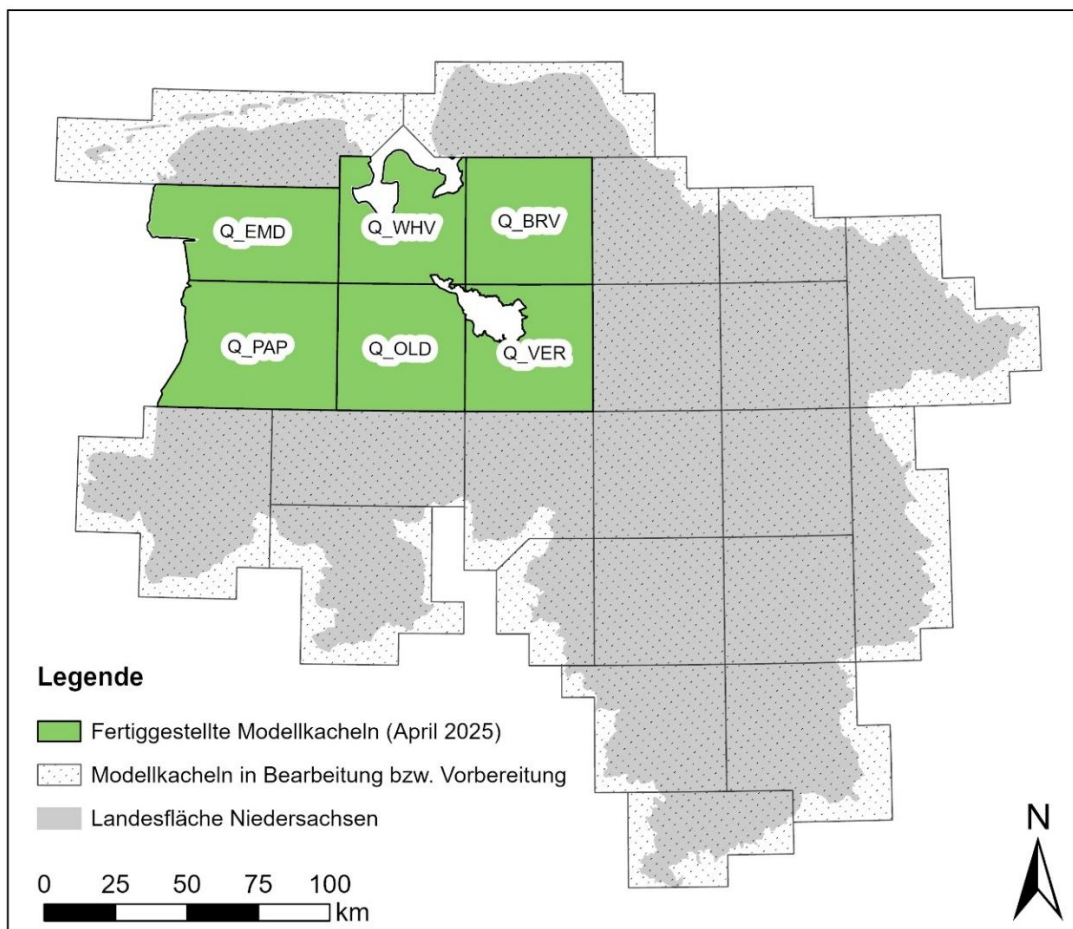


Abbildung 2: Kacheln des Modells Quartärbasis. Landesfläche von Niedersachsen 1 : 250 000
© GeoBasis-DE / BKG 2015 (Daten verändert).

Tab. 1: Kachelkürzel und -namen des Modells Quartärbasis (Stand April 2025).

Kachelkuerzel	Kachelname
Q_BRV	Bremervörde
Q_EMD	Emden
Q_OLD	Oldenburg
Q_PAP	Papenburg
Q_VER	Verden
Q_WHV	Wilhelmshaven

3.2 Karten und Profilschnitte

Quartärbasis nach Kuster & Meyer (1995) als 3D-Fläche

Als Grundlage für die Neumodellierung der Quartärbasis wurde die 3D-Modellfläche verwendet, die im Projekt TUNB3D-NI auf Basis der Quartärbasis-Isoliniendarstellung von Kuster & Meyer (1995) für die einzelnen TUNB3D-NI-Kacheln modelliert worden war (Sattler et al., 2022).

Geologische Karte 1:50.000 von Niedersachsen

Im Rahmen des vorliegenden Projektes erfolgte eine Auswertung der Geologischen Karte 1:50.000 von Niedersachsen (GK50) nach Stratigraphie unter Beachtung der Charakteristik, dass die GK50 Informationen über die Verbreitung und Abfolge der Gesteine bis zu einer Tiefe von zwei Metern enthält. Es wurden drei Klassen gebildet: Die erste Klasse umfasst Flächen, in denen das Quartär eine Mächtigkeit von über 2 m aufweist. Die zweite Klasse umfasst Flächen, in denen die Mächtigkeit des Quartärs maximal 2 m beträgt. Dies bedeutet, dass innerhalb der dargestellten 2 m unter der Geländeoberkante Quartär über Präquartär vorliegt. Die dritte Klasse umfasst Flächen, in denen kein Quartär verbreitet ist, sondern das Präquartär ansteht. Auf Basis der Klassifizierung wurden Shapefiles erstellt und bei der Modellierung verwendet (s. Kapitel 3.6).

Geologische und hydrostratigraphische Profilschnitte

Für den Abgleich im räumlichen Kontext wurden die Profilschnitte als Bilder, 3D-Kurven und Punktdatensätze mit Informationen zur Quartärbasis in 3D in Aspen SKUA® V14.5 importiert. Da für die Erstellung der Profilschnitte auch Bohrungen ausgewertet wurden, die nicht Bestandteil der Bohrdatenauswertung im Projekt Quartärbasis sind, wie z.B. Bohrungen, die zum Zwecke der Erdwärmegewinnung abgeteuft wurden, konnten so zusätzliche Hinweise auf die Tiefenlage der Quartärbasis gewonnen werden.

3.3 Auswertung der Bohrungsdaten

Für die Neumodellierung der Quartärbasis wurde die Bohrdatenbank Niedersachsen (BDN) systematisch und halbautomatisiert ausgewertet. Die Ergebnisse der Bohrdatenauswertung gehören zu den wichtigsten Eingangsdaten für die Neumodellierung der Quartärbasis.

Dafür wurden alle in der BDN vorhandenen Schichtenverzeichnisse zunächst nach bestimmten Kriterien vorgefiltert (Abb. 3). Das heißt, Bohrungen ohne relevanten Informationsgehalt für die Quartärbasis (z.B. ohne stratigraphische und petrographische Angaben) wurden in der Auswertung nicht bzw. Bohrungen mit wenig Informationsgehalt wurden nur unter bestimmten Bedingungen berücksichtigt. Nach dem Filtervorgang sind etwa 180.000 Schichtenverzeichnisse verblieben, die anschließend in Hinblick auf Quartärbasis-relevante Angaben manuell nach fachlichen Kriterien ausgewertet bzw. überprüft wurden.

Dazu wurden die in der jeweiligen Bohrung angesprochene Quartärbasis bzw. die Mindestmächtigkeit des Quartärs und weitere, quartärgeologisch relevante Marker (z.B. Till-Ablagerungen, warmzeitliche Ablagerungen oder Lauenburger-Schichten) erfasst. Während dieses Arbeitsschritts wurden keine neuen Interpretationen anhand der Schichtenverzeichnisse durchgeführt. Die endgültige Validierung erfolgte im räumlichen Zusammenhang während der 3D-Modellierung (Kapitel 3.6). Neben den o.g. Angaben aus den Schichtenverzeichnissen wurden auch ca. 5000 Quartärbasis-relevante biostratigraphische Ergebnisse und ca. 5400 geophysikalische Bohrlochmessungen berücksichtigt. Bei der Auswertung der geophysikalischen Bohrlochmessungen wurde geprüft, ob die Quartärbasis-Marker aus den Schichtenverzeichnissen bestätigt oder ggf. ein solcher Marker basierend auf den Messdaten gesetzt

werden kann, oder ob sich Widersprüche zwischen der im Schichtenverzeichnis notierten Quartärbasis und den Bohrlochmessdaten ergeben. Biostratigraphische Daten wurden ebenfalls verwendet, um vorhandene Quartärbasis-Marker zu verifizieren, Quartärbasis-Marker aufgrund der Daten neu zu setzen oder aus der Datierung von präquartären Schichten maximale Quartärmächtigkeiten abzuleiten. Die Quartärbasis-relevanten Angaben wurden als Punktdatensätze in Aspen SKUA® V14.5 importiert und sind als „feste Ankerpunkte“ (Abb. 4) bzw. „weiche Punkte“ in die 3D-Modellierung eingeflossen.

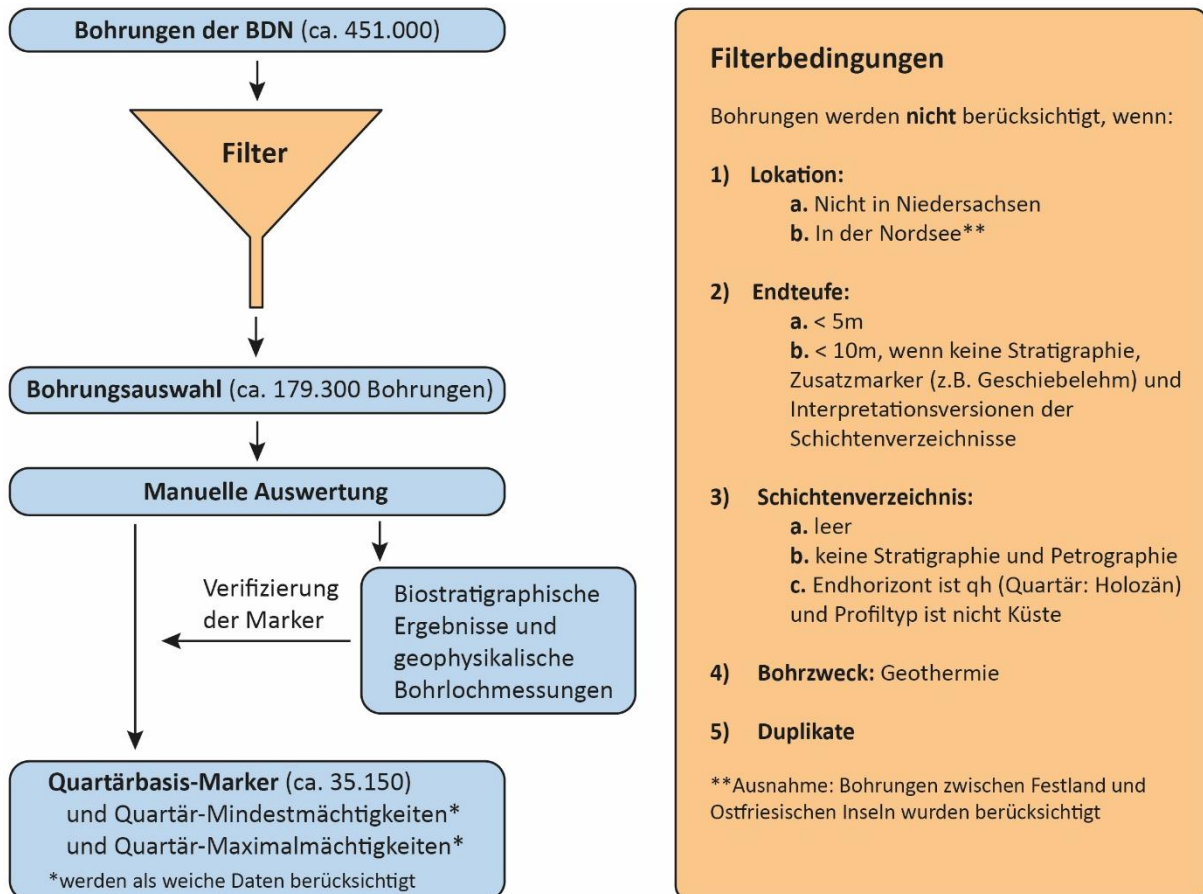


Abbildung 3: Flussdiagramm zur Auswertung der Bohrdatenbank Niedersachsen (BDN). Die gefilterten Bohrungen wurden hinsichtlich Quartärbasis-relevanter Angaben manuell ausgewertet.

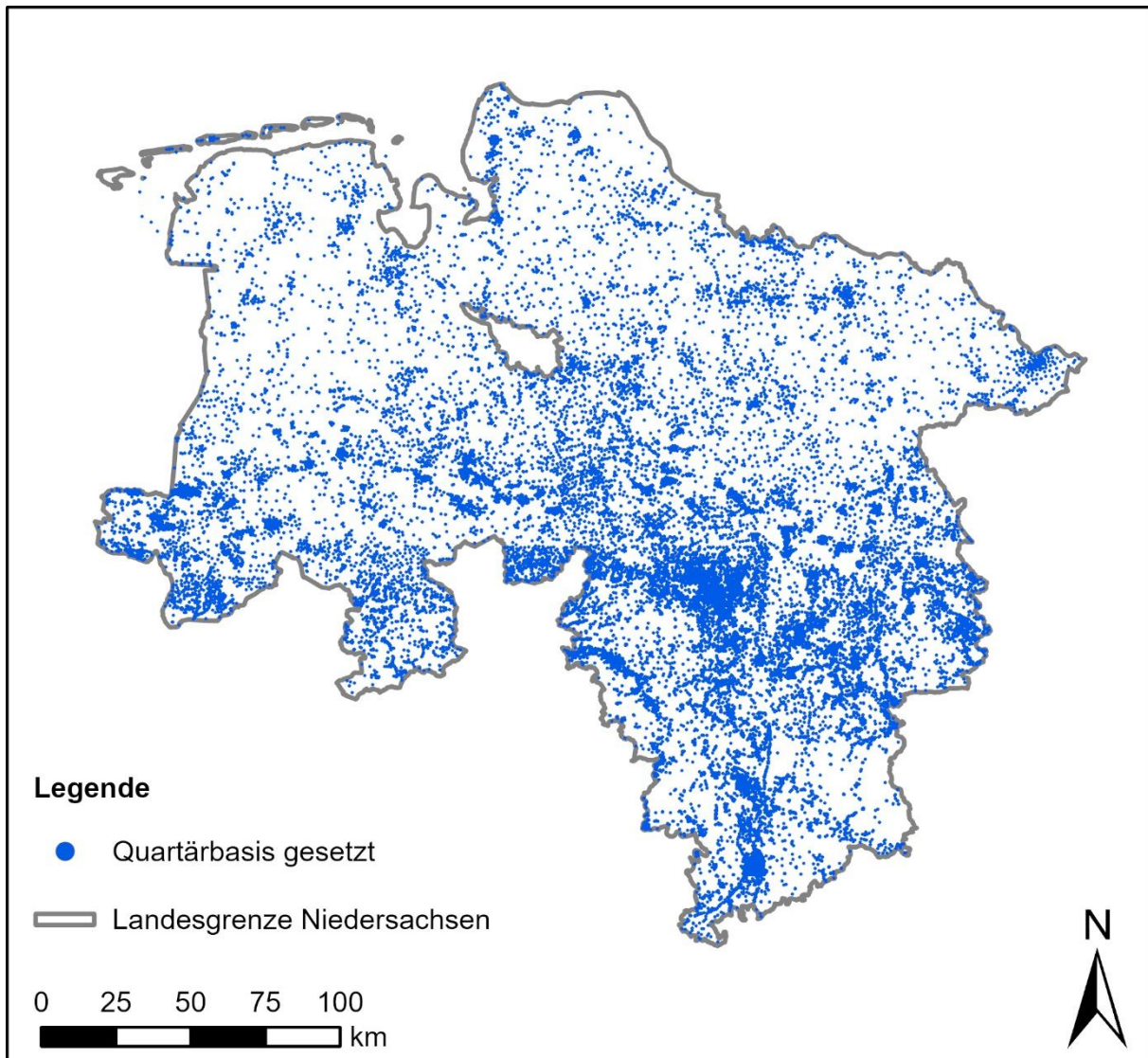


Abbildung 4: Quartärbasismarker ($N = 35.150$) nach Bohrdatenauswertung der Bohrdatenbank Niedersachsen (BDN). Landesfläche von Niedersachsen 1 : 250 000 © GeoBasis-DE / BKG 2015 (Daten verändert).

3.4 Datenaufbereitung der Seismikdaten

Ziel der Datenaufbereitung der seismischen Daten war es, alle relevanten Daten im Format SEG-Y und mit einem einheitlichen Koordinatensystem (EPSG:4647) für den direkten Import in Aspen SKUA[®] V14.5 bereitzustellen. Zu Projektbeginn lag bereits ein Teil der seismischen Daten im SEG-Y-Format in der Softwarearchitektur Aspen Epos[®] V14.2 vor. Für diese war keine weitere Aufbereitung erforderlich, ggf. erfolgte eine Qualitätssicherung, bei der die Raumlage verifiziert wurde. Für Seismikdaten im SEG-Y-Format, die noch nicht in Aspen Epos[®] V14.2 integriert waren, fand zunächst eine Sichtung der vorhandenen Daten auf das Vorhandensein von Rinnengeometrien statt. Diese wurden anschließend in das System Aspen Epos[®] V14.2 importiert.

Eine signifikante Anzahl seismischer Sektionen liegt am LBEG lediglich als gescannte Bilddatei und nicht im SEG-Y-Format vor. Diese Scans wurden zunächst auf erkennbare Rinnenstrukturen untersucht und selektiert. Im Anschluss erfolgte eine systematische Erfassung der für den Bildimport erforderlichen

Metadaten in tabellarischer Form. Die Bilddateien selbst wurden einer sorgfältigen Bildbearbeitung unterzogen, um sie für den weiteren Prozess zu optimieren. Auf Basis dieser Vorarbeiten wurden anschließend die bearbeiteten Bilddateien in das System Aspen Epos® V14.2 im Format SEG-Y integriert.

Die im System Aspen Epos® V14.2 vorhandenen 2D- und 3D-Seismikdaten (s. Abb. 5) wurden dann als SEG-Y-Dateien im Koordinatensystem EPSG:4647 für die Modellierung bereitgestellt. Qualitative Unterschiede und Unterschiede in der Auswertbarkeit der Daten in Aspen SKUA® V14.5 können auftreten, je nachdem ob die Daten nativ im SEG-Y-Format vorliegen oder aus einer gescannten Bilddatei in das SEG-Y-Format konvertiert wurden. Für die Kartierung subglazialer Rinnen ist die eingeschränkte Auswertbarkeit der seismischen Attribute akzeptabel.

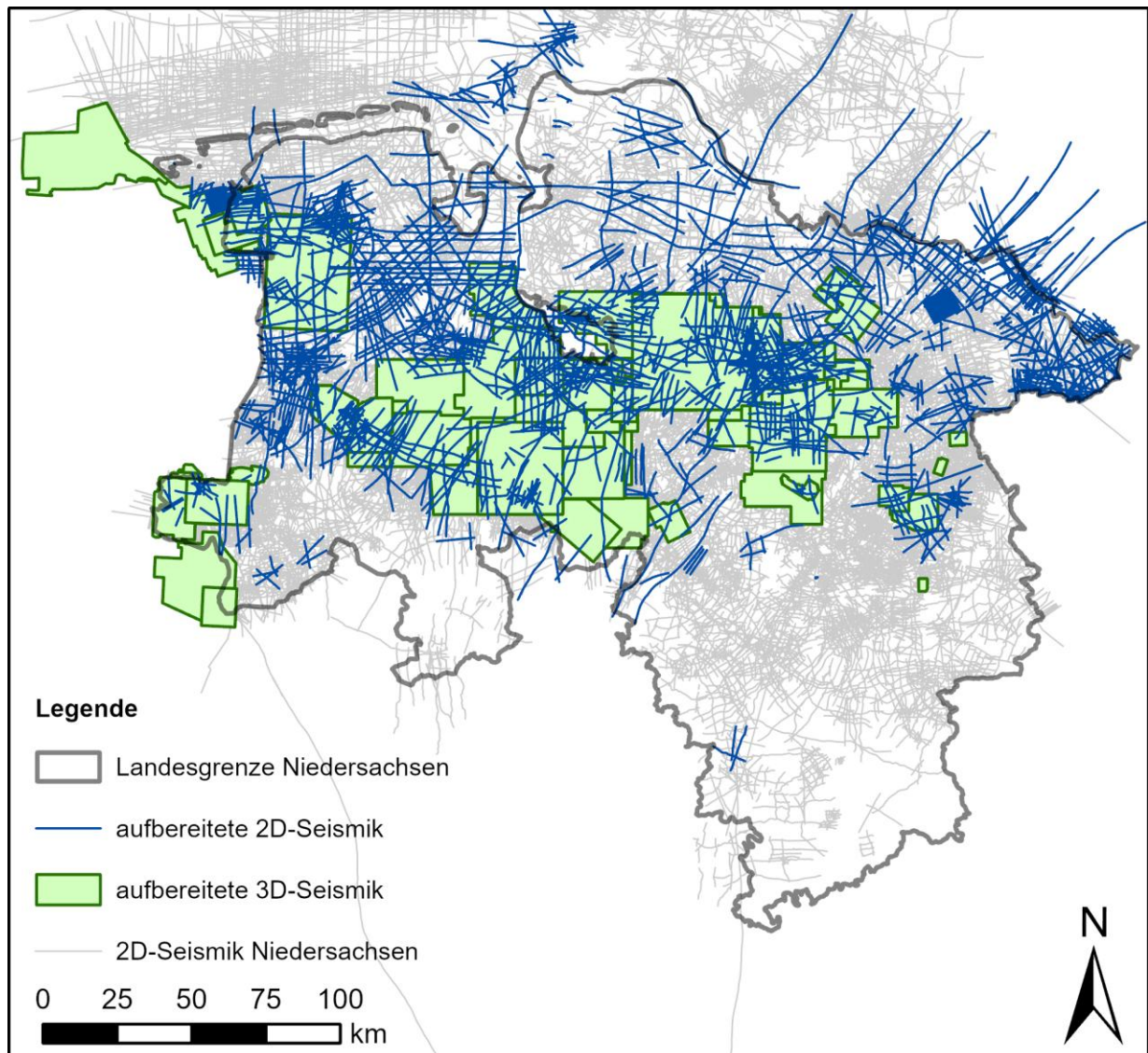


Abbildung 5: Für die Modellierung aufbereitete 2D- ($N = 1549$) und 3D-seismische Datensätze ($N = 115$). Landesfläche von Niedersachsen 1 : 250 000 © GeoBasis-DE / BKG 2015 (Daten verändert).

3.5 Seismikinterpretation

Die für jede Kachel aufbereiteten seismischen Daten wurden in Aspen SKUA® V14.5 geladen und dort im Zusammenhang mit den anderen Daten interpretiert. Auf den 2D-Seismiklinien ergab sich je nach

Alter und Qualität der seismischen Daten ein teilweise deutlicheres Bild der Rinnegeometrien im Vergleich zu den 3D-seismischen Daten (siehe Abb. 6). Vor allem ältere 2D-seismische Sektionen liegen nur gestapelt und nicht migriert vor. Im Bereich von Rinnenstrukturen kommt es in diesen Stapelsektionen zu sog. „Bow-tie“-Reflexionen (z.B. Herron, 2011), die die Rinnenstruktur schmaler und flacher erscheinen lassen können, als nach einer Migration der Seismiken und einer Annäherung an realitätsnähere Rinnegeometrien zu erwarten wäre. Um bei spärlicher Datenlage dennoch Informationen über die Quartärbasis aus den gestapelten seismischen Sektionen ableiten zu können, wurden diese Verzerrungen bei der nachfolgenden Modellierung so weit wie möglich manuell korrigiert.

Für die Rinnenkartierung in 3D-Seismikdaten konnte zusätzlich zu den Inlines und Crosslines auch der laterale Verlauf auf Zeit- oder Tiefenscheiben verfolgt werden (z.B. Degro & Kinzel, 2018). Lagen sowohl 3D- als auch 2D-seismische Daten vor, wurden diese miteinander abgeglichen, um eine konsistente Rinnegeometrie zu erhalten (siehe Abb. 7).

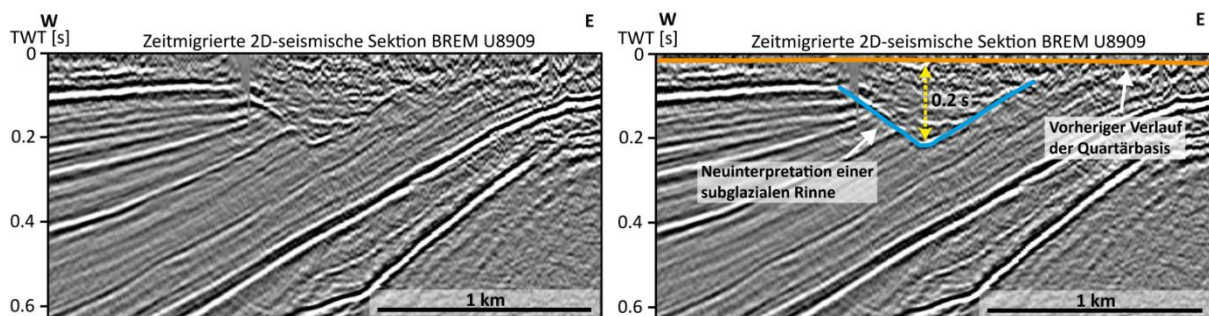


Abbildung 6: Interpretation einer quartären Rinne auf der 2D-seismischen Sektion BREM U8909 (Aspen SKUA® V14.5). Die nach Westen einfallenden Reflektoren unterhalb der Quartärbasis zeigen tertiär- bis kreidezeitliche Schichtfolgen oberhalb der Salzstruktur Lilienthal. Die orangefarbene Linie entspricht dem Verlauf der Quartärbasis nach Kuster & Meyer (1995).

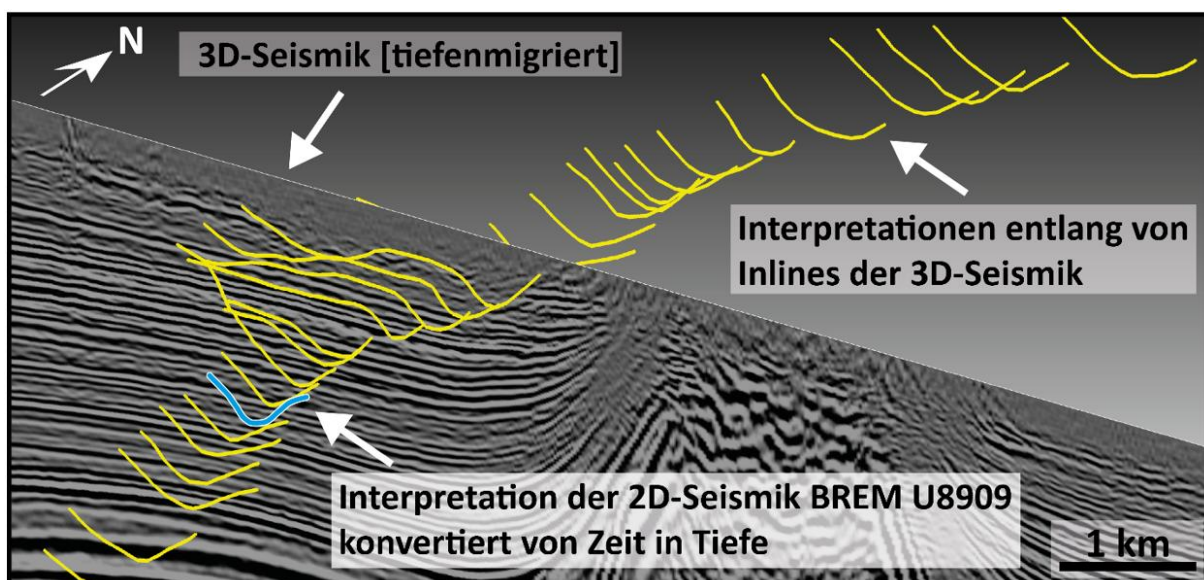


Abbildung 7: 3D-Ansicht von Seismikdaten (Inline) der 3D-Seismik Unterweser Reprozessing 2009 mit Interpretationen der Quartärbasis (gelb) und der Interpretation der 2D-seismischen Linie BREM U8909 (blau, siehe Abbildung 6) aus Aspen SKUA® V14.5. Die Reflektoren unterhalb der Quartärbasis zeigen tertiär- bis kreidezeitliche Schichtfolgen oberhalb der Salzstruktur Lilienthal.

Zeit-Tiefen-Konvertierung

Ein Großteil der seismischen Daten liegt im Zeitbereich vor. Für die Verwendung der Interpretationsdaten im Modell ist daher Umrechnung in die Tiefen-Domäne erforderlich. Für Niedersachsen steht kein flächendeckendes, ausreichend genaues Geschwindigkeitsmodell für diesen Tiefenbereich zur Verfügung. Als praktikabel für die Zeit-Tiefen-Konvertierung der Basislinien der mit quartären Lockersedimenten gefüllten Rinnenstrukturen hat sich ein einfacher konstanter Geschwindigkeitsansatz von 1650 m/s erwiesen. Tests mit dieser Durchschnittsgeschwindigkeit ergaben eine gute Übereinstimmung bei der Überprüfung von Bereichen, in denen sowohl Bohrdaten als auch seismische Daten für eine quartäre Rinne vorlagen. Untersuchungen im Bereich der deutschen Nordsee zeigten ebenfalls gute Erfahrungen mit diesem Wert in einem ähnlichen geologischen Setting (z.B. Brückner-Röhling et al., 2005).

3.6 3D-Modellierung

Die Modellierung der Quartärbasis erfolgte mit der Software Aspen SKUA® V14.5. Die Vorgehensweise orientierte sich an der Modellerstellung im Projekt TUNB3D-NI (Sattler et al., 2022). Im Folgenden werden die allgemeinen Schritte der Modellerstellung beschrieben. Diese wurde von den einzelnen BearbeiterInnen individuell je nach Datengrundlage und geologischen Anforderungen an die Erfordernisse der jeweiligen Kachel angepasst.

Nach der ersten Sichtung der Datengrundlagen im 3D-Raum (z.B. Bohrmarker, Profilschnitte und 3D-Modelle) und Interpretation vorhandener Seismik konnte eine initiale Modellfläche erstellt werden. Dabei wurden Inkonsistenzen in den Daten deutlich. Die betroffenen Daten wurden daraufhin nochmals eingehend geprüft. In diesem Schritt wurde auch die interpretierte Quartärbasis aus den vorliegenden Profilschnitten mit den Quartärbasismarkern aus der Bohrungsauswertung abgeglichen. Bei widersprüchlichen Eingangsdaten wurde entschieden, welcher Datensatz im Gesamtzusammenhang plausibler erschien. Dabei wurde auch eine Gewichtung vorgenommen. In der Regel wurden Bohrdaten hoch gewichtet, insbesondere wenn die Quartärbasis in den Bohrungen durch weitere Daten wie biostratigraphische Datierungen und/oder Bohrlochmessungen bestätigt wurde. Eindeutige Hinweise auf quartären Rinnen aus der Interpretation von Seismik wurden höher gewichtet als Bohrmarker, die nur auf lithologischer Ansprache (Schichtenverzeichnis) beruhen und nicht durch weitere Daten belegt sind.

Die verwendete Isolinienkarte von Kuster & Meyer (1995), die regionalen 3D-Modelle und die Profilschnitte stellen selbst geologische Interpretationen vor allem von Bohrdaten dar und wurden daher i.d.R. geringer gewichtet als diese. Widersprüchliche und als weniger plausibel bewertete Datensätze oder Teile von Datensätzen wurden entsprechend identifiziert und blieben bei der weiteren Modellierung unberücksichtigt.

Die Horizontmodellierung wurde iterativ so lange wiederholt, bis die Quartärbasis die Eingangsdaten nach Einschätzung der Bearbeitenden geologisch plausibel abbildete. Grundlegende geologische Entscheidungen während des Modellierprozesses wurden kontinuierlich in der Arbeitsgruppe diskutiert und abgestimmt.

Für die bisher modellierten Kacheln im Nordwesten Niedersachsens ist eine überwiegend flächenhafte Verbreitung des Quartärs bekannt. In einzelnen Bereichen stehen jedoch an der Geländeoberfläche nach Auswertung der GK50 präquartäre Schichten an. Für diese Bereiche sind zwei unterschiedliche Fälle zu berücksichtigen: Im ersten Fall sind quartäre Schichten an der Oberfläche nicht verbreitet, da sie entweder erodiert wurden oder nie zur Ablagerung kamen. Hier wurde ein Ausstrich der Quartär-

basis am DGM modelliert. In den entsprechenden Bereichen treten demnach Lücken in der Ergebnisfläche auf, die deutlich die Nichtverbreitung des Quartärs zeigen. Im zweiten Fall sind präquartäre Schichten in Form von Schuppen oder Schollen durch glazigene Prozesse in die quartären Schichten eingeschaltet. Hier wird davon ausgegangen, dass Schollen und Schuppen aus präquartärem Material meist geringmächtig sind und eine geringe laterale Erstreckung haben. Im Modellmaßstab werden sie daher nicht abgebildet und die Quartärbasis wird in diesem Bereich generalisiert und auf einem tieferen Niveau durchgehend modelliert.

Um eine Konsistenz zu bereits fertiggestellten Nachbarkacheln zu gewährleisten, wurde die Quartärbasis exakt an die benachbarten Modellkacheln angepasst.

3.7 Grenzüberschreitende Abstimmung

Bei der Erstellung der Quartärbasis wurde eine möglichst weitgehende Harmonisierung mit den Modellen bzw. Daten der benachbarten Bundesländer und Staaten angestrebt, soweit dies unter Berücksichtigung unterschiedlicher Modellkonzepte, stratigraphischer Konzepte und der Datenlage fachlich vertretbar war. Bisher erfolgte der Abgleich mit dem vorhandenen 3D-Modell des Geologischen Dienstes für Bremen (GDfB) und die Prüfung der durch die niederländische Organisation TNO (Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek) bereitgestellten 3D-Modelldaten. Weitere Informationen zur Grenzabstimmung sind den jeweiligen Kacheldokumentationen zu entnehmen.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Bisherige Ergebnisse

Im Folgenden werden die bisherigen Modellierungsergebnisse der Kacheln BRV, EMD, OLD, PAP, VER und WHV in Kartendarstellungen abgebildet und die Gesamtergebnisse der bisherigen Modellierung für die Quartärbasis zusammengefasst. Detaillierte Informationen zu den einzelnen Strukturen finden sich in den entsprechenden Kacheldokumentationen.

Die neue 3D-Modellfläche der Quartärbasis für die Kacheln BRV, EMD, OLD, PAP, VER und WHV zeigt zahlreiche überwiegend Nord-Süd bis Nordnordost-Südsüdwest verlaufende quartäre Rinnen, die bis über -400 m NHN in den präquartären Untergrund eingeschnitten sind (Abb. 8). Die maximale Tiefe der subglazialen Rinnen liegt im bisher bearbeiteten Gebiet bei -415 m NHN und damit gut 50 m tiefer als bei Kuster & Meyer (1995). In vielen Fällen gelang es, die Rinnengeometrien präziser und detaillierter zu erfassen als in Kuster & Meyer (1995), insbesondere in Bezug auf den räumlichen Verlauf der Rinnen sowie die Geometrien der Rinnenflanken. Durch diesen Zugewinn an Genauigkeit ergeben sich lokal erhebliche Abweichungen der neuen Modellfläche von der Datengrundlage (Kuster & Meyer, 1995), die Maximalwerte zwischen ca. +290 m und -280 m erreichen (Abb. 9). Abweichungen mit positiven Beträgen ergeben sich dort, wo vormals quartäre Rinnen postuliert wurden, die auf Basis neuerer Daten einen anderen Verlauf haben oder sich nicht bestätigen lassen. Die neu modellierten Rinnenverläufe sind komplexer und stärker verzweigt als ursprünglich angenommen. Darüber hinaus ermöglichten die seismischen Daten erstmals die Kartierung zahlreicher neuer Rinnen (Abb. 9 und 10).

Im Bereich der Hochlagen der Quartärbasis hat ebenfalls die Komplexität und der Detaillierungsgrad im Vergleich zu Kuster & Meyer (1995) zugenommen, wenn auch die Beträge der Änderungen geringer sind als in den Rinnen (Abb. 8 und 9). Diese Qualitätsverbesserung ist insbesondere auf die Vielzahl von Bohrungen mit Informationen zur Tiefenlage der Quartärbasis (Abb. 4) zurückzuführen, die bei der Modellierung berücksichtigt wurde. Damit kann die Quartärmächtigkeit auch im Bereich der Hochlagen der Quartärbasis realistischer als bisher eingeschätzt werden (Abb. 11). Der Median der Mächtigkeit des Quartärs beträgt 60 m. Dabei sind nur ca. 10 % des Quartärs im bisherigen Modellgebiet mächtiger als 150 m.

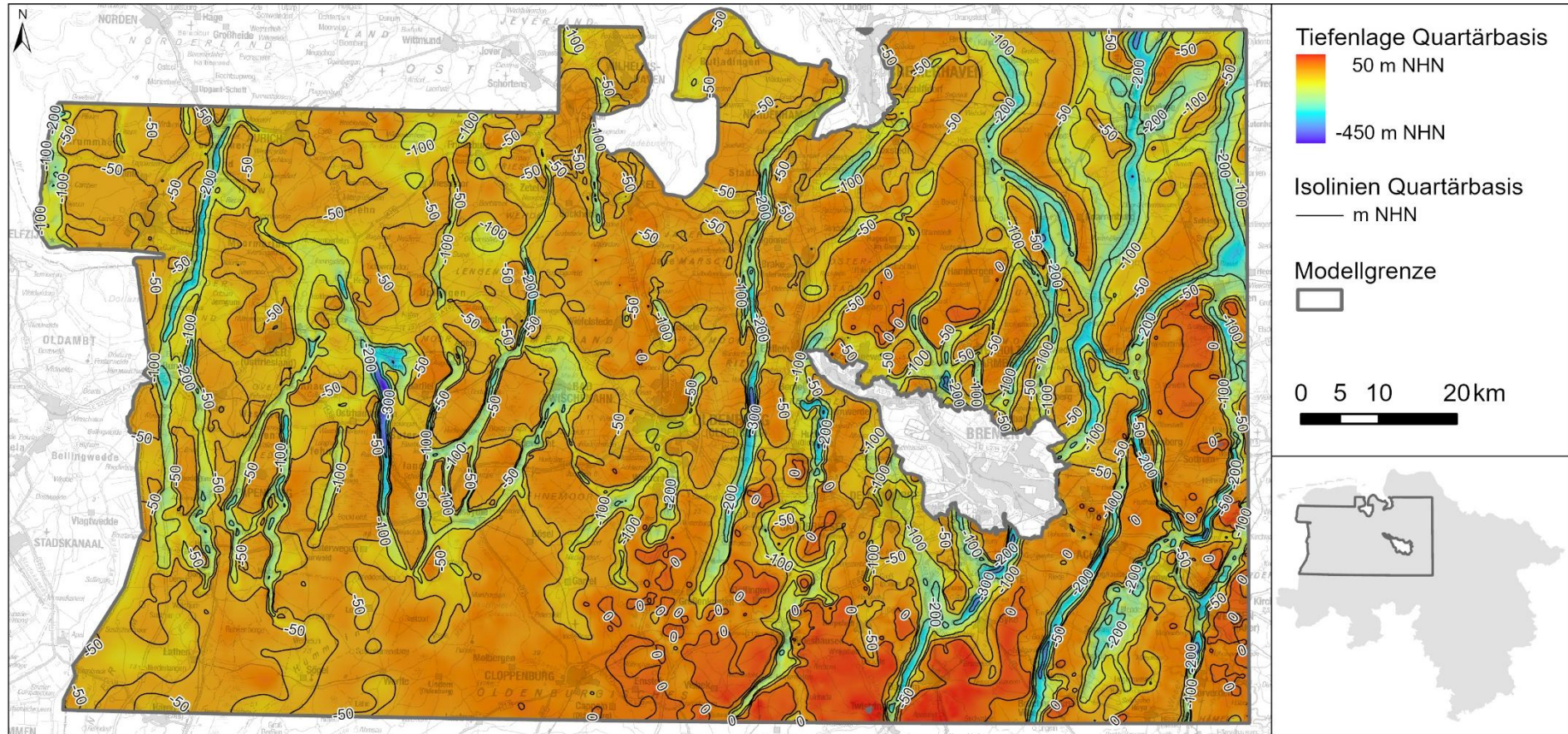


Abbildung 8: Neue 3D-Modellfläche der Quartärbasis für Niedersachsen der Kacheln BRV, EMD, OLD, PAP, VER und WHV. Topographische Kartengrundlage: Digitale Übersichtskarte Niedersachsen 1: 500 000 (DÜKN500) © GeoBasis-DE/LGLN 2021. Landesfläche von Niedersachsen 1: 250 000 © GeoBasis-DE / BKG 2015 (Daten verändert).

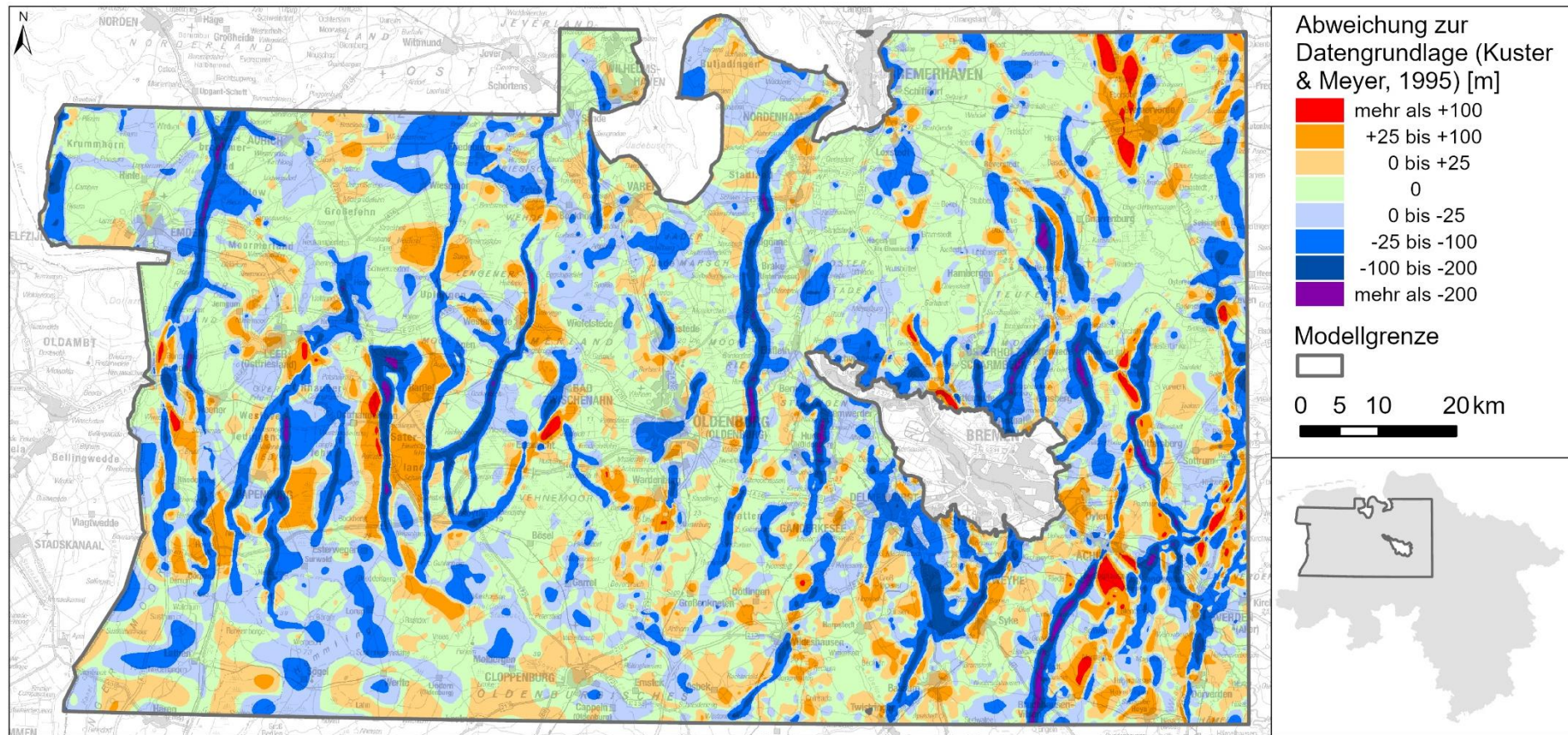


Abbildung 9: Die Tiefenlage der Quartärbasis der neuen 3D-Modellfläche für die Kacheln BRV, EMD, OLD, PAP, VER und WHV verglichen mit der Tiefenlage gemäß der Datengrundlage (Kuster & Meyer, 1995). Positive Abweichungen geben eine flachere Quartärbasis in der Neumodellierung an und negative Abweichungen eine tiefere Quartärbasis. Topographische Kartengrundlage: Digitale Übersichtskarte Niedersachsen 1: 500 000 (DÜKN500) © GeoBasis-DE/LGLN 2021. Landesfläche von Niedersachsen 1 : 250 000 © GeoBasis-DE / BKG 2015 (Daten verändert).

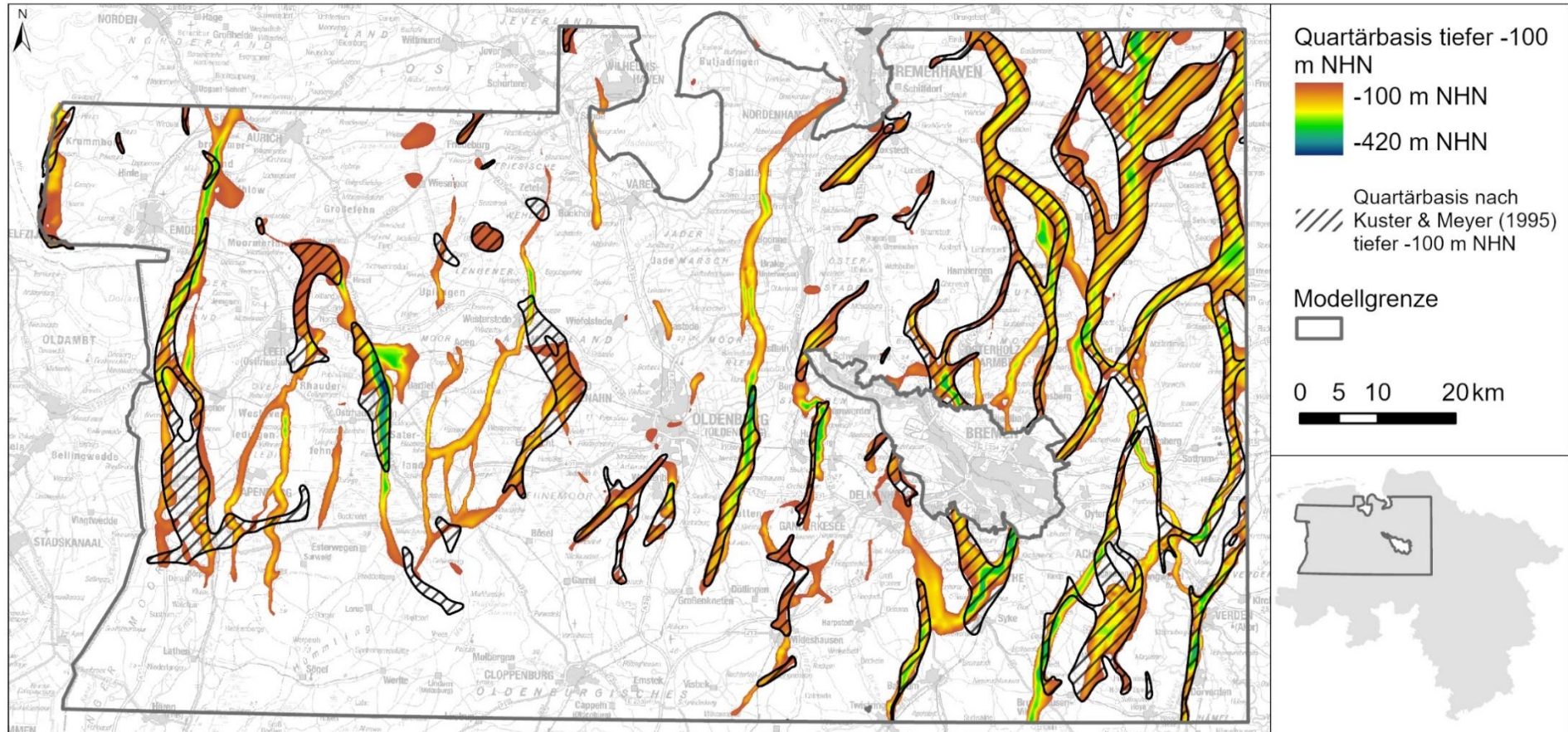


Abbildung 10: Vergleich der Verläufe der subglazialen Rinnen im neuen 3D-Modells der Quartärbasis vs. der Quartärbasis nach Kuster & Meyer (1995). Dargestellt sind jeweils Bereiche tiefer als -100 m NHN. Topographische Kartengrundlage: Digitale Übersichtskarte Niedersachsen 1: 500 000 (DÜKN500) © GeoBasis-DE/LGLN 2021. Landesfläche von Niedersachsen 1 : 250 000 © GeoBasis-DE / BKG 2015 (Daten verändert).

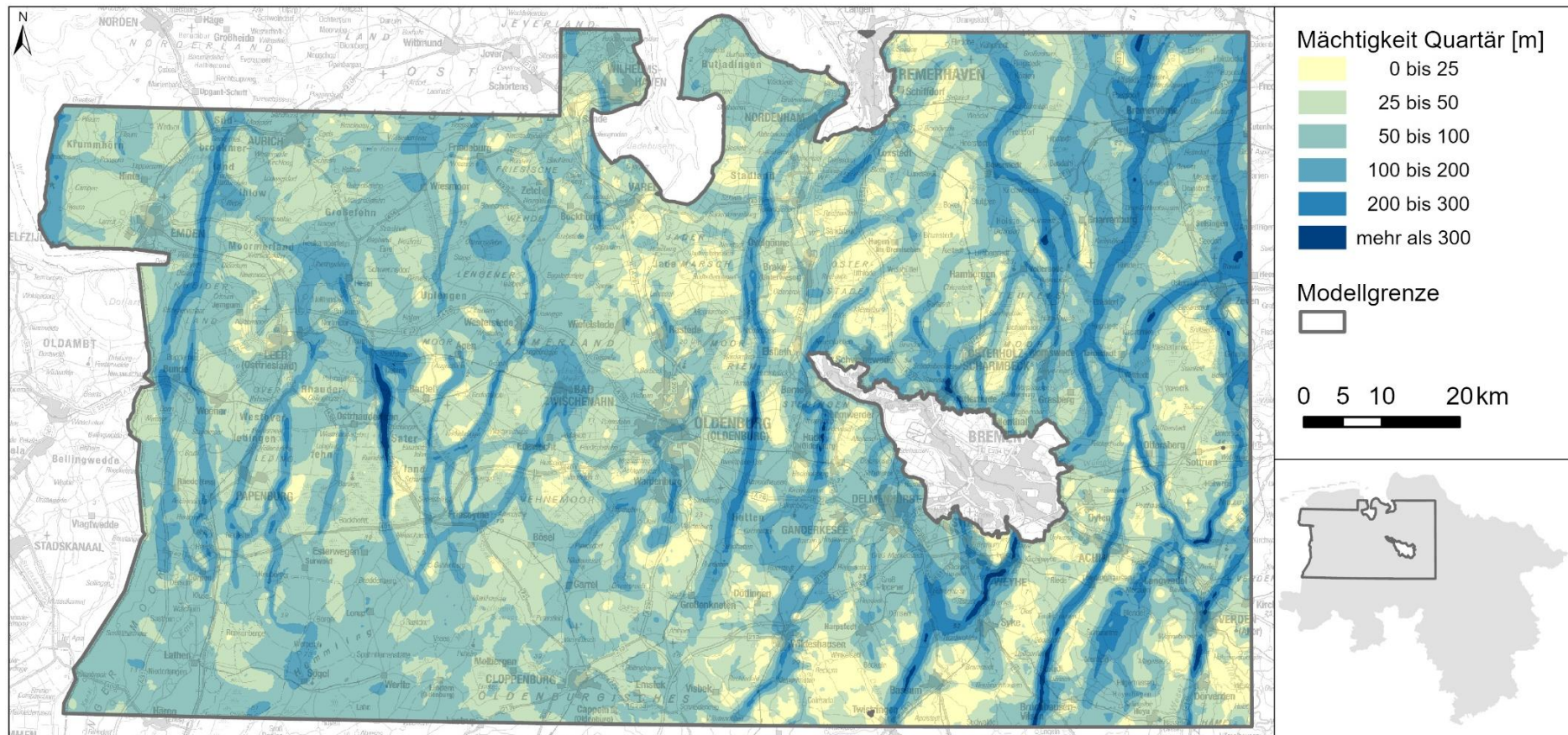


Abbildung 11: Quartärmächtigkeit basierend auf der neuen 3D-Modellfläche für die Kacheln BRV, EMD, OLD, PAP, VER und WHV. Topographische Kartengrundlage: Übersichtskarte Niedersachsen 1 : 500 000 (DÜKN500) © GeoBasis-DE/LGLN 2021. Landesfläche von Niedersachsen 1 : 250 000 © GeoBasis-DE / BKG 2015 (Daten verändert).

4.2 Einflussfaktoren auf die Qualität der Ergebnisse

Heterogene Datenverteilung

Die für die Modellierung verwendeten Daten sind sehr heterogen über das Modellgebiet verteilt. Die Tiefenunterschiede der Quartärbasis hängen stark vom Verlauf der subglazialen Rinnen ab. Diese Rinnen können in den durch 3D-Seismik und/ oder gut durch 2D-Linien abgedeckten Gebieten in ihrem Verlauf verlässlich kartiert werden. In anderen Bereichen beruht die Modellierung der Rinnen auf sehr wenigen Hinweisen und – unter Berücksichtigung der regionalgeologischen Kenntnisse – dem fachlichen Ermessen der modellierenden Person. In solchen Bereichen sind die Rinnenverläufe daher mit hohen Unsicherheiten behaftet.

Zur Abschätzung der Datendichte ist die räumliche Verteilung der Belegdaten der einzelnen Modellkacheln in Karten in den jeweiligen Kacheldokumentationen dargestellt.

Widersprüchlichkeit der Eingangsdaten

Die Eingangsdaten sind nicht frei von Widersprüchen. Angesichts der sehr großen Menge der Eingangsdaten, der zahlreichen verwendeten Methoden der Datengewinnung und des langen Zeitraums von vielen Jahrzehnten, in dem diese Daten entstanden sind, ist dies nicht verwunderlich. Die Quartärbasiskarte von Kuster & Meyer (1995), die als Grundlage für die Modellierung dient, ist eine Übersichtskarte im Maßstab 1:500.000. Durch die Einbeziehung aller verfügbaren Bohrdaten, Seismikdaten unterschiedlichen Alters, weiterer regionaler 3D-Modelle und anderer relevanter Daten unterschiedlicher Maßstäbe, Aktualität und Qualität wurden bei der Modellierung regelmäßig Widersprüche in den Eingangsdaten sichtbar.

Im Rahmen der Modellierung wurden die Daten bewertet und gewichtet, um eine plausible Modellfläche der Quartärbasis zu erstellen. Dies erfolgte unter Berücksichtigung möglichst aller für das jeweilige Gebiet relevanten Daten, einer Beurteilung der Zuverlässigkeit dieser Daten und unter Berücksichtigung der regionalen geologischen Verhältnisse.

Einzelheiten zum Umgang mit widersprüchlichen Datensätzen sind in den jeweiligen Kacheldokumentationen aufgeführt.

Unterscheidung Pliozän und Quartär

In vielen Bereichen Niedersachsens liegen quartäre Lockersedimente direkt über Ablagerungen des Pliozän. Pliozäne und quartäre Sedimente weisen häufig eine ähnliche Petrographie auf. Zudem ist die Signatur in bohrlochgeophysikalischen Messungen nicht immer geeignet, um die Grenze zwischen Pliozän und Quartär identifizieren zu können (s. Abb. 12). Auch bei der biostratigraphischen Einstufung gibt es Schwierigkeiten, eine eindeutige Zuordnung zu einer der beiden Einheiten vornehmen zu können (Köthe, 2017). Daher ist die Tiefenlage der Quartärbasis in diesen Gebieten mit größeren Unsicherheiten behaftet.

Verwendung unterschiedlicher Seismik und Zeit-Tiefen-Konvertierung

Die Verwendung von seismischen Daten zur Kartierung der subglazialen Rinnenverläufe und -geometrien hat bereits in der aktuellen Projektphase zu zahlreichen neuen Erkenntnissen über die Quartärbasis geführt. Allerdings sind die Interpretationsdaten teilweise mit Unsicherheiten behaftet. Dies liegt zum einen an der notwendigen Zeit-Tiefen-Konvertierung. Die verschiedenen tiefenmigrierten seismischen Surveys wurden mit unterschiedlichen seismischen Geschwindigkeitsmodellen generiert. Dabei lag der Schwerpunkt eher auf den privatwirtschaftlich relevanten tieferen Horizonten, das Geschwindigkeitsmodell im Bereich der quartären Lockersedimente basiert dort eher auf Standardwerten ohne

regionale bzw. lokale Anpassungen. Zudem ist bei der selbst durchgeführten Zeit-Tiefen-Konvertierung mit einem konstanten Geschwindigkeitsansatz von 1650 m/s (siehe Kapitel 3.6) die Geschwindigkeit für flachere Bereiche eher zu hoch und für deutlich tiefere Bereiche in den Rinnen eher zu niedrig gewählt. Eine vergleichende grobe Abschätzung mit einer Geschwindigkeitsfunktion, die im Raum Cuxhaven für die Tiefenkonversion von Reflexionsseismik im Bereich subglazialer Rinnen verwendet wurde (Wiederhold et al., 2005), zeigt dabei für die tieferen Bereiche bei ca. -400 m NHN Unterschiede von ca. 20 m. Eine weitere Differenzierung des eigenen Geschwindigkeitsmodells mit einem Gradienten wurde jedoch aus Praktikabilitätsgründen und im Hinblick auf den Modellmaßstab verworfen.

Bei der Interpretation der subglazialen Rinnen, die sich erosiv in den präquartären Untergrund einschneiden, gibt es keinen charakteristischen Reflektor, sondern einen gewissen Interpretationsspielraum. Wenn in diesen Bereichen keine Bohrung zur Korrelation zur Verfügung stand, können die interpretierten Rinnentiefen daher durchaus Unsicherheiten von mehreren Zehnermetern aufweisen.

5 Zusammenfassung

Für die Neumodellierung der Quartärbasis in den Modellkacheln Bremervörde, Emden, Oldenburg, Papenburg, Verden und Wilhelmshaven wurden alle im LBEG verfügbaren und relevanten Daten verwendet, wie der Isolinienplan der Quartärbasis im Maßstab 1:500.000 (Kuster & Meyer, 1995), Bohrungen der Bohrdatenbank Niedersachsen einschließlich biostratigraphischen Daten und Bohrlochmessungen, geologische Profilschnitte und kleinräumige 3D-Lockergesteinsmodelle. Vor allem durch die Einbeziehung der beim LBEG vorhandenen 2D- und 3D-Seismikdaten, die überwiegend aus der privatwirtschaftlichen Kohlenwasserstoffexploration stammen, konnten wertvolle neue Erkenntnisse für die Quartärbasis gewonnen werden.

Die geologische Modellierung der Quartärbasis erfolgt mit Aspen SKUA® V14.5. Alle Eingangsdaten mussten zunächst zeit- und arbeitsintensiv aufbereitet und geologisch bewertet werden, bevor sie für die Modellierung verwendet werden konnten. Die Kartierung von Rinnengeometrien in der 2D- und 3D-Seismik, die sich als Erosionsformen in den präquartären Untergrund einschneiden, erfolgte im Zusammenspiel mit allen anderen verfügbaren Daten. Der weitaus größte Teil der reflexionsseismischen Daten liegt am LBEG in der Zeitdomäne vor. Die Zeit-Tiefen-Konvertierung der darauf basierenden Interpretationen erfolgte mit einem einfachen konstanten Geschwindigkeitsansatz von 1650 m/s.

Die bisherigen Ergebnisse der Neubearbeitung (ca. 11.800 km²) zeigen deutliche Unterschiede zur Quartärbasis von Kuster & Meyer (1995). Die Mehrzahl der bereits in Kuster & Meyer (1995) postulierten Rinnen konnte verifiziert werden. Allerdings ergaben sich auch erhebliche Veränderungen gegenüber der bestehenden Datengrundlage. Im Detail haben die Komplexität und die maximale Tiefe der Rinnen durch die Neumodellierung zugenommen. Die Geometrie der Rinnen (z.B. räumlicher Verlauf, Rinnenflanken) konnte in vielen Fällen deutlich besser aufgelöst werden. Einige der Rinnenverläufe von Kuster & Meyer (1995) konnten mit den neueren Daten nicht bestätigt werden. Dafür ermöglichte insbesondere die Interpretation der 2D- und 3D-Seismik die Kartierung zahlreicher bisher unbekannter Rinnenverläufe. Die Änderungen betreffen aber nicht nur die Rinnen, auch die Morphologie der Hochflächen konnte verfeinert und aktualisiert werden.

Insgesamt gewinnt die neu modellierte Quartärbasisfläche durch die Integration einer sehr umfangreichen Datenbasis an Detaillierungsgrad, Belastbarkeit und Aktualität.

6 Literaturverzeichnis

- Bombien, H., Hoffers, B., Breuckmann, S., Helms, M., Lademann, K., Lange, M., Oelrich, A., Reimann, R., Rienäcker, J., Schmidt, K., Slaby, M.-F., Ziesch, J. (2012): Der Geotektonische Atlas von Niedersachsen und dem deutschen Nordseesektor als geologisches 3D-Modell. *Geowissenschaftliche Mitteilungen*, 48, 6-13.
- Brückner-Röhling, S., Forsbach, H. & Kockel, F. (2005): The structural development of the German North Sea sector during the Tertiary and the Early Quaternary. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 156(2), 341-356. <https://doi.org/10.1127/1860-1804/2005/0156-0341>
- Degro, T. & Kinzel, M. (2018): Integration von Bohrungsdaten und 3D-Seismik – Neue Wege bei der Kartierung glazialer Rinnen in einer norddeutschen Erdgasprovinz. *Erdöl Erdgas Kohle*, 134(1), 29-32. <https://doi.org/10.19225/180105>
- Ehlers, J. (2020): *Das Eiszeitalter* (2. Auflage). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-60582-0>
- Ehlers, J., Grube, A., Stephan, H.-J. & Wansa, S. (2011): Pleistocene glaciations of North Germany – new results. In J. Ehlers, P. L. Gibbard & P. D. Hughes (Hrsg.), *Quaternary Glaciations – Extent and Chronology: A Closer Look. Developments in Quaternary Science*, 15, 149-162. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53447-7.00013-1>
- Gunnink, J. L., Maljers, D., van Gessel, S. F., Menkovic, A. & Hummelman, H. J. (2013): Digital Geological Model (DGM): a 3D raster model of the subsurface of the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences*, 92(1), 33-46. <http://dx.doi.org/10.1017/S0016774600000263>
- Herron, D. A. (2011): First steps in seismic interpretation. *Society of Exploration Geophysicists*. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802938.index>
- Kirkham, J. D., Hogan, K. A., Larter, R. D., Arnold, N. S., Ely, J. C., Clark, C. D., Self, E., Games, K., Huuse, M., Stewart, M. A., Ottesen, D. & Dowdeswell, J. A. (2022): Tunnel valley formation beneath deglaciating mid-latitude ice sheets: Observations and modelling. *Quaternary Science Reviews*, 323, 107680. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107680>
- Köthe, A. (2017): *Feinstratigraphie und Genese der jüngsten neogenen Sedimente im nördlichen Niedersachsen*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (unveröffentlicht)
- Kuster, H. (2005): Das jüngere Tertiär in Nord- und Nordostniedersachsen. *Geologisches Jahrbuch*, A158, 3-193.
- Kuster, H. & Meyer, K.-D. (1995): Quartärgeologische Übersichtskarte von Niedersachsen 1:500 000 - Tiefenlage der Quartärbasis. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover.
- Kuster, H. & Meyer, K.-D. (1979): Glaziäre Rinnen im mittleren und nördlichen Niedersachsen. *E&G Quaternary Science Journal*, 29(1), 135-156. <https://doi.org/10.3285/eg.29.1.12>
- Lang, J., Bebiolka, A., Noack, V., Schützke, J., Weihmann, S. & Breuer, S. (2025): The impact of the structural framework of the North German Basin on Pleistocene tunnel-valley formation. *Boreas*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/bor.12694>

- Litt, T., Behre, K.-E., Meyer, K.-D., Stephan, H.-J. & Wansa, S. (2007): Stratigraphische Begriffe für das Quartär des norddeutschen Vereisungsgebietes. *E&G Quaternary Science Journal*, 56(1/2), 7-65. <https://doi.org/10.3285/eg.56.1-2.02>
- NIBIS® KARTENSERVEN (2000): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 50 000. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover. <https://nibis.lbeg.de/cardomap3/?TH=1435>
- NIBIS® KARTENSERVEN (2018): Geologische und hydrostratigraphische Profilschnitte. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover; abgerufen am 09.06.2021. <https://nibis.lbeg.de/cardomap3/?permalink=16eXHcfD>
- NIBIS® KARTENSERVEN (2016): 3D-Modelle des Lockergesteins in Niedersachsen. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover; abgerufen am 01.02.2025. <https://nibis.lbeg.de/cardomap3/?TH=1829.1202>
- Panteleit, B. & Seiter, K. (2021): Applications of the 3D-Model at the Environment Agency. Case Study 21.2: Regional 3-D Models of Bremen, Germany: Management Tools for Resource Administration. In A. K. Turner, H. Kessler & M. J. v. d. Meulen (Hrsg.), *Applied Multidimensional Geological Modeling: Informing sustainable human interactions with the shallow subsurface* (pp. 508-518). Wiley Blackwell.
- Sattler, S., Helms, M. & Wangenheim, C. (2022): Geologisches 3D-Modell Tieferer Untergrund Norddeutsches Becken für Niedersachsen und Bremen (TUNB3D-NI) – Abschlussbericht und Dokumentationen zu den Modellkacheln. Mit Beiträgen von Rienäcker-Burschil, J., Stehle, M., Wolf, M., Bombien, H. & Ziesch, J.; Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), 230 Seiten; Hannover. <https://doi.org/10.48476/tunb3d-ni>
- Sattler, S., Wangenheim, C., Helms, M., Stehle, M. C., Schöner, R., Ziesch, J., Rienäcker-Burschil, J. & Wolf, M. (2024): Ein neues geologisches 3D-Modell für Niedersachsen: Vom GTA3D (2013) zu TUNB3D-NI (2022). *Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 100, 31-58. <https://doi.org/10.1127/sdgg/100/2024/31>
- Stackebrandt, W. (2009): Subglacial channels of Northern Germany – a brief review. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 160(3), 203-210. <https://doi.org/10.1127/1860-1804/2009/0160-0203>
- TNO - GDN. (2014): BRO DGM v2.2. TNO. Geological Survey of the Netherlands, Netherlands. <https://www.dinoloket.nl/en/subsurface-models/map>; abgerufen am 08.11.2024
- Wiederhold, H., Gabriel, G. & Grinat, M. (2005): Geophysikalische Erkundung der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne im Umfeld der Forschungsbohrung Cuxhaven. *Zeitschrift für Angewandte Geologie*, 51(1), 28-38.