

1. Einleitung und Motivation

In der Geophysik stellt die Modellierung synthetischer Referenzdatensätze eine wichtige Grundlage sowohl für die Evaluation grundlegender Schritte der Datenbearbeitung als auch für die Entwicklung neuartiger Ansätze zur Dateninterpretation und -inversion dar. Existieren solche Datensätze in der Seismik für eine Vielzahl geologischer Milieus, ermöglichen erst die Entwicklung entsprechender moderner Modellierungswerkzeuge sowie die Verfügbarkeit leistungsstarker Grafikprozessoren (GPUs) die Generierung synthetischer 3D-Georadar-Daten unter vertretbarem Zeitaufwand.

Als Grundlage für die Modellierung eines 3D-Georadar-Datensatzes, wie er typischerweise in geologischen Anwendungen im Feld aufgezeichnet wird, greifen wir auf ein frei verfügbares 3D-Porositätsmodell eines fluvio-glazialen, sedimentären Milieus zurück (Bayer et al., 2011). Als Ergebnis der Modellierung erhalten wir einen realitätsnahen 3D-Georadar-Referenzdatensatz, welcher nun als Grundlage für weitere Studien dienen soll, um das Potential des Georadarverfahrens zur Charakterisierung sedimentärer Strukturen detailliert zu evaluieren und zu verbessern.

Weiterhin zeigen wir die Resultate der Georadar-Strukturabbildung sowie einer sedimentologischen Interpretation und stellen diese ausgewählten Eingangsdaten gegenüber. Die Ergebnisse illustrieren sowohl den Erfolg der Modellierungsstudie als auch das Potential und die Limitationen einer typischen Bearbeitungs- und Auswertestrategie.

3. Modellierungsstrategie

Wir nutzen die Modelle der relativen dielektrischen Permittivität sowie der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit, um mit dem Softwarepaket gprMax (Warren et al., 2016), welches eine GPU-beschleunigte Berechnung erlaubt, einen realitätsnahen 3D-Georadar-Datensatz zu simulieren. Mit dem Ziel der Untersuchung sedimentärer Strukturen wählen wir eine Akquisitionsgeometrie mit konstantem Antennenabstand sowie einer senkrecht zur Profilrichtung x polarisierten Sendeantenne. Wichtige Parameter der Modellierung sind in der unten stehenden Tabelle zusammengefasst.

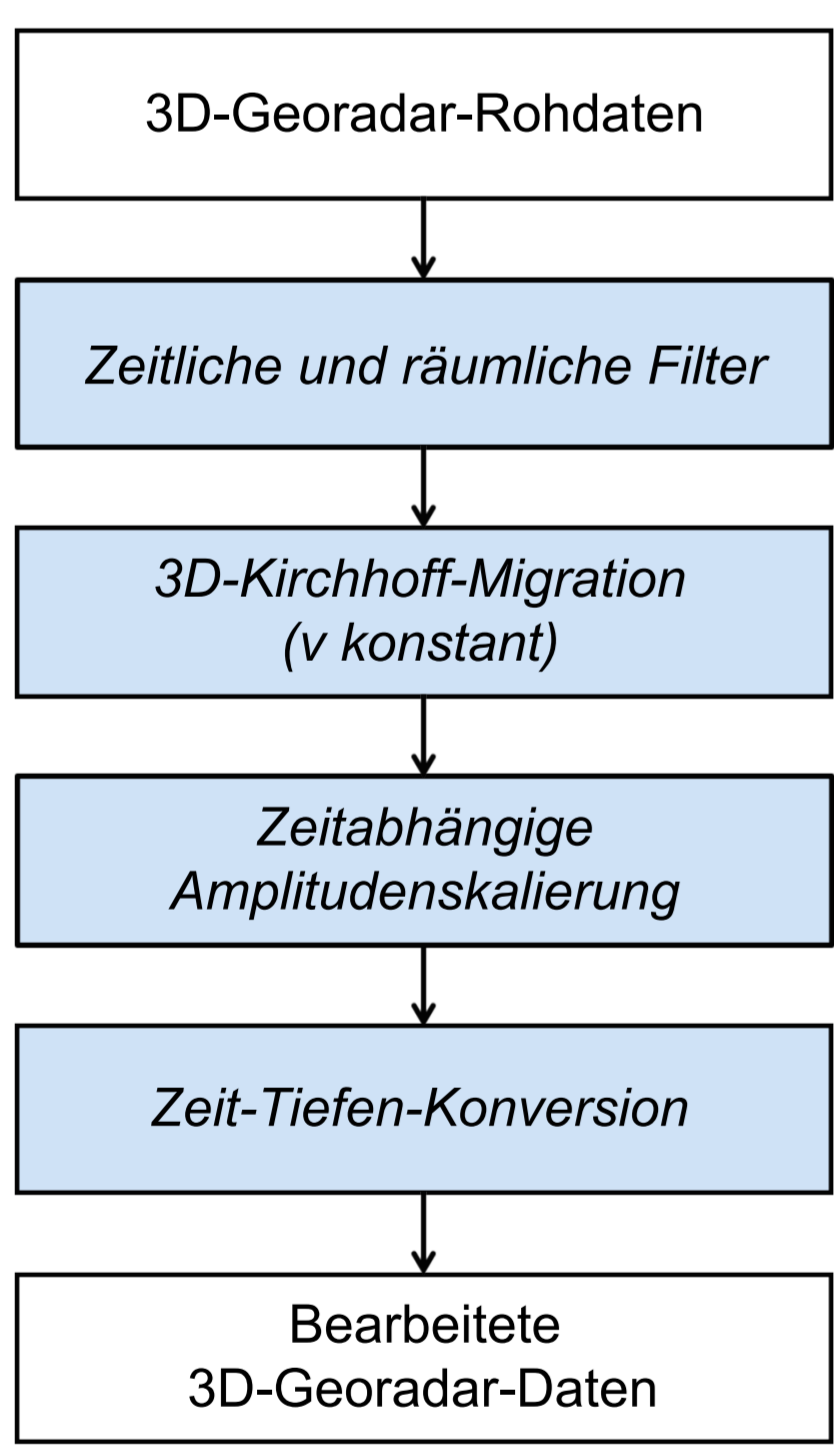
Modellauflösung	Spurabstand	Profilabstand	Antennenabstand	Zeitfenster	Mittelfrequenz	Quellentyp	Quellwavelenlänge
0,025 m	0,05 m	0,2 m	0,5 m	200 ns	100 MHz	Hertz'scher Dipol	Ricker

Ein limitierender Faktor bei der Verwendung moderner GPUs zur Berechnung synthetischer Georadar-Daten stellt deren begrenzter Grafikspeicher dar. Daher verwenden wir zur Berechnung der Georadar-Daten einen so genannten „Sliced-3D“-Ansatz (Delf et al., 2017): Wir trennen die Eingangsmodelle in drei in y -Dimension überlappende Quader auf, simulieren die Georadar-Daten in deren Zentren und fügen die resultierenden Datensätze anschließend zusammen.

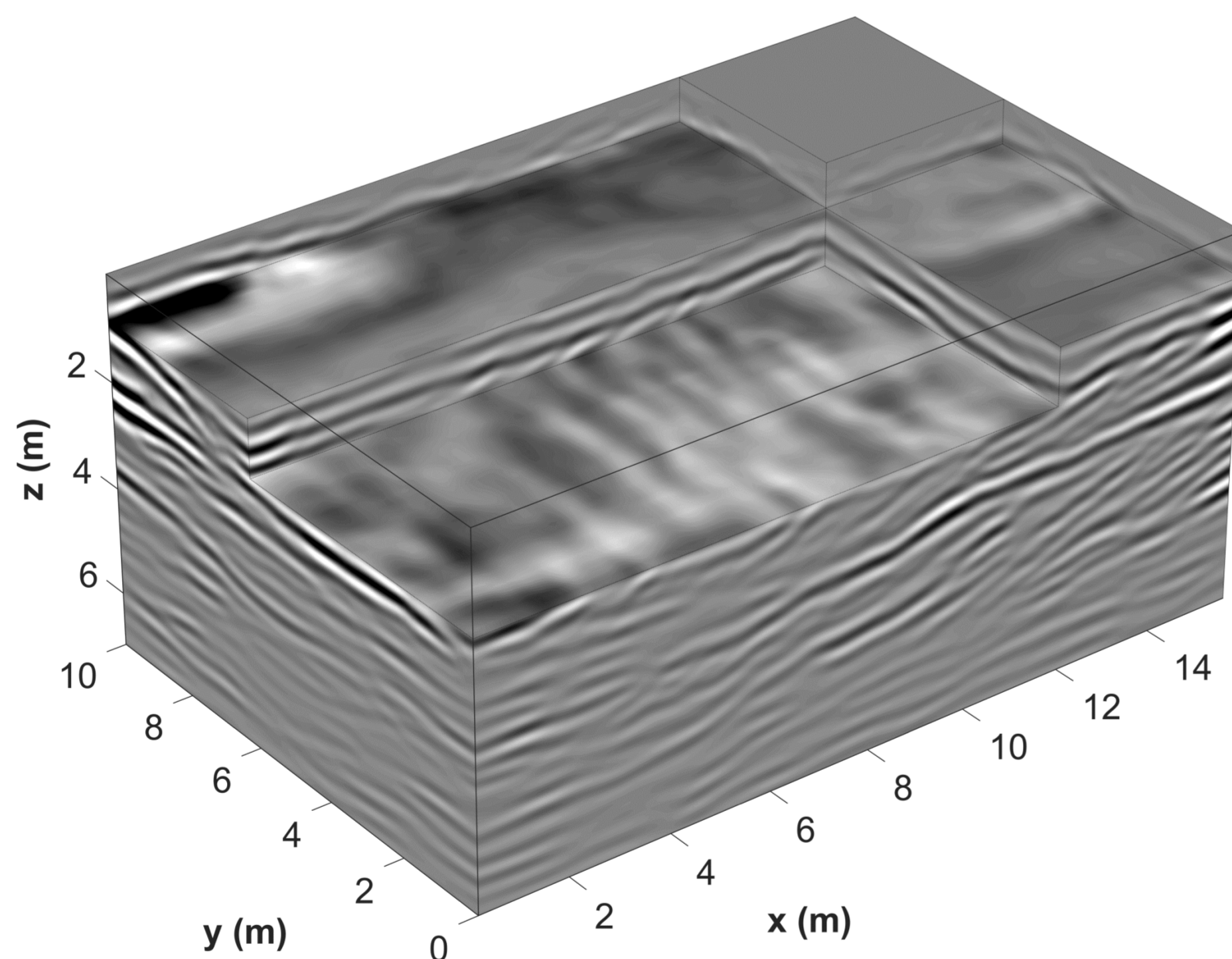
4. Georadar-Datenbearbeitung und Resultat

Nach einer Rechenzeit von einigen Wochen auf einem modernen Grafikprozessor erhalten wir einen 3D-Georadar-Datensatz, auf den wir hier eine etablierte 3D-Bearbeitungssequenz zur Strukturabbildung anwenden (a). Das resultierende Georadar-Tiefenvolumen zeigt ein Abbild komplexer Strukturen eines vollgesättigten, sedimentären Milieus wie es als Ergebnis einer optimalen Akquisitionskampagne im Feld erwartet werden kann (b).

(a) 3D-Bearbeitungssequenz



(b) Bearbeiteter 3D-Georadar-Datensatz

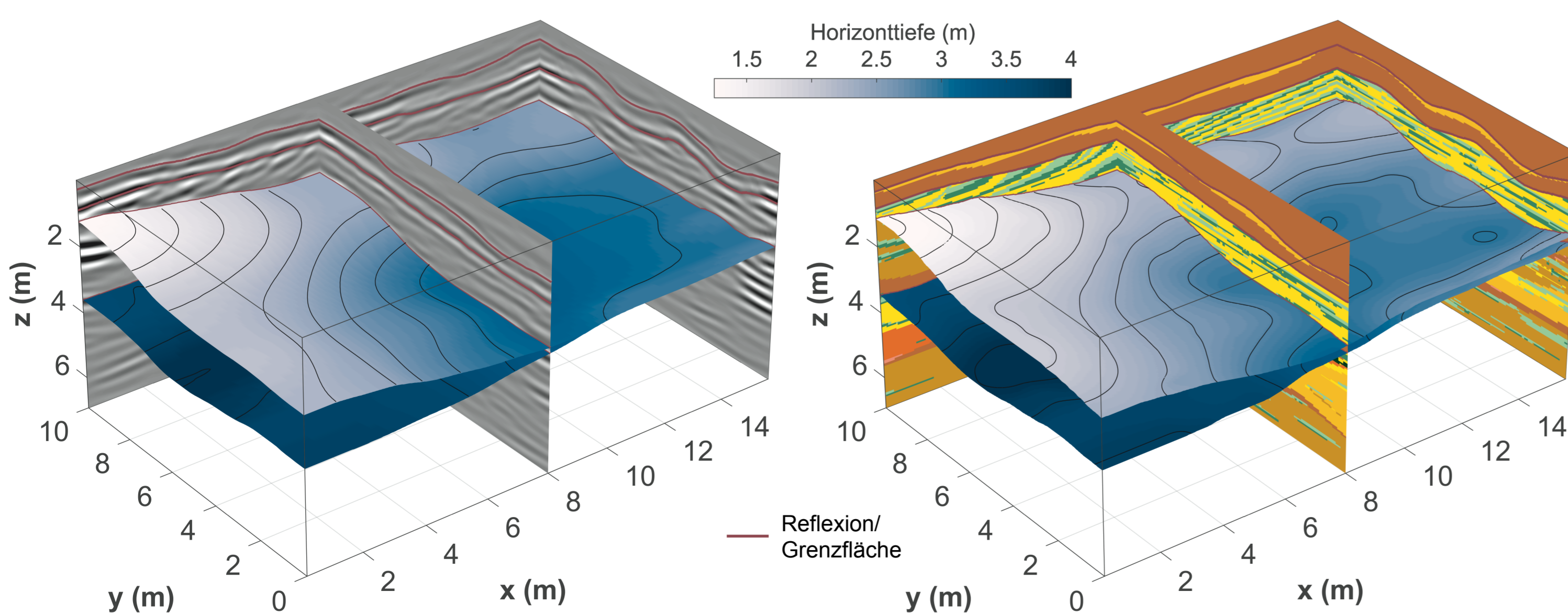


6. Sedimentologische Interpretation

Im Zuge einer weiterführenden Analyse wurden Reflexionen identifiziert, welche großräumig (semi-)automatisch verfolgt werden konnten. Diese Strukturen sowie zwei daraus abgeleitete Horizonte zeigen wir in (a). Die den Reflexionen jeweils zugeordneten Grenzflächen und Horizonte aus dem Lithofaziesmodell sind in (b) dargestellt.

(a) Georadar: Reflexionen und Horizonte

(b) Lithofazies: Grenzflächen und Horizonte

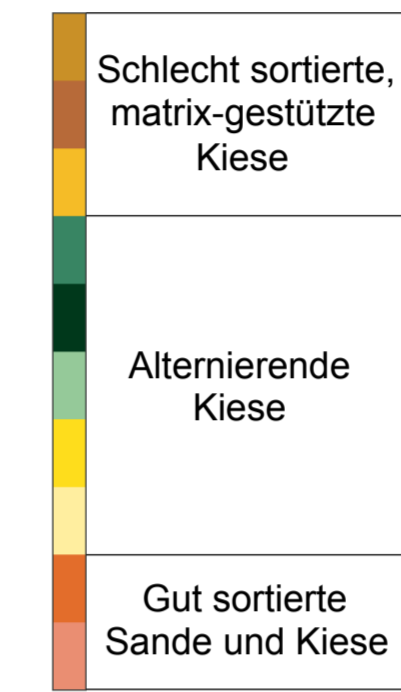
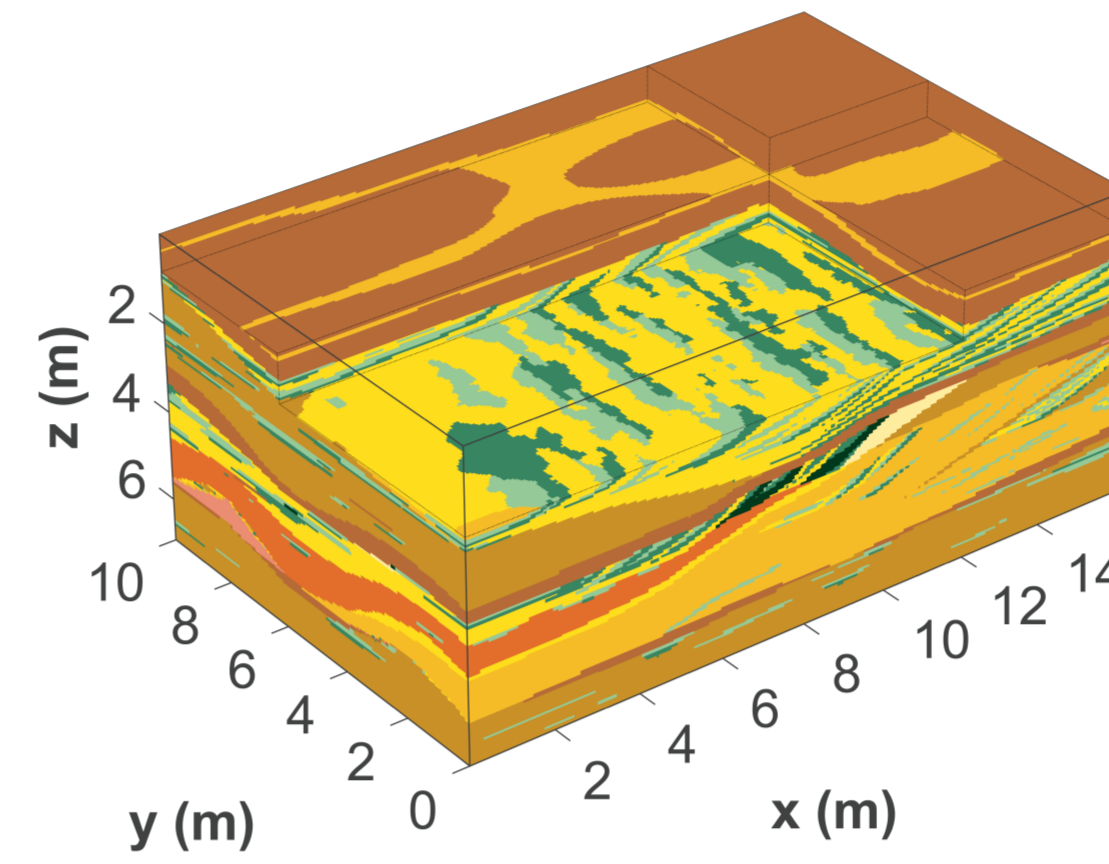


Die zwei in ihrer Gänze dargestellten Horizonte zeigen, dass sowohl Tiefentrends als auch absolute Tiefen der Georadar-Horizonte in hohem Maße mit denen im Lithofaziesmodell korrelieren. Unterhalb einer Tiefe von ca. 4 m ist eine Interpretation räumlich kontinuierlicher Georadar-Horizonte jedoch limitiert, da das Strukturabbild mit zunehmender Tiefe von komplexen Interferenzmustern dominiert wird.

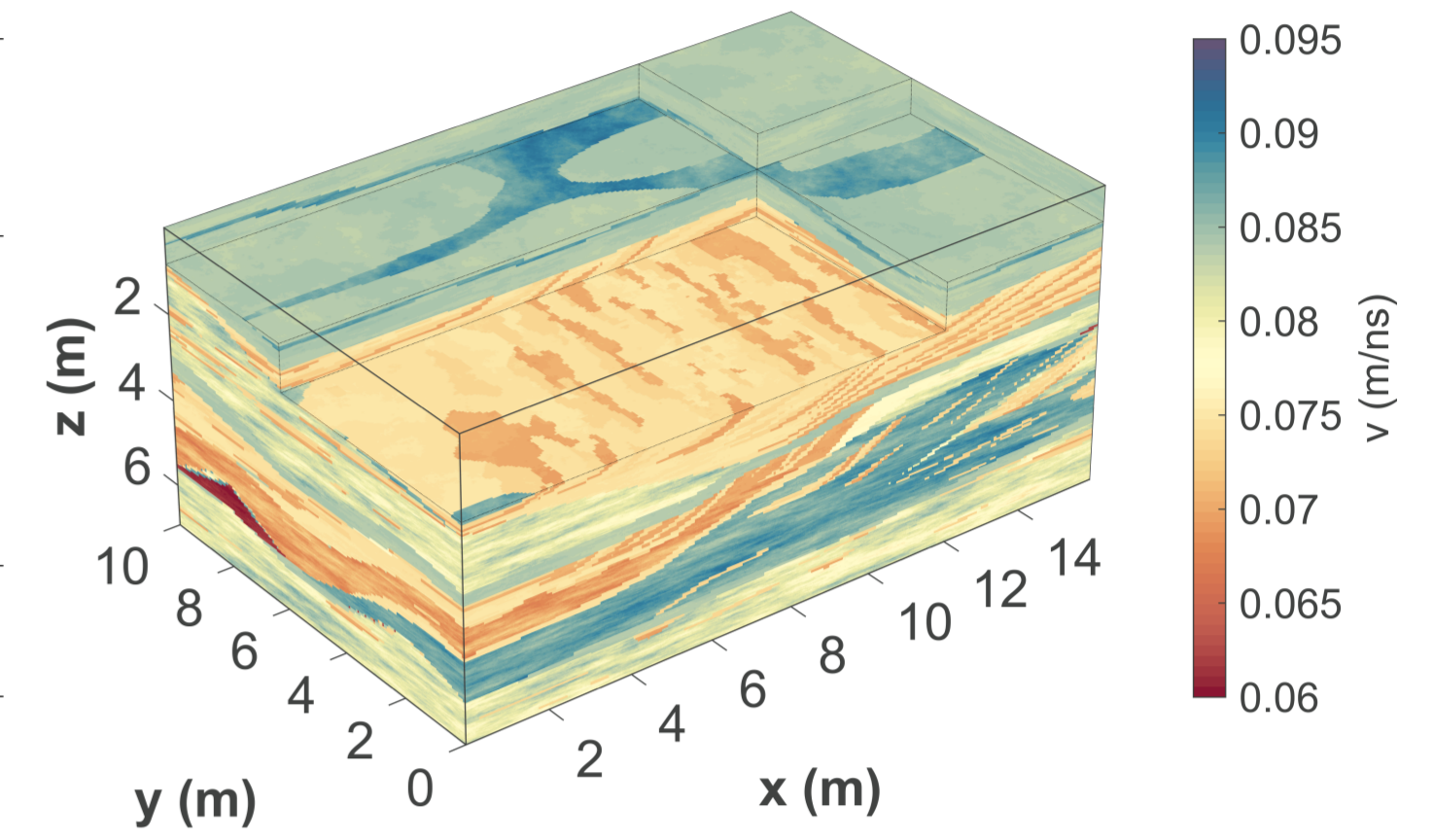
2. Datengrundlage und Modellgenerierung

Als Datengrundlage dient uns ein hochaufgelöstes Untergrundmodell fluvio-glazialer Ablagerungen der Kiesgrube Herten (16 m lang, 10 m breit, 7 m tief; Bayer et al., 2011). Dieses wird durch 10 Lithofazies definiert (a), für welche repräsentative Porositäten (b) und deren Unsicherheiten im Labor ermittelt wurden. Wir nutzen diese faziespezifischen Unsicherheiten, um realitätsnahe, räumlich korrelierte Heterogenitäten mit einer Von-Kármán-Autokorrelationsfunktion zu modellieren. Folglich zeigen unsere Parametermodelle Variationen auf diversen räumlichen Skalen. Unter Verwendung klassischer petrophysikalischer Beziehungen (CRIM-Modell und Archie-Gleichung) sowie unter der Annahme vollgesättigter Medien leiten wir aus der Porositätsverteilung Modelle der relativen dielektrischen Permittivität und der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit ab. Wir zeigen die daraus resultierenden Modelle der Georadar-Ausbreitungsgeschwindigkeit und des spezifischen elektrischen Widerstandes in (c) und (d).

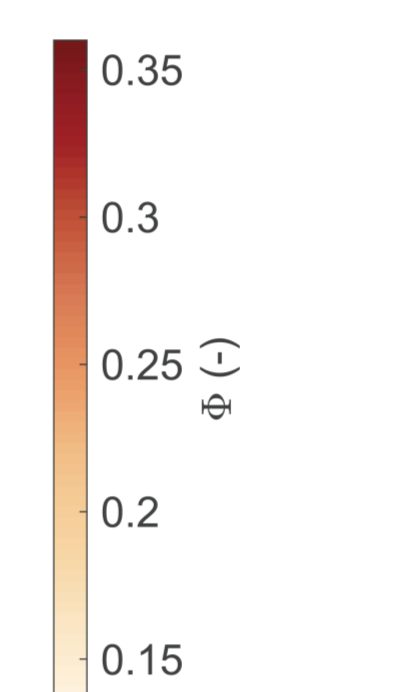
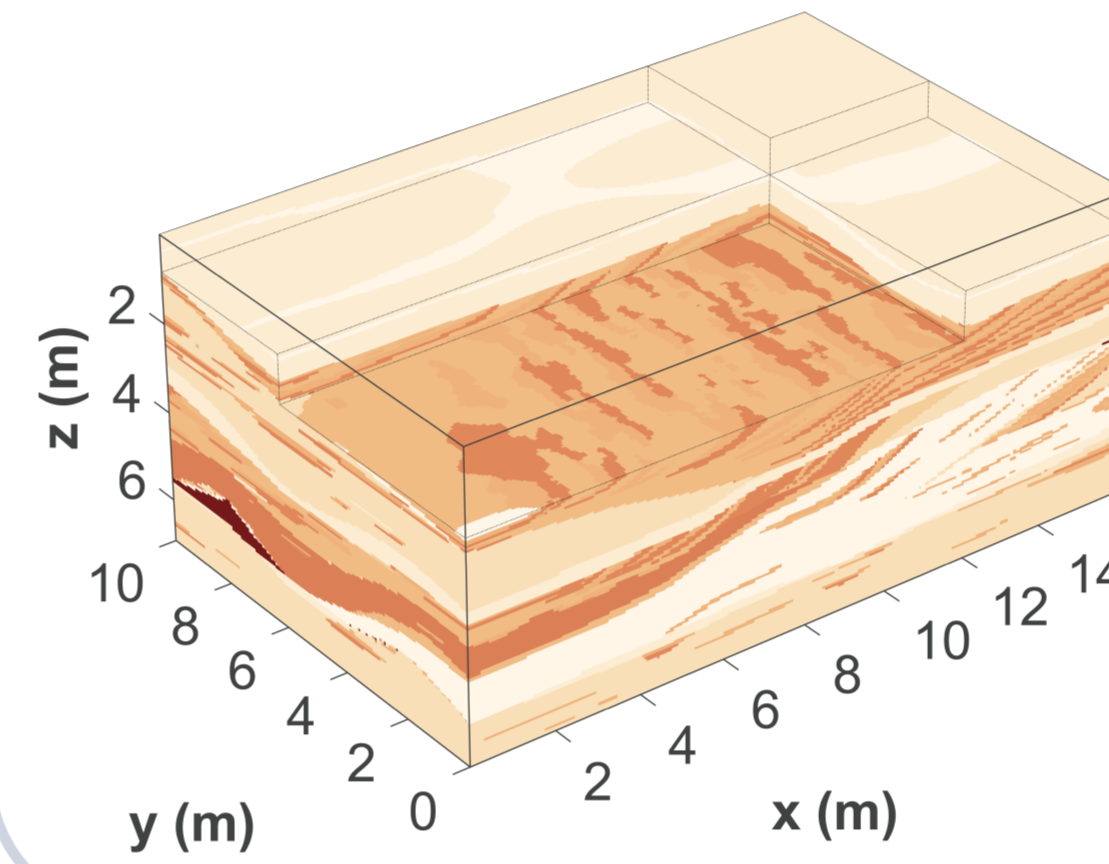
(a) Lithofazies



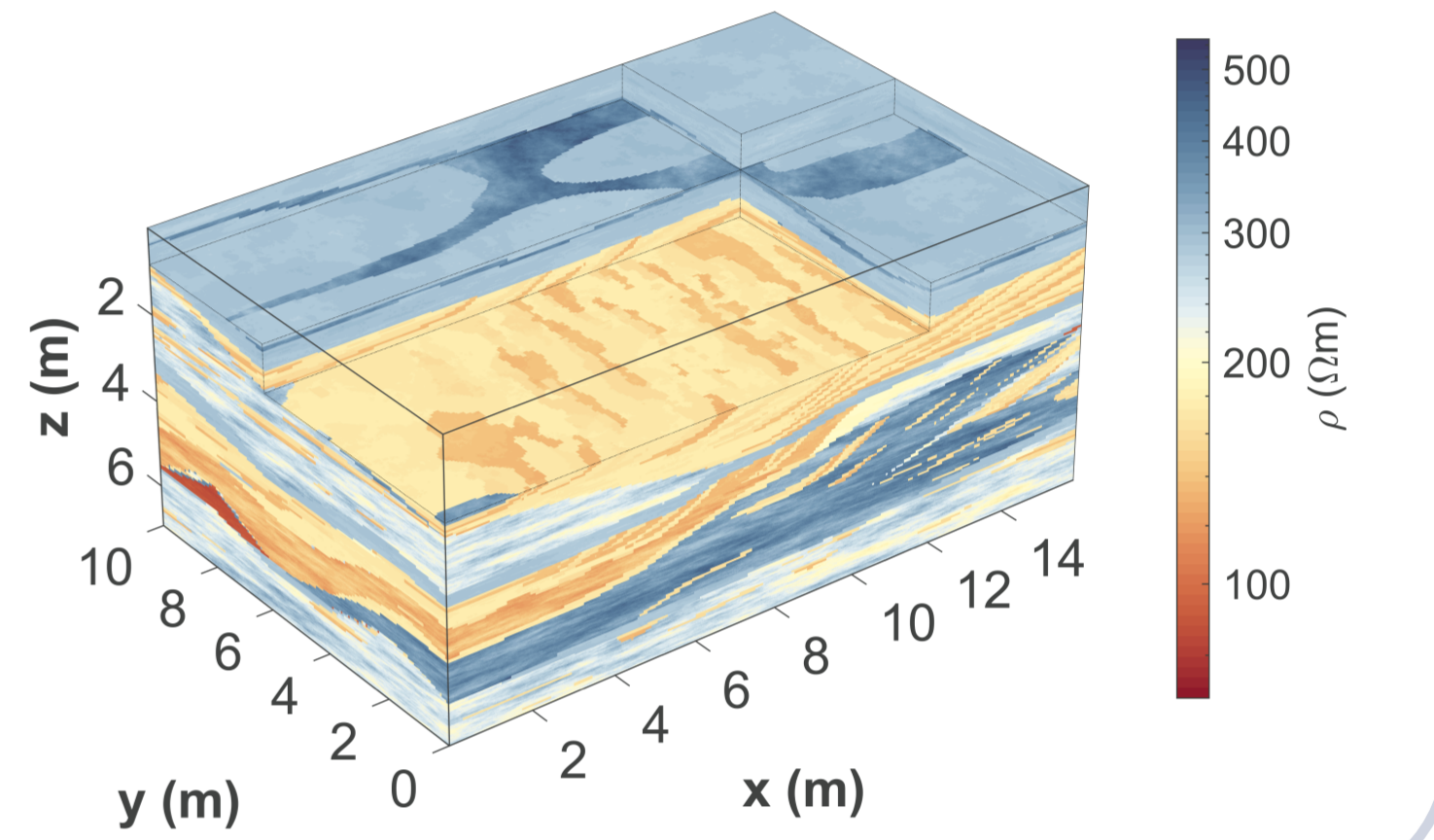
(c) Georadar-Ausbreitungsgeschwindigkeit



(b) Porosität

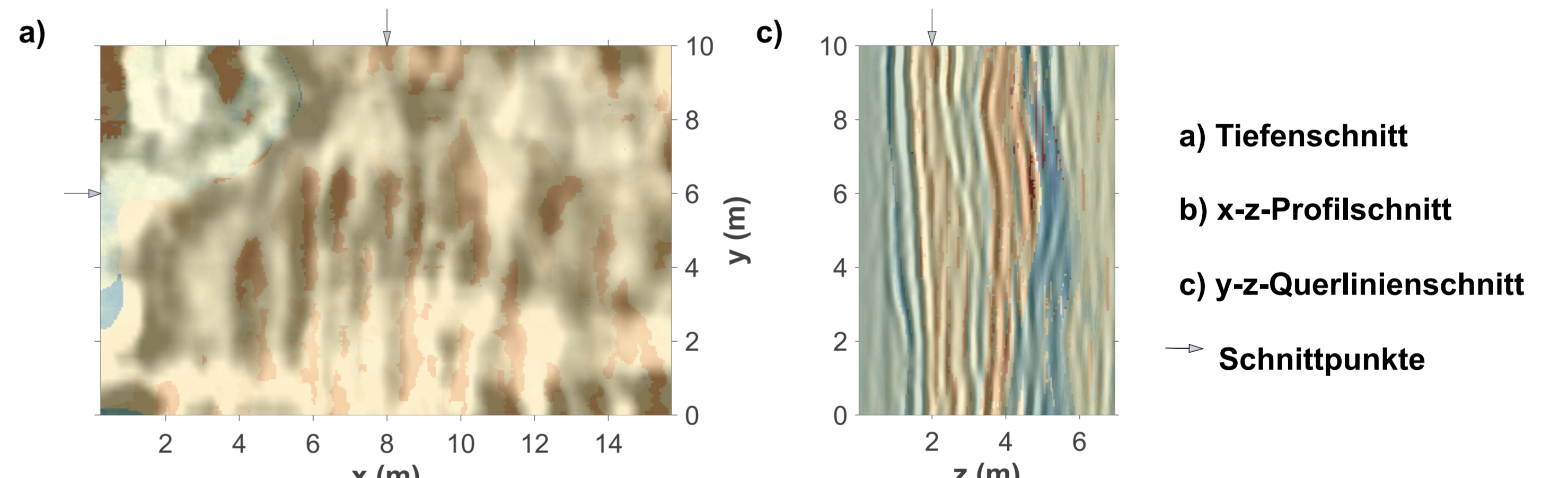


(d) Spezifischer elektrischer Widerstand



5. Vergleich von Georadar-Daten mit Eingangsmodell

Ein Vergleich von bearbeiteten 3D-Georadar-Daten mit dem Eingangsmodell gibt Aufschluss über das Potential des Georadars im Hinblick auf eine sedimentologische Strukturerkundung. Exemplarisch zeigen und analysieren wir in (a) bis (c) ausgewählte Schnitte der bearbeiteten 3D-Georadar-Daten, die gemeinsam mit einem transparenten Modell der Georadar-Ausbreitungsgeschwindigkeit mit gleicher Farbskalierung wie in 2(c) visualisiert sind.



Exemplarische Strukturen in verschiedenen Tiefenbereichen

- ▽ Lagegetreue, hochauflösende, kontinuierliche räumliche Abbildung (sub-)horizontaler bis geneigter Hauptgrenzflächen
- ▲ Abnehmendes Auflösungsvermögen und zunehmende Dominanz komplexer Interferenzmuster verringern Lagerichtigkeit und Kontinuität der abgebildeten Hauptgrenzflächen

7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die hier präsentierte Simulationsstudie liefert einen bisher einzigartigen 3D-Georadar-Referenzdatensatz eines fluvio-glazialen, sedimentären Milieus. Die Resultate einer klassischen Auswertestrategie illustrieren das Potential und die Limitationen der gewählten Bearbeitungs- und Interpretationsansätze zur Abbildung komplexer sedimentärer Strukturen mit dem Georadar. Die hier präsentierte Kombination aus realitätsnahem Untergrundmodell und Georadar-Referenzdatensatz soll zukünftig benutzt werden, um neuartige 2D/3D-Bearbeitungsmethoden oder alternative Interpretationsansätze wie beispielweise attributbasierte Analysen (Tronicke und Allroggen, 2015) zu evaluieren und weiter zu entwickeln. Im Sinne einer multi-methodischen Untersuchung mit dem Ziel der Verbesserung einer integrierten geophysikalischen Interpretation kann das vorgestellte Untergrundmodell natürlich auch genutzt werden, um Datensätze weiterer geophysikalischer Erkundungsmethoden (Gleichstromgeoelektrik, elektromagnetische Induktion etc.) zu modellieren und deren Potential bei entsprechenden Fragestellungen zu evaluieren.

Referenzen und weiterführende Literatur

Bayer, P., Huggenberger, P., Renard, P., Comunian, A. (2011). Three-dimensional high resolution fluvio-glacial aquifer analog: Part 1: Field study, *Journal of Hydrology* (405), pp. 1-9.

Delf, R., Giannopoulos, A., Bingham, R., Hulton, N., Curtis, A. (2017). A Sliced-3D FDTD approach as an alternative to 2D Ground Penetrating Radar modelling, *9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar - IWAGPR 2017*, pp. 1-5.

Tronicke, J., Allroggen, N. (2015). Toward an automated delineation of ground-penetrating radar facies in clastic sediments: An example from stratified glaciofluvial deposits, *Geophysics* (80), pp. A89-A94.

Warren, C., Giannopoulos, A., Giannakis, I. (2016). gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar, *Computer Physics Communications* (209), pp. 163-170.