

1. Einleitung und Motivation

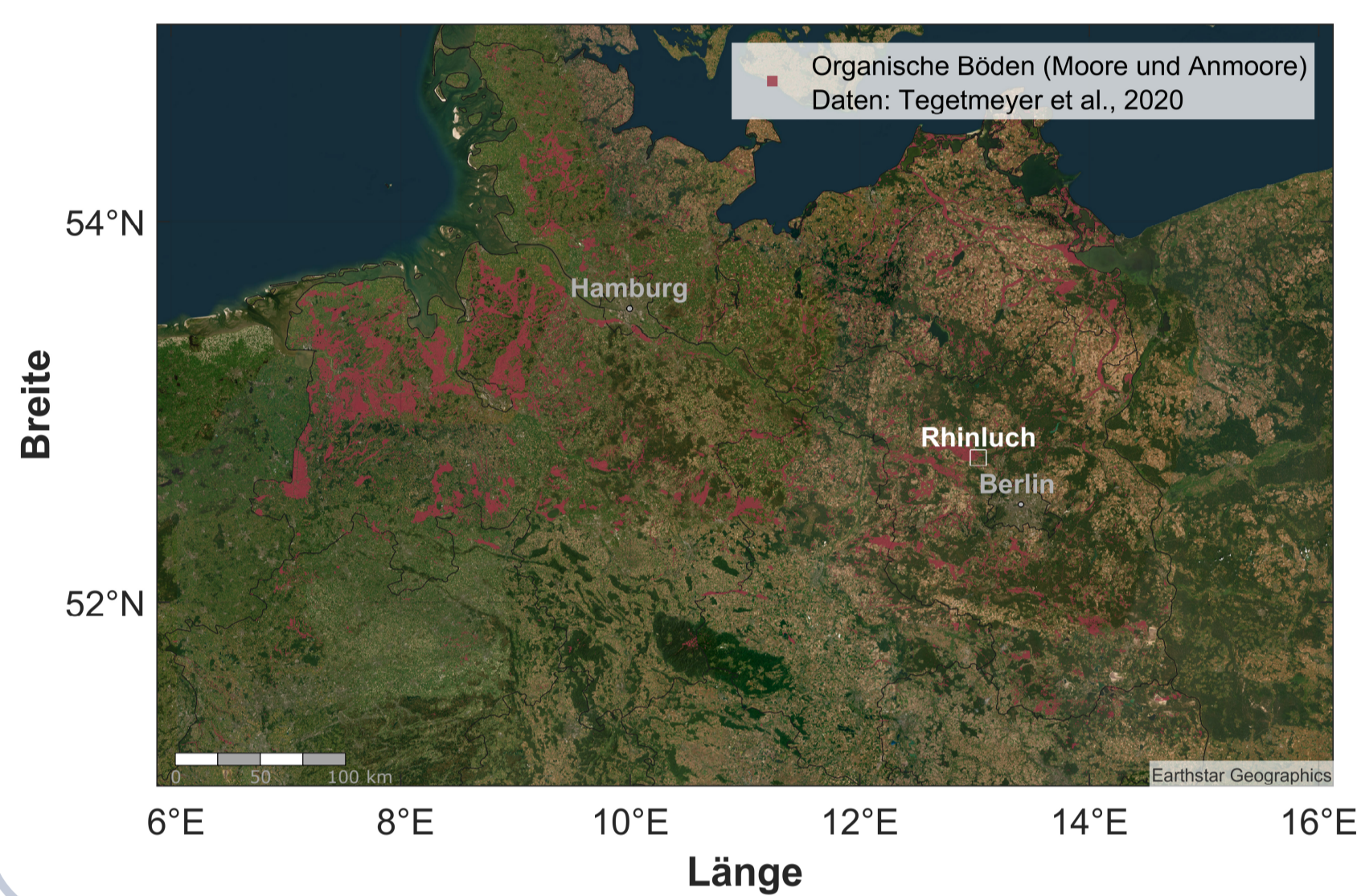
Bei bodenkundlichen und geologischen Untersuchungen werden ground-penetrating radar (GPR)-Reflexionsdaten routinemäßig zur Erkundung des oberflächennahen Untergrundes verwendet. Da Torfgebiete einen wichtigen Teil des globalen Klimasystems darstellen, besteht ein zunehmendes Interesse daran, Torfablagerungen detaillierter zu untersuchen und zu charakterisieren. Bis heute konzentriert sich die Anwendung von GPR in Mooren auf die Erfassung von 2D Daten entlang ausgewählter Profile, häufig mit dem Ziel, Modelle der Torfmächtigkeit und -stratigraphie abzuleiten.

Wir stellen eine 3D GPR-Fallstudie aus einem Mooregebiet im Nordosten Deutschlands vor, in welcher wir unter Verwendung moderner Aufzeichnungs-, Bearbeitungs- und Interpretationsstrategien ein detailliertes 3D Modell des untersuchten Torfkörpers entwickeln. Unsere Ergebnisse zeigen erhebliche Schwankungen in der Torfmächtigkeit einschließlich einer markanten, kreisförmigen Vertiefungsstruktur. Wir kommen zu dem Schluss, dass solche Strukturen mittels 2D GPR-Aufzeichnungsstrategien nicht zuverlässig hätten abgebildet werden können. Somit unterstreichen unsere Ergebnisse den Nutzen von 3D GPR-Strategien, um ein tieferes Verständnis von Torfablagerungen und ihren Eigenschaften zu etablieren.

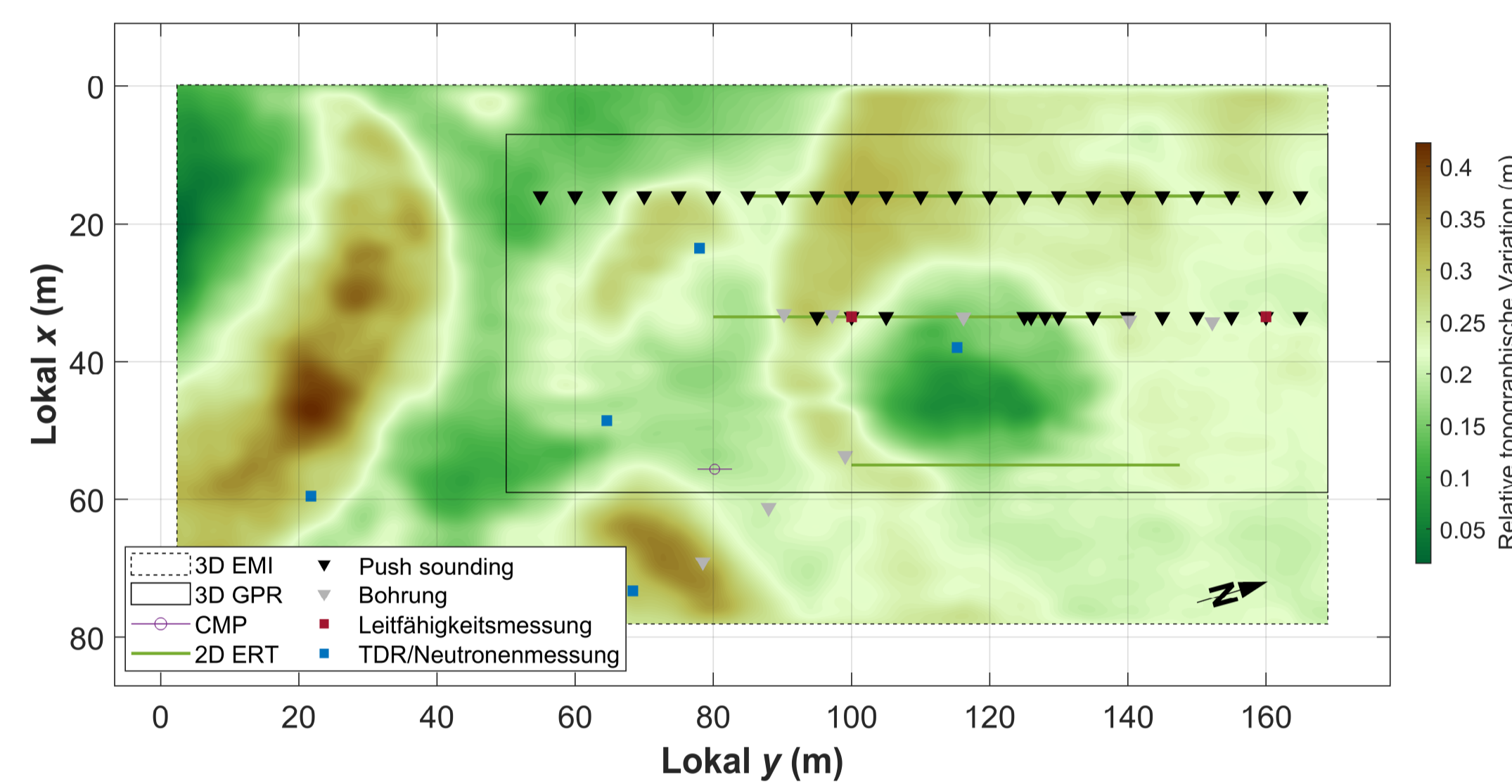
2. Feldstandort und Datenaufzeichnung

- Landwirtschaftlich genutztes, entwässertes Niedermoor im Rhinluch (Flusssystem der Elbe, **2.1**)
- Torfkörper mit unterschiedlichen Zersetzungsgraden über Sand-/Tonablagerungen
- Hochgradig zersetzter, fast trockener Torf im Oberboden überlagert Torfe mit geringerer Zersetzung und höherer Wassersättigung
- GPR (100 MHz): Flächenhafte 3D Messungen mit konstantem Antennenabstand (*common-offset*), lokale Messung mit variablem Antennenabstand (*common-midpoint*, CMP)
- Zusätzliche zur Verfügung stehende Methoden/Daten: 3D elektromagnetische Induktion (EMI), 2D geoelektrische Tomographie (ERT), manuelle Bohrstockmessungen (*push soundings*) zur Torfmächtigkeitsbestimmung, Bohrungen, Leitfähigkeitsmessungen, TDR/Neutronensonden
- Topographie und Positionierung von GPR und EMI mittels selbstverfolgender Totalstation (**2.2**)

2.1: Moore in Norddeutschland



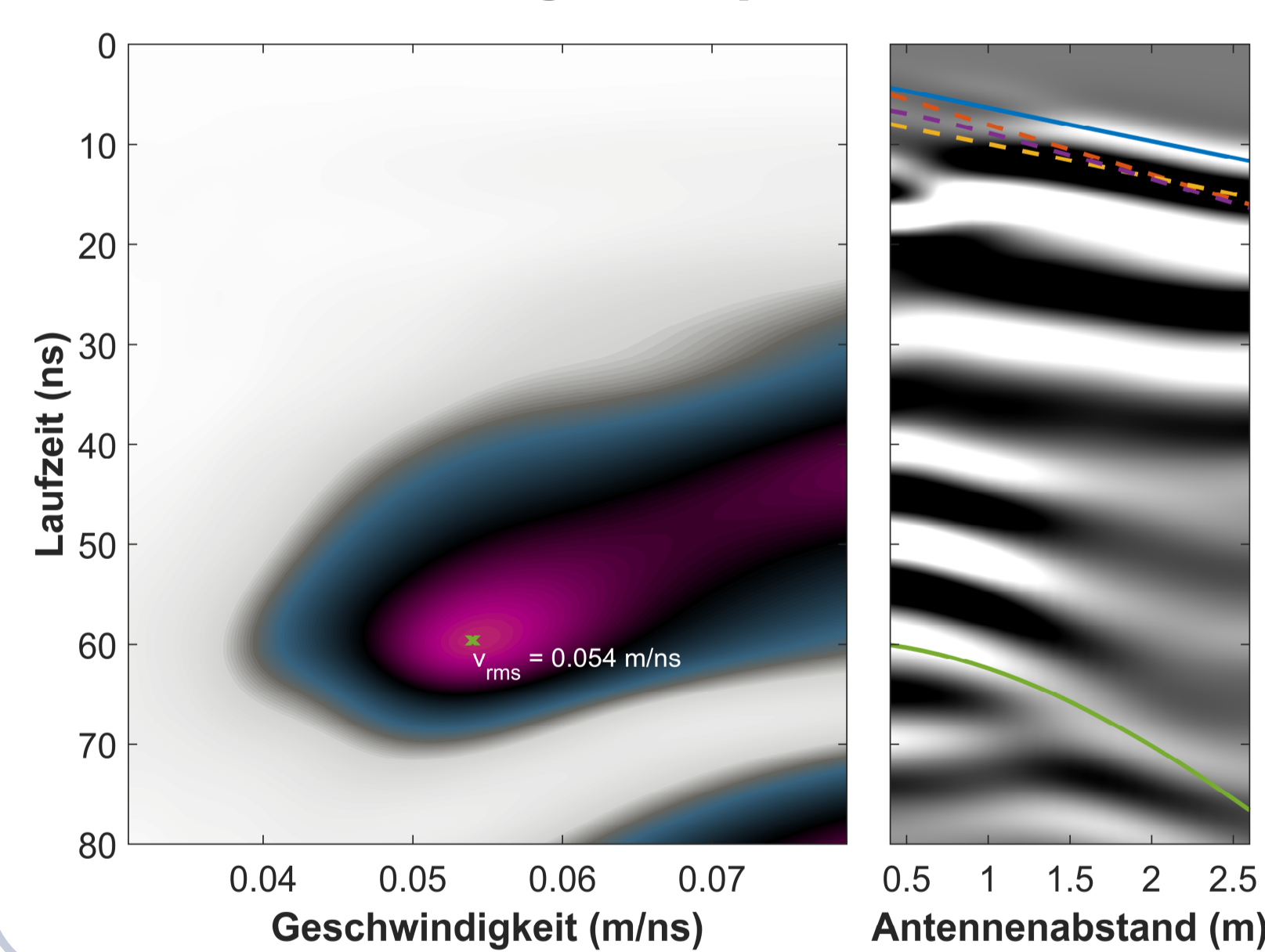
2.2: Feldstandort im Rhinluch



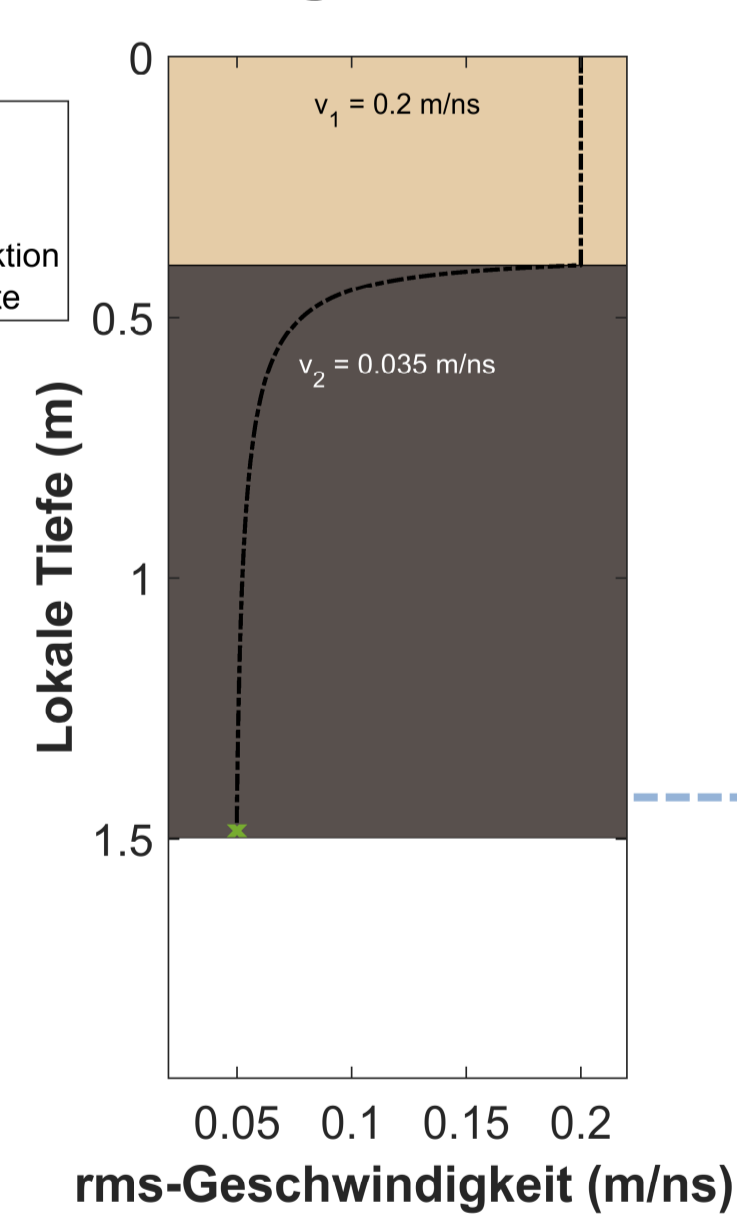
3. GPR: Geschwindigkeitsmodell und Datenbearbeitung

- Reflexionsbasierte CMP-Geschwindigkeitsanalyse (**3.1**)
- CMP zeigt direkte Luftwelle und eine Reflexion, keine Bodenwelle
- Zudem: rms-Geschwindigkeit der Reflexion (0,054 m/ns) höher als typische Geschwindigkeit in intaktem Torf (~0,035 m/ns)
- Daher: Zweischichtmodell mit dünner, oberflächennaher Hochgeschwindigkeitsschicht (**3.2**) zur Erklärung rms-Geschwindigkeit
- Theoretische Laufzeiten für Zweischichtmodell (gestrichelt im CMP): Interferenz verschiedener Wellentypen → Bodenwelle maskiert
- CMP-Analyse/Geschwindigkeitsmodell an komplexen Standorten für Datenbearbeitung (**3.3**) und Interpretation unabdingbar

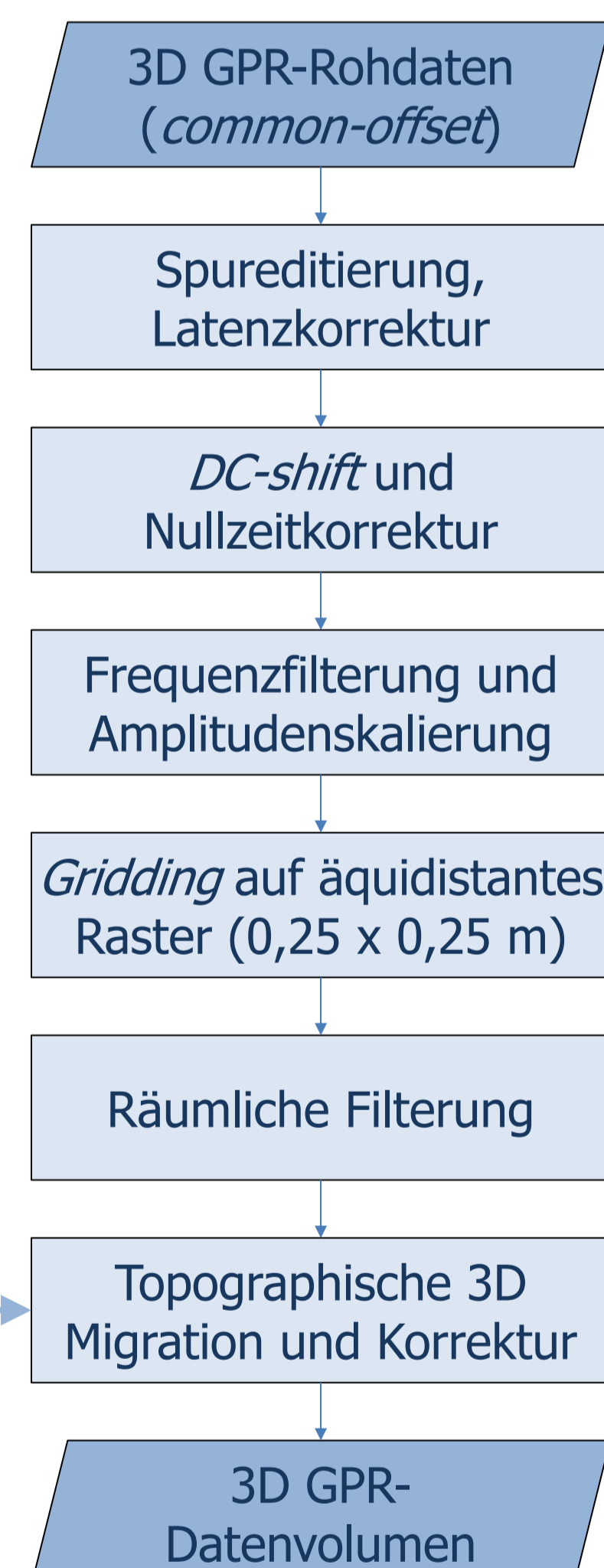
3.1: Geschwindigkeitsspektrum und CMP



3.2: Geschwindigkeitsmodell

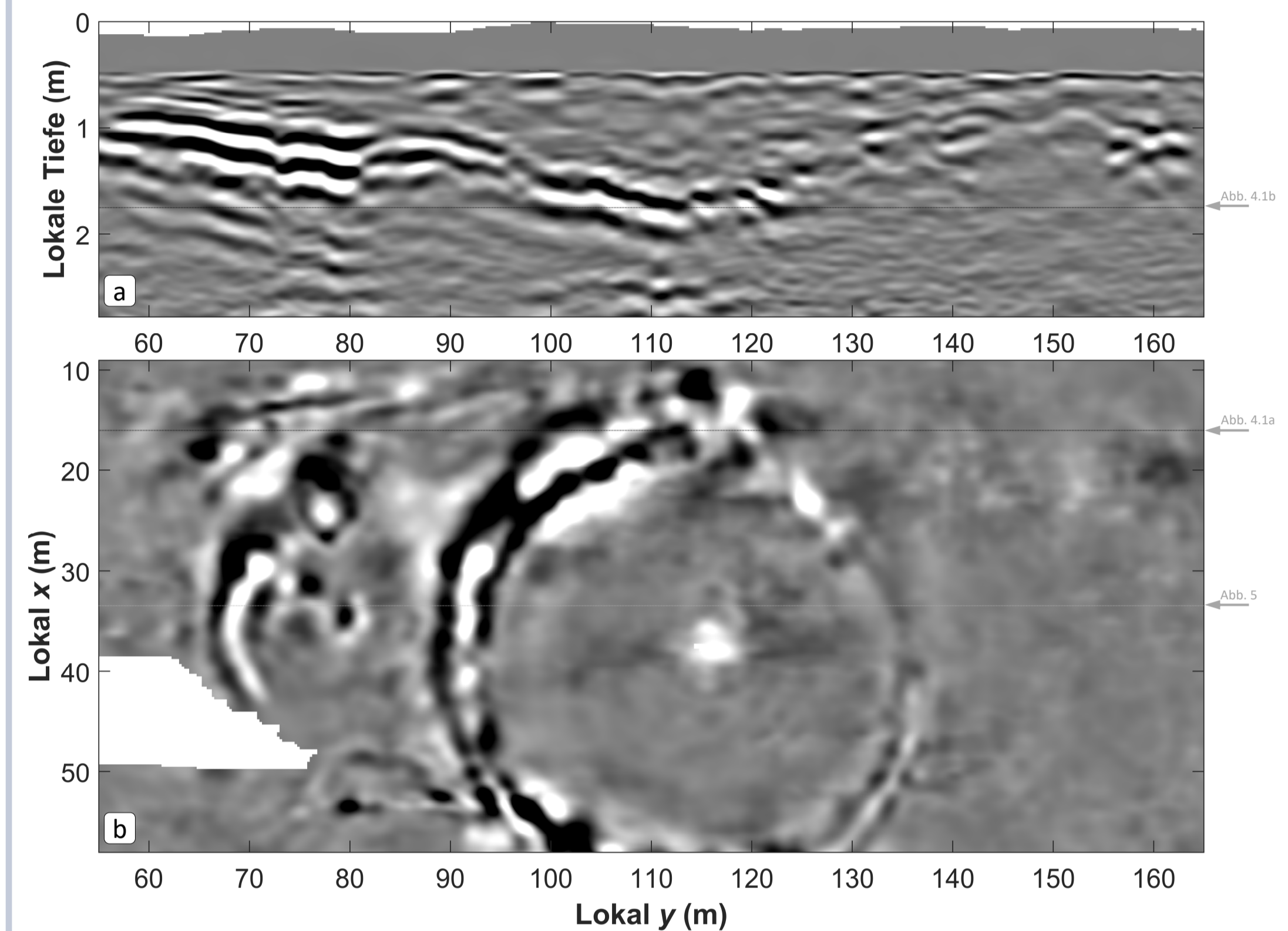


3.3: Bearbeitungssequenz



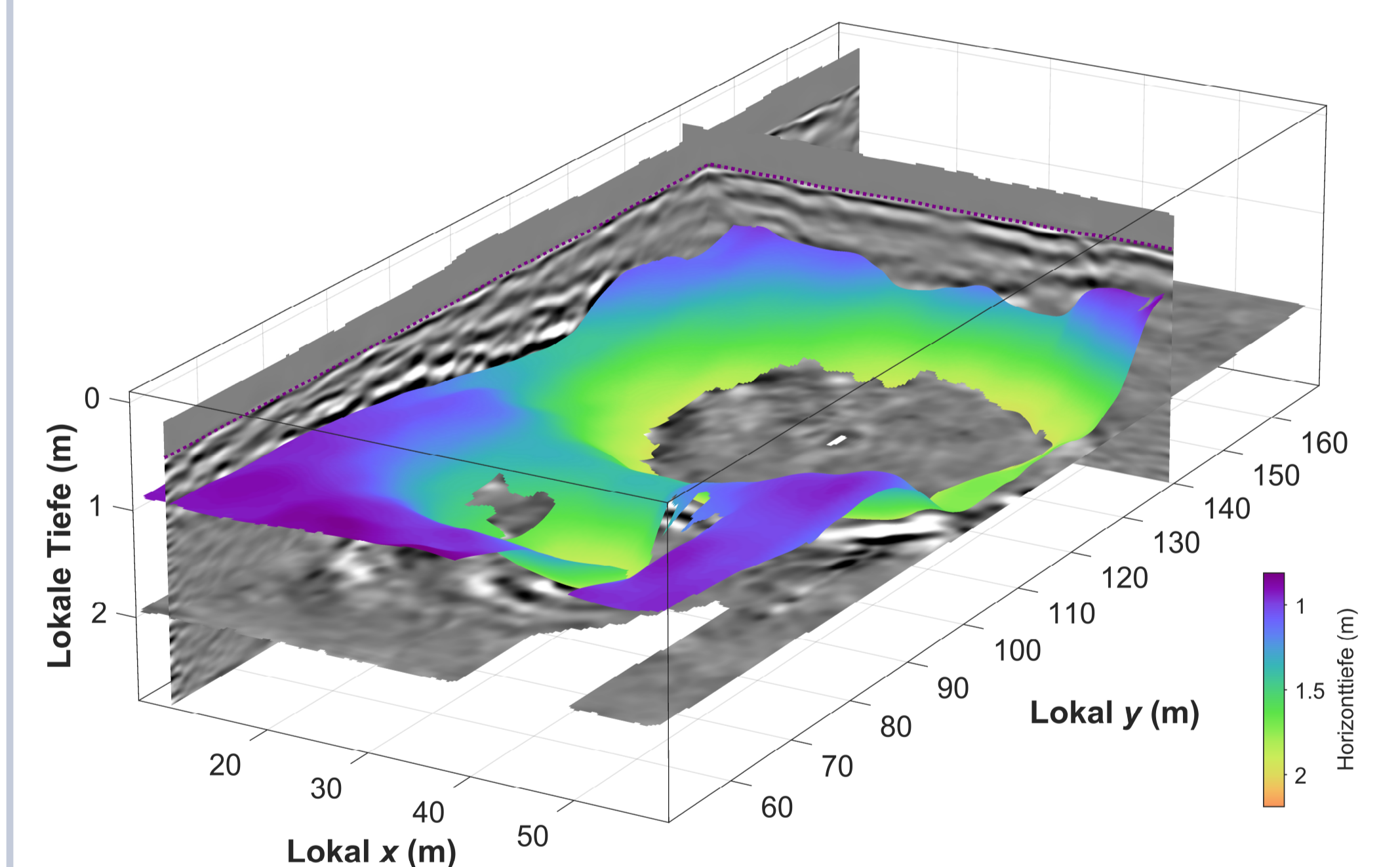
4. GPR: Interpretation

4.1: GPR-Datenvolumen



- Profil- und Tiefenschnitt (**4.1a,b**) des GPR-Datenvolumens nach erfolgreicher Anwendung unserer Bearbeitungssequenz (**3.3**)
- Charakteristische Reflexionsmuster (**4.1a**): Oberflächennahe, nahezu horizontale Reflexion; undulierende Reflexion mit lateral variablen Amplituden, formt runde Muldenstruktur (**4.1b**)

4.2: GPR-Horizonte

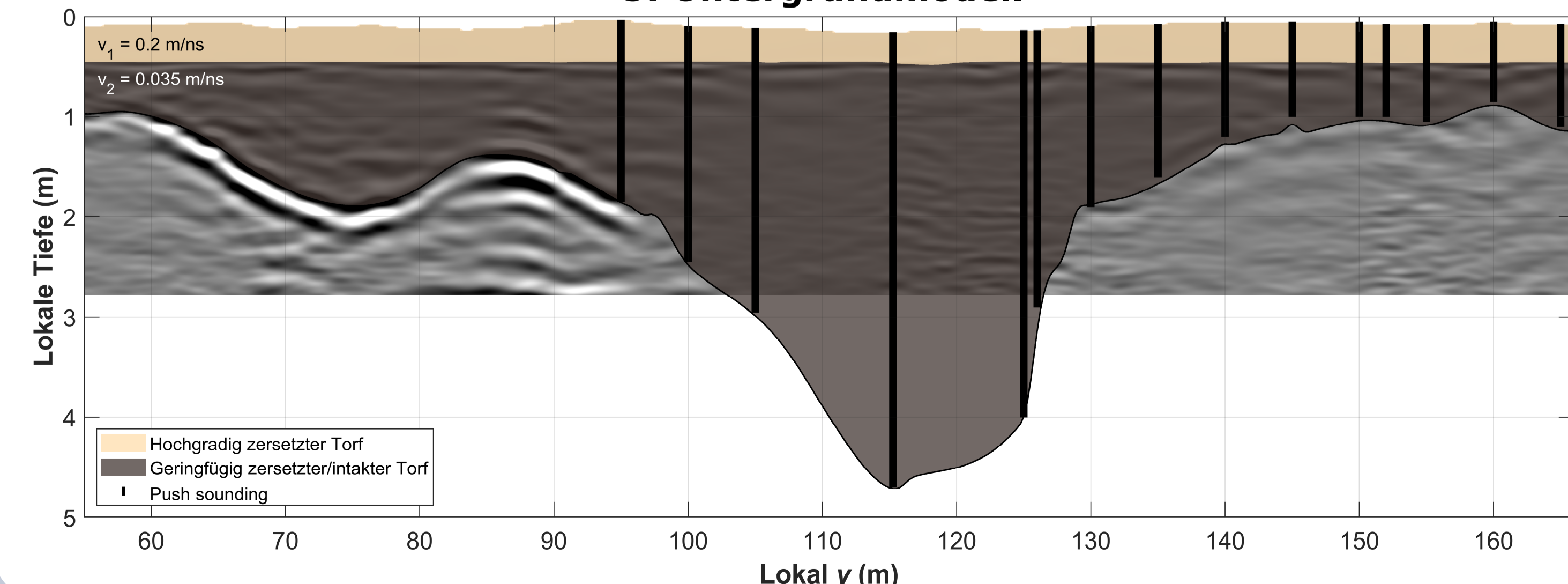


- Horizontbasierte Strategie: Manuelle und automatische Verfolgung beider Reflexionsstrukturen im GPR-Volumen (**4.2**)
- Lage der torfinternen Schichtgrenze (---) und der Torfbasis (als Horizont mit farbkodierter Tiefe) bis ca. 2,2 m interpretierbar

5. Integrierte Interpretation

- Torfkörpermodell mit geschlossener Unterkante durch Integration von 3D GPR, CMP, Topographie und Bohrstockmessungen (*push soundings*)
- Hochgradig zersetzte Deckschicht über weniger zersetztem/intaktem Torf
- Variation der Sättigung, Porosität: großer Geschwindigkeitskontrast (1:6)
- Kreisförmige Torfmulde mit steilen Flanken und maximaler Tiefe >4,5 m
- Gesamtes Torfvolumen ca. 8600 m³, davon rund 25% stark zersetzt

5: Untergrundmodell



6. Schlussfolgerungen und Ausblick

In dieser Studie präsentieren wir ein 3D Modell eines Torfkörpers, welches wir aus GPR-Daten und zusätzlichen Bodenuntersuchungen ableiten. Wir zeigen, dass 3D Strategien für solch komplexe Untersuchungsgebiete unabdingbar sind, da reine 2D Strategien zu einer verzerrten Untergrundabbildung und folglich zu Fehlinterpretationen führen können. Auch zeigt unsere Studie, dass in Bereichen, an denen geophysikalische Verfahren an ihre Grenzen stoßen, die Integration lokaler Bodenuntersuchungen, der Topographie, und geologischer Daten hilft, ein umfassendes und präzises Abbild komplexer Untergrundstrukturen zu generieren.

Unsere Ergebnisse liefern ein grundlegendes Verständnis eines komplexen Torfkörpers hinsichtlich seiner Form, inneren Strukturierung und Zusammensetzung. Diese GPR-Resultate liefern weiterhin strukturelle Vorinformationen, um weitere am Standort aufgezeichnete Datensätze (z. B. EMI) verlässlicher zu invertieren. Zukünftig sollen die somit gewonnen Erkenntnisse genutzt werden, um Mooregebiete auch hinsichtlich ihrer zeitlichen Variabilität zu charakterisieren.

Referenzen und weiterführende Literatur

- T. Klose, J. Guillemoteau, G. Vignoli, P. Koyan, J. Walter, A. Herrmann, J. Tronicke (2023): *Structurally-constrained FD-EMI data inversion with GPR reflection data using a Minimum Gradient Support regularizer*. DGG2023, Poster S1, EM-P.03.
C. Tegetmeyer, K.-D. Barthelmes, S. Busse, A. Barthelmes. (2020): *Aggregierte Karte der organischen Böden Deutschlands*. Greifswald Moor Centrum-Schriftenreihe 01/2020 (Selbstverlag).