

Abschlussbericht

Verbundvorhaben

SynCore – Ableitung virtueller geotechnischer Baugrunddaten aus Seismischer Inversion und Geostatistischer Datenintegration

Teilvorhaben

Seismische Attribute und Inversion

August 2024

Gefördert durch

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

Förderkennzeichen: 03EE3020A

Autoren:

Aisgo Werpup Oguro, Lennart Siemann, Jan Hebig
Fraunhofer IWES, Am Fallturm 5
28359 Bremen

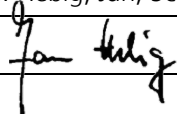
Projektzeitraum:

01.03.2020 - 01.03.2023 (verlängert bis 31.12.2023)

Vertraulichkeitsstatus

<input checked="" type="checkbox"/>	öffentlich
<input type="checkbox"/>	intern
<input type="checkbox"/>	vertraulich

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Autoren: Werpup Oguro, Aisgo; Siemann, Lennart; Hebig, Jan	Ort, Datum:
Unterschrift:	Bremen, Juni 2024
geprüft durch: Hebig, Jan; Schwarz, Benjamin	Ort, Datum:
Unterschrift: 	Bremen, Februar 2025

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Kurze Darstellung	3
1.1	Motivation	3
1.2	Ziele des Vorhabens	4
1.2.1	Gesamtziel	4
1.2.2	Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele	5
1.3	Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde	6
1.4	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
1.4.1	Zusammenarbeit im Verbund	6
1.4.2	Teilvorhaben Fraunhofer: Seismische Attribute und Inversion	8
2	Eingehende Darstellung	12
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	12
2.1.1	Theoretische/ Empirische Modelle	12
	Vorhandene Datenbasis.	12
2.1.2	AP 2: Seismisches Processing	13
2.1.3	AP 3 Geotechnische Interpretation und Integration von Ground-Truth-Daten	21
2.1.4	AP 4: Inversion	26
2.1.5	AP 5: Datenintegration	32
	AP 6: Lösungspaket	42
2.1.6	AP 7: Probabilistisches Design	42
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	43
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	43
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	44
2.5	Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	45
2.6	Geplante und erfolgte Veröffentlichungen der Projektergebnisse	46
2.7	Literatur	47

1 Kurze Darstellung

1.1 Motivation

Der Ausbau der Windenergie auf See steht nach wie vor im Fokus der Anstrengungen im Zuge der Energiewende. Der Druck, erneuerbare Energie zu marktfähigen, akzeptablen Preisen zu erzeugen und die Intensivierung des Wettbewerbs erfordern den Einsatz von immer größere Turbinen und neuen Technologien. Das hohe Innovationstempo erfordert u. A. eine kontinuierliche Anpassung und Optimierung der Planungs- und Entwicklungswerkzeugen für Offshore-Windparks. Die Forschungspartner tragen diesen Herausforderungen Rechnung durch eigene technische und methodische Weiterentwicklung zur Offshore-Standortcharakterisierung und Baugrundmodellierung.

Die Forschungsaktivitäten in diesem Projekt waren der Entwicklung und Anwendung von Verfahren seismischer Inversion in der Baugrundmodellierung von Offshore-Windparks gewidmet. Die frühzeitige und zuverlässige Ableitung geotechnischer Parameter trägt zur verbesserten Standortcharakterisierung in frühen Planungsphasen bei, und erschließt Anwendungen in der Bemessung von Gründungskonstruktionen für Offshore-Windenergie-Anlagen.

Die Anwendung geophysikalischer Methoden hat sich als zuverlässigster und kostenwirksamer Ansatz für die Baugrunduntersuchung erwiesen. Mehrkanalseismische Messungen haben sich in der Offshore-Erkundung zu einer innovativen Methodik entwickelt, die bei korrekter Integration mit geophysikalischen und geologischen Informationen zu einem leistungsfähigen Werkzeug für die Kostenoptimierung wird. Die Seismische Inversion nutzt ein breites Spektrum seismischer Charakteristika (Attribute) zur Quantifizierung des Untergrundes. Sie ist eine innovative und anspruchsvolle Methode aus der Öl-und-Gas-Exploration, die aber in Offshore-Wind bisher kaum zur Anwendung kam.

Die Forschungspartner stellen sich der Herausforderung, die quantitative Interpretation seismischer Attribute, die zur Ableitung mechanischer Baugrundparameter geeignet ist, für Offshore Wind Power nutzbar zu machen. Methoden der traditionellen seismische Inversion (Tomografische Methoden und Amplitude versus Offset-Ansätze) kamen hierzu ebenso zum Einsatz wie Methoden, die unter dem Begriff der Multi-Attribut-Analyse zusammengefasst werden. So konnte ein 3D-Bodenmodell entwickelt werden, welches auf seismischen Daten basiert und bereits mechanisch-elastische Parameter beinhaltet und folgende Vorteile bietet:

- Vollintegriertes 3D-Boden-Modell des Windparks mit elastischen Eigenschaften (im Bereich kleiner Dehnungen).
- Erzeugung von Bemessungsprofilen an jedem möglichen Standort.

Dadurch ergeben sich eine:

- Erhöhte Flexibilität für das Windpark-Design über den gesamten Planungszeitraum.
- Kostengünstige Standortbewertung als Ergebnis von weniger Untersuchungen und kürzeren Durchlaufzeiten.
- Verringerung von Risiken und Unsicherheiten, insbesondere in Arealen, in denen keine geotechnischen Studien durchgeführt wurden.

In dem dreijährigen Forschungsprojekt in kooperierten das Fraunhofer Institut für Windenergiesysteme (IWES) mit dem Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM), der

Universität in Bremen, sowie Innogy SE, einem führenden Unternehmen, was Offshore Wind betrifft. Darüber war mit dem Büro GEOTECHNIK UND DYNAMIK CONSULT GMBH (GuD) ein Partner beteiligt sein, der sowohl in der geotechnischen Erkundung von Offshore-Windparks in allen Erkundungsphasen als auch in der geotechnischen Auslegung von Gründungsstrukturen über langjährige Erfahrung verfügt.

1.2 Ziele des Vorhabens

1.2.1 Gesamtziel

Verfolgt wurde im Projekt das Gesamtziel die seismische Inversion und verwandte Methoden für die Baugrunderkundung in Offshore Wind nutzbar zu machen, um Kunden optimale Kenntnis der Offshore-Baugrundverhältnisse zur Verfügung zu stellen und eine maximale Flexibilität im Planungsprozess zu ermöglichen.

Nach momentaner Planungs- und Entwicklungspraxis wird nach geophysikalischen Erkundungsmethoden im gesamten Planungsgebiet (Offshore-Windpark) und geotechnischen Erkundungen an jedem OWEA-Standort unterschieden. Im Allgemeinen werden aus den Erkundungsergebnissen Baugrundmodelle erzeugt, die geophysikalische und geotechnische Ergebnisse integrieren. Benötigt für das technische Design der OWEA werden Bemessungsprofile an jedem OWEA-Standort, in die Daten aus Haupterkundung und Vorerkundung eingehen. Die Bemessungsprofile werden i.Allg. an Lokationen erzeugt, die geotechnisch erkundet wurden, oder im Ausnahmefall (ZiE), nach Änderungen im Park-Layout auf Grundlage besonderer geophysikalischer Nacherkundungen, die das Baugrundmodell verbessern und die Erzeugung synthetischer Bemessungsprofile erlauben.

Angestrebt (Projektziel) wird ein Baugrundmodell, in dem an jedem beliebigen „Point of Interest“ Bemessungsprofile für das technische Design erzeugt werden können. Hierfür ist eine mutuelle Überführung geophysikalischer Informationen in geotechnische Parameter und – in Äquivalenz – geotechnischer Aufschlussdaten in geophysikalische Parameter die ideale Voraussetzung: Aus Geotechnik-Daten (z.B. CPT-Profilen) können synthetische Seismogramme erzeugt werden oder – aus seismischen Daten Profile geotechnischer Parameter.

Das ist der Ansatz der Inversion im Projekt SYNCORE, die Erzeugung synthetischer Bohrkernprofile aus seismischen Datensätzen.

Die statistische Sicherheit der erzeugten Parameter ist an jedem Punkt der Modelle mit anzugeben.

Hierzu waren folgende Entwicklungsschritte nötig: Zusammen mit den Projektpartnern wurden folgende Ziele des Forschungsantrags formuliert:

- Weiterentwicklung und Erweiterung seismischer Akquisition- und Processing-Methoden mit Blick auf seismische Inversion.
- Integration und Kalibrierung geotechnischer Daten.
- Entwicklung eines integrierten, geostatistischen Gesamtmodells des Untergrundes im Offshore-Planungsgebiet, mit der Möglichkeit synthetische Bemessungsprofile zu erzeugen.
- Anwendung stochastischer Verfahren bei der Gründungsauslegung unter Berücksichtigung der Streueigenschaften, der aus dem räumlichen Untergrundmodell prognostizierten Bemessungsmodelle.

1.2.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

Ziel dieses Projektes war die Entwicklung einer grundlegend neuen Methodik zur seismischen Baugrunduntersuchung für Offshore-Windparks, die als Ergebnis ein umfassendes, dreidimensionales, quantitatives und statistisch abgesichertes Baugrundmodell hat, das zur Auslegung der Gründungen auf jedem Punkt der Windparkfläche geeignet ist. In Gegensatz zum bisherigem Stand der Technik, in dem sich die Baugrundcharakterisierung vor allem auf eine verbale Zusammenfassung im geologischen/geotechnischen Bericht und eine visuelle Interpretation der seismischen Daten beschränkte, wurden hier konsequent alle Randbedingungen numerisch erfasst und zusammen mit einer umfassenden Quantifizierung der seismischen Attribute in ein digitales, dreidimensionales, umfassendes, statistisch abgesichertes Baugrundmodell überführt.

Dazu mussten folgende Schritte vollzogen werden (technische Projektziele):

- Bewertung von Verfahren der seismischen Inversion aus der Öl- und Gas-Exploration und Anpassung an unkonsolidierte Baugrundverhältnisse.
- Optimierung der seismischen Datenakquisition mit Blick auf Signalcharakteristik und Messgeometrie (AP 2).
- Konditionierung der seismischen Daten, um die Voraussetzungen zur Anwendung von Inversionsverfahren zu erfüllen.
- Quantitative Aufbereitung von Bodenbefunden (Lithologie, Petrophysik, Drucksondierung, geologische Prozesse) für die Verwendung in Modellen, auch beschreibende Daten und Ergebnisse einer geologischen Prozessinterpretation (AP 3).
- Adaption geostatistischer Verfahren zur Kombination/Integration komplexer und diverser geologischer, geotechnischer und seismischer Datensätze (Selbstlern-Algorithmen; AP 5).
- Ableitung von Fehlergrößen der geometrischen und elastischen Eigenschaften zur direkten Verwendung bei Pfahldesign und Standortwahl (AP 7).

Die so gewonnenen Baugrundmodelle ermöglichen eine grundlegend neue Vorgehensweise bei der Planung von Offshore-Windparks:

- Die Wahl von Anlagen, Gründungen, Layout, etc. können jederzeit ohne neue kostenintensive und langwierige Erkundung optimiert werden, da die Eigenschaften eines jeden möglichen Pfahlstandorts mit hoher Qualität vorhergesagt werden können.
- Die Verringerung der Anzahl von Bohrungen, die nur noch zur optimalen Kalibrierung der Seismik nötig sind und entsprechend strategisch platziert werden können, führt zu einer Kostenreduktion bei der Baugrundcharakterisierung insgesamt.
- Die Risiken und Unsicherheiten werden durch die Verringerung der Vorhersagefehler an Standorten, an denen keine geotechnischen Daten vorliegen, reduziert.

1.3 Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde

Es handelt sich bei dem Projekt um ein Verbundforschungsvorhaben. Projektpartner der FRAUNHOFER IWES und ITWM sind die UNIVERSITÄT BREMEN Forschungszentrum, GUD GEOTECHNIK UND DYNAMIK CONSULT GMBH und die INNOGY SE.

INNOGY SE ist ein Errichter und Betreiber von Offshore-Windparks und stellte Datensätze aus dem Windpark Kaskasi zur Verfügung. Das Fachgebiet Meeresforschung am FB 5 der UNIVERSITÄT BREMEN (Prof. Spieß) ist ein universitäres Kompetenzzentrum mit Schwerpunkt marine Geophysik und Meeresgeologie. FRAUNHOFER IWES bündelt die Offshore-Windenergie-Forschungen der Fraunhofer-Gesellschaft. Das ITWM ist ein Innovations- und Kompetenzzentrum für Technomathematik, einschließlich der Verarbeitung von seismischen Daten. GuD ist ein deutscher Ingenieurdienstleister und in der Bemessung und dem technischen Design von Gründungskonstruktionen für Offshore-Windenergie-Anlagen tätig.

Innogy SE, ein führendes deutsches Energieunternehmen mit den drei Bereichen Erneuerbare Energien, Netz & Infrastruktur und Vertrieb, steht für umweltfreundliche, digitale und smarte Innovationen. Bereits heute ist INNOGY mit einer installierten Kapazität von derzeit 925 Megawatt einer der größten Betreiber von Offshore Windparks in Europa. Zu den Zielen von INNOGY gehört der zügige weitere Ausbau der erneuerbaren Energien weltweit, aus eigener Kraft und mit Partnern, um die Energiewende gemeinsam zu stemmen. durch die Teilhabe am Forschungsvorhaben.

INNOGY SE ist Bauherr mehrerer Windparks und Konsortialführer im VIBRO-PILE-Projekt, für die Pfahltests im Testfeld Altenwalde.

1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

1.4.1 Zusammenarbeit im Verbund

Die Arbeitspakete wurden von gemeinsam den Projektpartnern bearbeitet: IWES, ITWM, Uni-Bremen, Innogy SE und GuD. Die INNOGY SE stellte 3D-Seismikdaten und die erforderlichen Baugrunddaten bereit.

Die Universität übernahm die Verantwortung in AP 1 Theoretische/ Empirische Modelle.

Das FRAUNHOFER IWES war in Kooperation mit dem ITWM für das AP 2 Seismische Daten/ Attribute, AP 3 Geotechnische Interpretation und Integration von Ground-Truth-Daten, AP 4 Inversion, AP 5 Datenintegration und AP 6 Produkte verantwortlich.

GuD übernahm die Federführung in AP 7 zum probabilistischen Design.

Die **UNIVERSITÄT BREMEN (FACHGEBIET MEERESFORSCHUNG)** hat seit 1993 weltweit über 100 seismische Schiffsausfahrten durchgeführt und hat vor 15 Jahren die Mehrkanalseismik mit Einzelhydrophonstreamern im Flachwasser etabliert und technisch vorangetrieben. Die Arbeitsgruppe ist außerdem von Beginn an am BSH Standard der geophysikalischen Baugrunderkundung von Windparks beteiligt. Es wurden zahlreiche Projekte zur Quantifizierung der Bodeneigenschaften durchgeführt und mit Daten wissenschaftlicher Bohrungen verknüpft. Es bestehen umfangreiche Erfahrungen in der fortgeschrittenen Akquisition von 2D und 3D Seismikdaten, Entwicklung und Anpassung von Processingverfahren und in den letzten Jahren auch der quantitativen Interpretation durch Inversion, Nutzung seismischer Attribute und regionaler Interpretation von Baugrundeigenschaften.

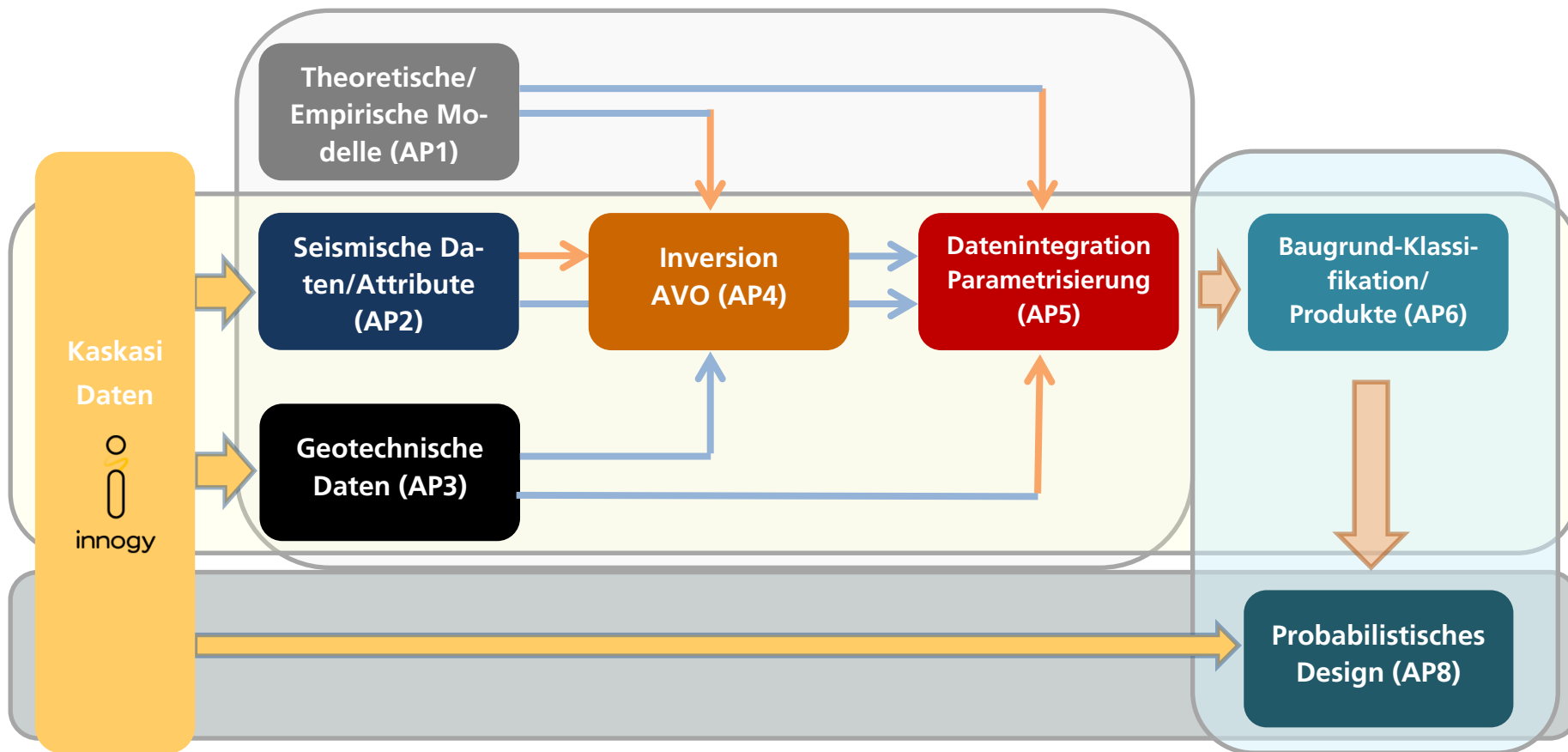


Abbildung 1: Workflow – Arbeitspakete im Projekt.

Der Arbeitsplan erforderte die gleichzeitige Bereitstellung verschiedener Datensätze, theoretischer Grundlagen und Algorithmen, die in verschiedenen Arbeitspaketen parallel erfolgen musste (AP 2, 3, 4). Diese wurden dann in den drei danach folgenden Arbeitsschritten zusammengeführt.

Das Ziel der F&E-Aktivitäten bestand in einer verbesserten Erfassung der Baugrundsituation (Schichtenstruktur) im Offshore-Baufeld und zielt auf eine Klassifikation sowohl der verschiedenen oberflächennahen Schichten und Einheiten ab, aber auch ihrer räumlichen Veränderung (AP 6: *Baugrund-Klassifikation*).

Die Voraussetzung dafür war die Integration aller verfügbaren Daten, wobei die *Inversion* (AP4) und die *Datenintegration* (AP 5) den Kern der Arbeiten darstellen. Eine entscheidende Voraussetzung war dabei die Konditionierung der verschiedenen Eingabedaten, die einerseits sorgfältig geprüft werden mussten, und andererseits in die für den Inversions- und Modellierungsschritt geeigneten Parameterraum übertragen wurden. Diese Arbeiten waren insbesondere für die Seismik so aufwendig, dass sie eigene Arbeitspakete darstellen. Geotechnische Daten wurden ebenso wie die seismischen Datensätze innerhalb des Projektes durch Partner bereitgestellt, deren Prüfung, Validierung und Konvertierung dann erfolgte.

GU D GEOTECHNIK UND DYNAMIK CONSULT

GMBH wurde im Jahre 1980 gegründet und bildet heute zusammen mit der GuD Consult GmbH den Kern des GuD-Firmenverbunds. Mit insgesamt 120 Mitarbeitern an Standorten in Berlin, Leipzig, Hamburg und Köln ist der GuD-Verbund eines der führenden Büros für Geotechnik in Deutschland. Das Leistungsangebot in den Aufgabenbereichen Geotechnik und Strukturmechanik für Gründungen von Offshore -Windenergieanlagen. Die GuD ist bzw. war an zahlreichen Forschungsprogrammen mit dem Schwerpunkt auf der Gründung von Offshore Windenergieanlagen beteiligt. In Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung BAM, der TU Hamburg-Harburg wurde im Auftrag des Projektträgers Jülich ein Forschungsvorhaben zur nachträglichen Tragfähigkeitserhöhung gerammter oder vibrierter Stahlrohrrammpfähle durchgeführt.

Weiterhin wurde im Rahmen von Industrieforschungsvorhaben der Einfluss unterschiedlicher Herstellungsverfahren auf das Lastabtragungsverhalten von Gründungsstrukturen untersucht.

1.4.2 Teilvorhaben Fraunhofer: Seismische Attribute und Inversion

IWES Plan

Insgesamt wurden fünf Arbeitspakete exklusive des Projektmanagements herausgearbeitet, die unter der Federführung des IWES durchgeführt werden.

Im AP2 „Seismisches Processing“

wurden zur Entwicklung eines Prozederes zum Prozessieren der seismischen Daten zur Vorbereitung der Inversion folgende Arbeitsschwerpunkte gesetzt:

- Integration der Quellsignatur in das Prozessieren.
- Entwicklung bzw. Anpassung der Algorithmen für Tomographie.
- Integration der Tomographie zur Verbesserung des Geschwindigkeitsmodells
- Analyse der Verbesserung des Geschwindigkeitsmodells durch die Tomographie.
- Entwicklung eines Prozederes zum Aufsetzen von initialen Modellen des Untergrunds.
- Entwicklung eines Prozederes, das beim Prozessieren die wahren Amplituden der Reflexionen erhält.
- Evaluierung der GRT-Migration als Vorbereitung der Inversion

Im AP3 „Geotechnische Interpretation und Integration von Ground-Truth-Daten“

wurden zur Interpretation geotechnischer Daten & ihrer Verknüpfung mit seismischen Attribute folgende Arbeitsschwerpunkte gesetzt

- Evaluierung und Analyse der geotechnischen Daten.
- Beschreibung der Geologie des Untergrunds und dessen physikalische Eigenschaften.
- Korrelation von geotechnischen Parametern und seismischen Attributen.
- Untersuchung von theoretischen Zusammenhängen gefundenen Korrelationen

Im AP4 „Inversion“

wurden zum Entwickeln eines Arbeitsablaufs zur Inversion von seismischen Daten im Flachwasser, Vergleich verschiedener Inversionsmethode und zur Evaluierung ihrer Anwendbarkeit und Aussagekraft folgende Arbeitsschwerpunkte gesetzt

- Anpassung von Inversionstechniken für Flachwasserdaten.
- Entwickeln eines Arbeitsablaufes zur Inversion.
- Vergleich verschiedener Methoden.
- Evaluierung der Anwendbarkeit und Aussagekraft

Im AP5: Datenintegration

Wurden zur Entwicklung und Anwendung geostatistischer Methoden zur Integration von seismischen und geotechnischen Datensätze folgende Arbeitsschwerpunkte gesetzt

- Datenintegrationsstrategie z.B. über neuronale Netze.
- Flächendeckende Vorhersage geotechnischer Parameter abgeleitet aus seismischen Attributen.

Im AP6: Produkte

Wurden zur Entwicklung von Datenprodukten, die auf die Bedürfnisse der Industrie zugeschnitten sind folgende Arbeitsschwerpunkte gesetzt

- Entwicklung einer Methodik zur integrierten quantitativen Bodenklassifizierung, insbesondere die Erzeugung von Kennwerten
- Bewertung der wirtschaftlichen Aspekte: Kosten und Nutzen.
- Einbezug von Industrieanforderungen des technischen Designs

Am **FRAUNHOFER ITWM** befasst sich die Abteilung HPC (High Performance Computing) auch mit der Entwicklung von Algorithmen und Anwendungssoftware für die seismische Datenverarbeitung und hat dabei verschiedene Pakete bis zur Marktreife, inklusive Kommerzialisierung getrieben. Dazu gehört das Produkt Pre-Stack Pro, das ein Komplettpaket für die Bearbeitung, Visualisierung, Interpretation und Inversion seismischer Daten nach erfolgter seismischer Migration darstellt, und die Winkelbereichsmigration GRT, die gemessene seismische Daten beliebiger flächiger Aufnahme-geometrie in strukturell und quantitativ interpretierbare Abbilder des Untergrundes überführt. Die Synergien dieser Partnerschaft sind für dieses Projekt erheblich, sowohl aufgrund der Möglichkeit, Software an Erfordernisse anzupassen, was bei kommerzieller Software in der Regel nicht möglich ist, als auch von der umfangreichen Expertise hinsichtlich der Anwendung dieser Verfahren unter anderem mit Großkunden aus der Öl- und Gas- Industrie

Die Rolle des ITWM im Projekt (AP2) soll hier noch einmal herausgestellt werden, da die Bedeutung kaum überschätzt werden kann: es waren beträchtliche theoretische Arbeiten nötig, um eine Inversion seismischer Daten zu ermöglichen:

Es war eine Prestack Tiefenmigration durchzuführen, die die gemessenen seismischen Daten in invertierbare Daten sortiert und ein räumlich korrektes strukturelles Abbild des Erduntergrundes erstellt, so dass berechnete Eigenschaften des Untergrundes im richtigen räumlichen Kontext interpretiert werden können. Voraussetzung für diese Tiefenmigration ist ein Tiefengeschwindigkeitsmodell, das für die GRT am besten durch Reflexionstomographie erhalten wird. Für die Anwendung im Projekt musste untersucht werden, wie die Tomographie räumlich zu diskretisieren und hinsichtlich der Berücksichtigung großer Reflektionswinkel, dem Vorliegen relativ geringer Geschwindigkeitsvariationen und unkonsolidierter Bodenverhältnisse zu konditionieren war. Diese Arbeiten wurden am ITWM für die seismischen Daten im Projekt durchgeführt.

Das **Fraunhofer**-Institut für Windenergiesysteme **IWES** umfasst befasst sich mit dem gesamten Spektrum der Windenergietechnik von der Windphysik bis zur Netzeinspeisung. Das Institut bietet Unternehmen, z. B. Windparkbetreibern und Energieversorgungsunternehmen, industrierelevante Forschungsdienstleistungen und eine zielführende Kooperation zu allen technischen Fragestellungen der Windenergienutzung. Das Verständnis von Windenergieanlagen und Windparks als Systeme mit dynamischen Wechselbeziehungen der einzelnen Komponenten und Umweltfaktoren schafft Grundlage und Synergien für komplexe Lösungsansätze.

Das FRAUNHOFER IWES und seine Partner haben seit über 10 Jahren in kommerziellen Aufträgen und BMWi Forschungsprojekten eine weitreichende Expertise auf dem Gebiet der Akquisition, Bearbeitung und Auswertung seismischer Daten erworben: IWES ist das Procedere zur Baugrunderkundung für Offshore Wind (BSH Standard (2), DNV und API-Regelwerke) vertraut. IWES ist Beisitzer in der Gruppe Baugrunderkundung des deutschen Normenausschuss NA 005-51-07 zur Entwicklung von DIN 18088 „Windenergieanlagen“. Die Arbeitsgruppe des IWES verfügt über ein mehrkanalseismisches Messsystem und bietet 2D- und 3D-seismische Ausfahrten mit anschließender Datenauswertung und -interpretation an. Laufende Forschungsprojekte wie Seismik Nordost (FKZ:0325810A) und Boulder Detektion (FKZ: 0324122A) zielen auf technische und methodische Entwicklungen und die Definition von Richtlinien und Standards zu Qualitätssicherung ab. Zur seismischer Inversion und vor allem elastischen Eigenschaften bei kleinen Dehnungen (small-strain-Parameter) liegt ebenfalls Expertise beim IWES (Restrike-XL, FKZ 0324231).

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die Zuwendung wurde zur Bearbeitung der im Arbeitsplan dargestellten Aufgaben verwendet, was zu Forschungsergebnissen und Ergebnissen führte, die im Zuge der Diskussion der Bearbeitung der Arbeitspakete und ihrer Inhalte vorgestellt werden:

2.1.1 Theoretische/ Empirische Modelle

2.1.1.1 *ÜBERBLICK*

Die Verantwortung für dieses Arbeitspaket lag bei der UNIVERSITÄT BREMEN. Von daher wird es hier nur übersichtlich behandelt:

Im AP wurden die Anforderungen an die seismische Datenakquise formuliert, wie sie sich aus den speziellen Bedingungen für seismische Inversion ergeben. Da Inversion eine anspruchsvolle Aufgabe ist, die große Anforderungen an die Datenqualität stellt, wurde im AP untersucht, wie die Vermessungsarbeiten und die Datenaufnahme offshore zu gestalten sind, um optimale Ergebnisse zu erhalten. Damit steht man am Beginn der Wertschöpfungs- und Bearbeitungskette.

Infolgedessen wurde im AP die seismische Datenerfassung modelliert, d.h. es wurde CAD-Modelle des Equipments, der Technologie der Datenerfassung und der zu erfassenden Geologie entwickelt und erstellt. Die Modellierung konnte dann eingesetzt werden, um verschiedenste Konfigurationen zu simulieren, durchzurechnen und um Optimierungsempfehlungen für seismische Datenerfassungen und die Validierung zu ermöglichen.

Nach zahlreichen Diskussionen und Treffen mit den Projektpartnern, um die Methoden und die erzielten Ergebnisse zu diskutieren, konnten die Ergebnisse in einer Veröffentlichung zusammengefasst werden, s. in Kap. 2.6.: „Römer-Stange, N., & Spieß, V. (2022). Requirements and Boundary Conditions for Near Surface Seismic Inversion. Presented at the Second EAGE Conference on Seismic Inversion.“

2.1.1.2 *AUSWIRKUNGEN IM PROJEKT*

Vorhandene Datenbasis.

Der 3D-Datensatz aus dem Kaskasi- Windparkgebiet, der von INNOGY SE dem Projekt zur Verfügung gestellt wurde, stellte die Ausgangsdatenlage im Projekt dar. Allerdings wiesen die 3D-Daten einige Probleme auf, die die Zuverlässigkeit in der Projektentwicklung beeinträchtigt hätten. Um die Probleme zu lösen, wurde im Februar 2021 von der UNIVERSITÄT BREMEN auf der Forschungsfahrt (He 569) ein neuer 2D-Datensatz aufgenommen, der das Arbeitsgebiet abdeckt. Erste Überlegungen und Zwischenergebnisse aus 2.1.1.1 wurden hier einbezogen, um die Datenaufnahme zu optimieren. Diese Datenaufnahme ermöglichte die Integration neuer, qualitativ hochwertiger seismischer Daten in das Projekt. Zusätzlich wurden von der INNOGY SE CPT-Informationen und Bohrkerndaten zur Integration und Korrelation mit den verfügbaren seismischen Daten bereitgestellt, Abbildung 2

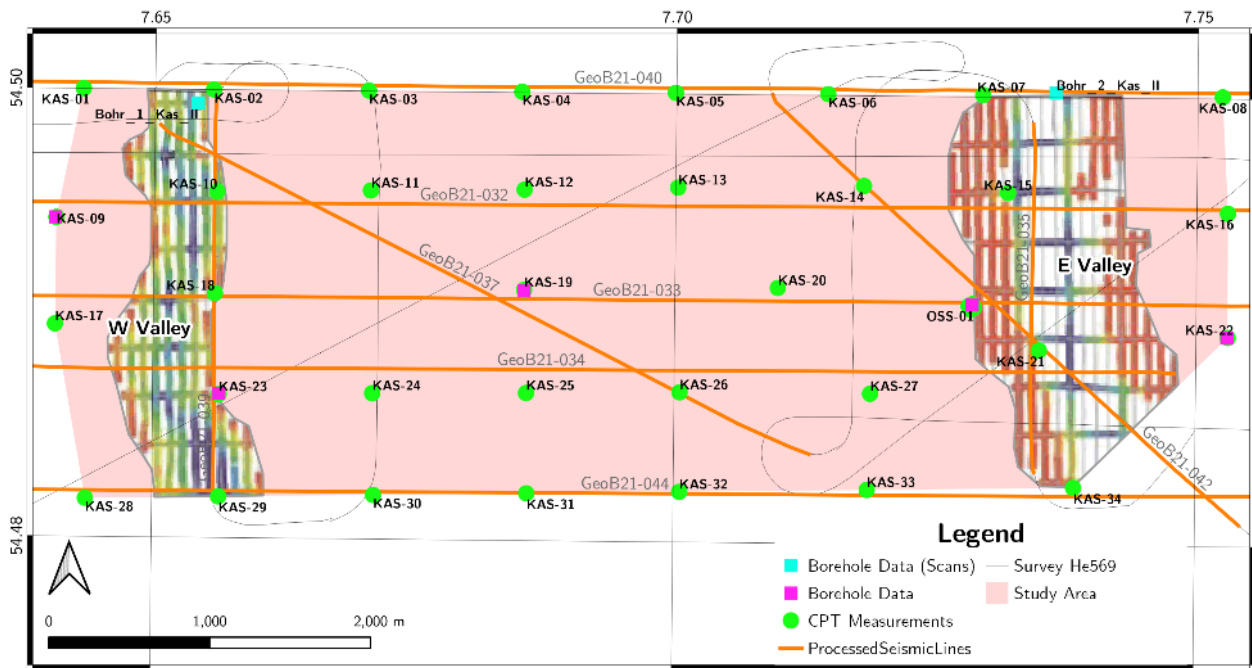


Abbildung 2: Verfügbare Daten zum Untersuchungsgebiet. In orange die 2D-Seismiklinien, die während der He 569-Erfassungskampagne erfasst wurden. Die grünen Punkte stellen verfügbare CPTs dar.

2.1.2 AP 2: Seismisches Prozessing

Der Hauptbestandteil von AP 2 war eine zielgerichtete Datenverarbeitung („Prozessing“) und die Interpretation von 2D- und 3D-Seismikdatensätzen, um sie für die nachfolgende Inversion bestmöglich aufzubereiten. Zu diesem Zweck wurde im AP folgende Ansätze und Lösungsmöglichkeiten untersucht:

1. Eine Vorgehensweise zur Integration der Quellsignatur in das Prozessing der seismischen Daten (Datenverarbeitung).
2. Amplitudengesteuertes Prozessing der seismischen Daten (s. Kap. 2.1.2.1.)
3. Angepasster Algorithmus für die 2D/3D GRT-Winkelmigration¹ (s. Kap. 2.1.2.2., [Seismische Prestack-Tiefenmigration GRT - Fraunhofer ITWM](#))
4. Angepasster Algorithmus für die Reflexionstomographie (s. Kap. 2.1.2.3.)

Um diese Vorgehensweise zu erklären ist es notwendig darauf zu verweisen, dass reflexionsseismische Pre-stack Daten aus inhomogenen viskoelastischen Medien durch Rauschen beeinträchtigt sind, welches Einfluss auf Amplitude und Phase haben kann, was die Daten generell beeinträchtigt, aber bei geplanter Inversion explizit zu minimieren ist. Die Daten werden dabei hauptsächlich durch vier Arten von Problemen beeinträchtigt:

- a) Wellenausbreitungseffekte wie sphärische Ausbreitung, Dämpfung, Krümmungseffekte und Anisotropie, s. Tabelle 1;
- b) Instrumentierungs- oder allg. Rauschen in den verschiedensten Frequenzbereichen;
- c) von der Quelle erzeugtes Rauschen, beispielsweise verursacht durch die Stärke der Quelle, die Richtwirkung der Empfänger-Anordnung oder die Offset²-Bandbreite;

¹ GRT ist eine Prestack-Depth-Migrationsmethode, die aus regulierten und nicht regulierten seismischen Dateneingaben Reflexionswinkel mit wahren Amplitudenwerten berechnet: [Seismische Prestack-Tiefenmigration GRT - Fraunhofer ITWM](#)

² In der Seismik ist der Offset die horizontale Entfernung zwischen dem Quellpunkt seismischer Wellen (Schusspunkt) und dem Empfänger.

- d) und/oder durch während der Verarbeitung verursachte Artefakte wie residuales „Normal Moveout“ (NMO³), Dekonvolution, Migration oder automatische Verstärkungsregelung (AGC⁴) (Dey Sarkar et al., 1986; Chopra und Marfurt, 2007, und Chopra und Castagna, 2014), Tabelle 1

Auf der anderen Seite ist notwendig, die Amplitudenwerte aus den seismischen Daten und ihren Informationsgehalt zu erhalten, um diese in der nachfolgenden Amplitudeninterpretation oder -inversion zu verwenden. Der Erhalt der Amplitudenwerte ist für die Prozessing-Schritte (Kap. 2.1.2.1) und die Arbeitsschritte in der Migration (Kap. 2.1.2.2) zu sichern. Die Entwicklung eines räumlich variierendes Q-Wert-Modell (Q-Tomographie in Kap. 2.1.2.3), das die Dämpfungseigenschaften des Untergrunds beschreibt, soll es hingegen ermöglichen, die Dämpfung der Amplituden aufgrund von Anelastizität und Mehrfachstreuung zu kompensieren, und die Migrationsergebnisse bei der nachfolgenden Amplitudeninterpretation oder -inversion verwenden.

Im Einzelnen heißt das: Die Ergebnis-Daten des Prozessings sollen die Reflektivität des Untergrunds bewahren (sog. amplitudengesteuerte Verarbeitung). Normalerweise wird dafür ein Standardverarbeitungspfad angewendet (Resnick 1993; Yilmaz 2001), einige Verfahren müssen jedoch angepasst werden, insbesondere wenn das Ziel, die zu untersuchenden Bereiche, in geringen Tiefen liegt (Steeple und Miller 1998; Cichostępski et al., 2019). Da seismische Baugrunderkundung für Offshore-Wind mit Flachwasserseismikdaten arbeitet, ist eine solche Anpassung nötig.

Wave propagation effects	Acquisition-related	Noise	Processing-induced artifacts
spherical spreading	Source strength	Coherent, ambient noise	residual NMO
Reflector curvature	Receiver coupling	unbalanced noise	Statics
Attenuation and dispersion	Receiver array (directivity)	High-frequency noise	Radon-transform
Multiples	Sampling (time and offset)	Low-frequency noise	<i>f-k</i> filtering
Anisotropy	Offset range		Noise reduction
			Migration
			Dekonvolution

Tabelle 1: Ausbreitungseffekte.

2.1.2.1 AMPLITUDENGESTEUERTES PROZESSING SEISMISCHER DATEN

Beim amplitudengesteuerten Prozessing (Datenverarbeitung) sind die einzigen Verfahren zur Wiederherstellung der wahren bzw. originalen Amplitudenwerte, die angewendet werden können, die oberflächenkonsistente Skalierung und die sog. sphärische Divergenzkorrektur. Die „automatische

³ In der Reflexionsseismologie beschreibt (NMO) den Effekt, den der Offset (Entfernung zwischen seismischer Quelle und Empfänger) auf die Ankunftszeit einer Reflexion in Form einer Laufzeitverlängerung hat. Die Beziehung zwischen Ankunftszeit und Offset ist hyperbolisch und das Hauptkriterium, anhand dessen entschieden werden kann, ob es sich bei einem Ereignis um eine Reflexion handelt oder nicht.

⁴ Abkürzung für „Automatic Gain Control“. Ein System zur automatischen Steuerung der Verstärkung oder der Amplitudenerhöhung eines-Signals vom ursprünglichen Eingang zum verstärkten Ausgang. AGC wird bei der seismischen Verarbeitung verwendet, um die Sichtbarkeit spät eintretender Ereignisse zu verbessern, bei denen Dämpfung oder Wellenfrontdivergenz einen Amplitudenabfall verursacht haben.

Verstärkungsregelung“ (AGC), eine zeitvariante Skalierung usw. sind bei der RAP⁵-Verarbeitung nicht anwendbar; außerdem sollten 2D-Filter, z.B. Median-f-k⁶, nicht angewendet werden, da sie die relativen Amplitudenwerte stören & beeinträchtigen können.

Daher wurde nach mehreren Besprechungen mit den Projektpartnern FRAUNHOFER ITWM und der UNIVERSITÄT BREMEN ein Processing-Ablauf nach Abbildung 3 Abbildung 2 entworfen und auf die neu erfassten 2D-Daten angewendet, wodurch eine amplitudengesteuerte Datenverarbeitung erzielt werden konnte.

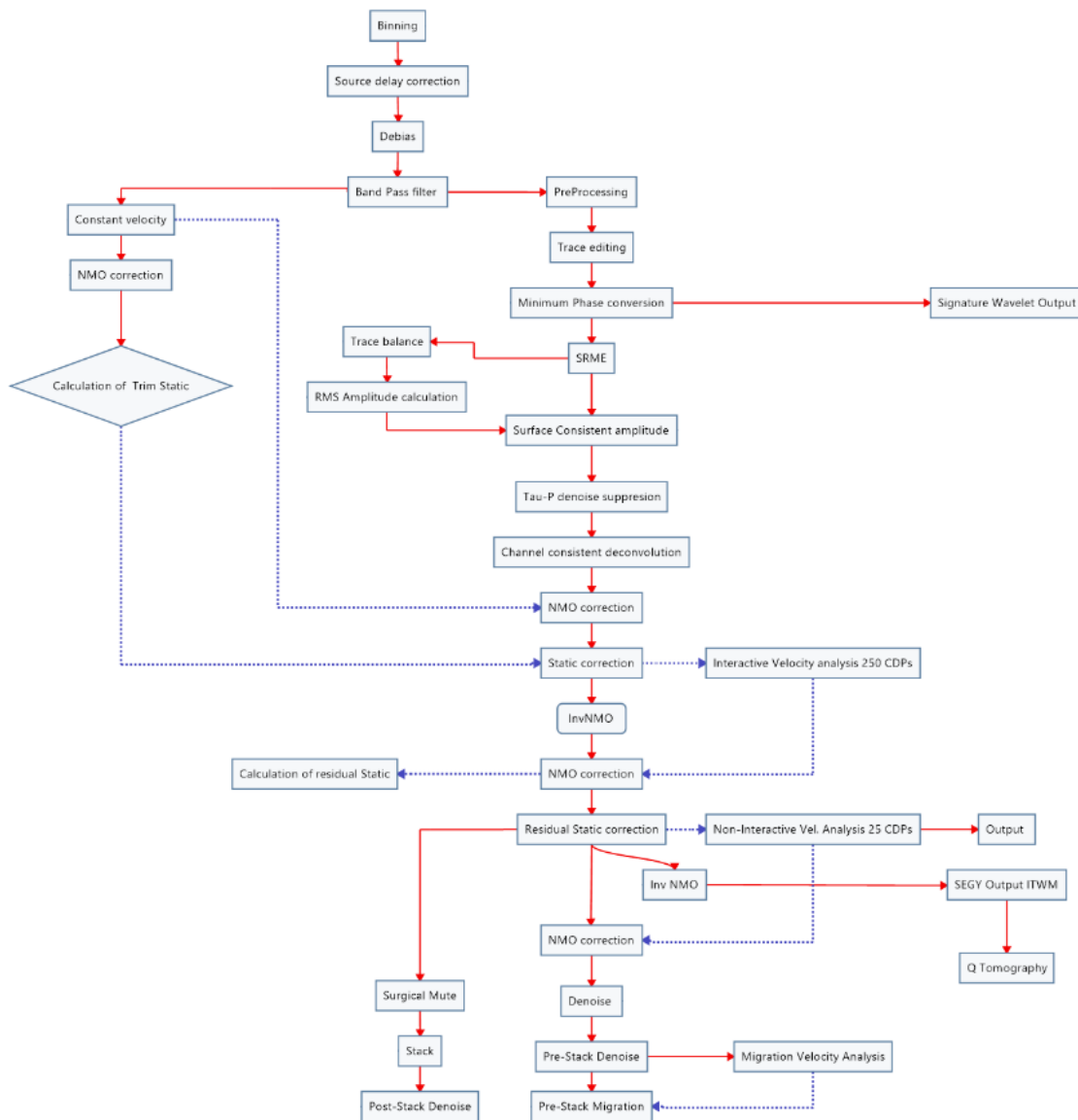


Abbildung 3: Arbeitsablauf für die amplitudengesteuerte Verarbeitung/ Processing.

5 RAP wurde ursprünglich als „Reflection Amplitude Preservation“ (Erhaltung der Reflexionsamplitude) definiert, und bezeichnet Verarbeitungs- und Anzeigemethoden, die dazu dienen, die relativen Amplituden seismischer Reflexionen zu bewahren.

6 Sog. Median-f-k-Filter werde verwendet, um zwischen Ereignissen auf der Grundlage der scheinbaren Geschwindigkeit v_a zu unterscheiden.

Die folgenden Abbildungen 4 und Abbildung 5 stellen die erfassten Rohdaten vor und nach dem Stapeln (pre-stack und post-stack) dar. Nach Anwendung des entworfenen Workflows nach Abbildung 3 wurden amplitudengesteuerte Daten vor (Abbildung 6) und nach dem Stapeln (Abbildung 7) generiert.

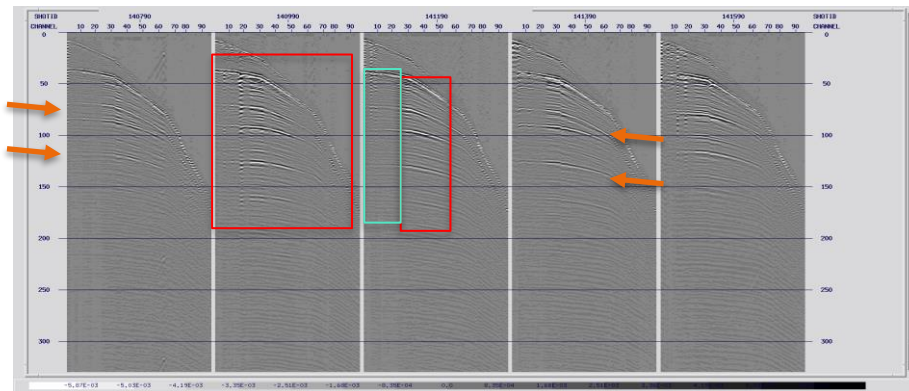


Abbildung 4: Pre-Stack Rohdaten

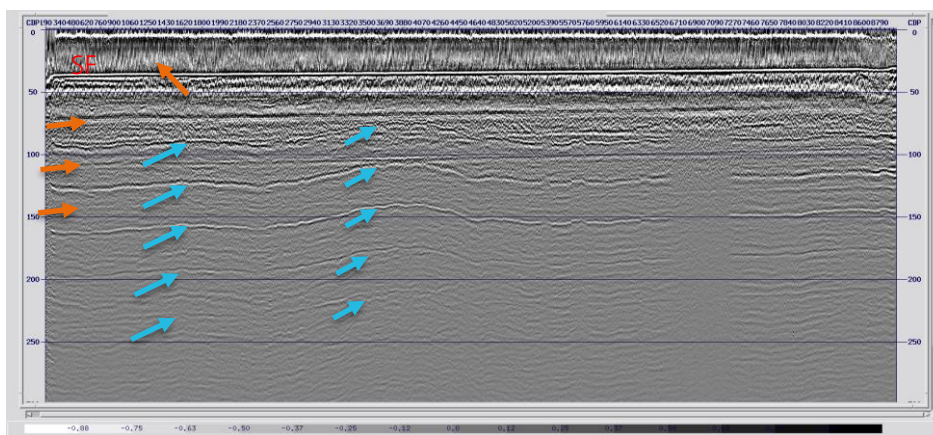


Abbildung 5: Post-Stack Rohdaten –

Die orangen Pfeile zeigen SF-Multiplen und die blauen Pfeile Peg-Lag-Multiplen aus der Tonschicht an.

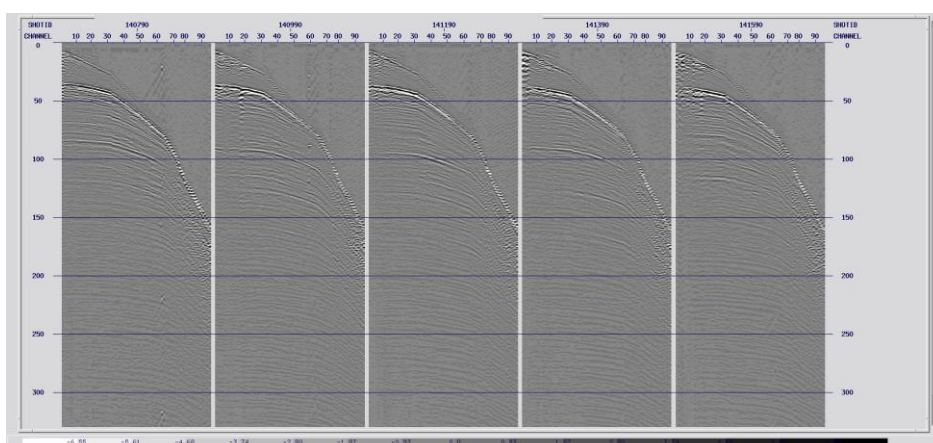


Abbildung 6: Pre-Stack-Daten nach Anwendung des entworfenen Verarbeitungsflusses.

Die daraus resultierenden Pre-Stack-Daten (Abb. 6) wurden in der Folge als Input für die 2D-GRT-Tiefenmigration verwendet und später zum Testen der Q-Tomographie eingesetzt. Beides wurden vom

FRAUNHOFER ITWM entwickelt. Damit war die letzte Phase der amplitudengesteuerten Pre-Stack-Prozessverarbeitung abgeschlossen.

Die Ergebnis-Post-Stack-Daten (Abbildung 7) lieferten wichtige Informationen für die Fortsetzung des Projekts.

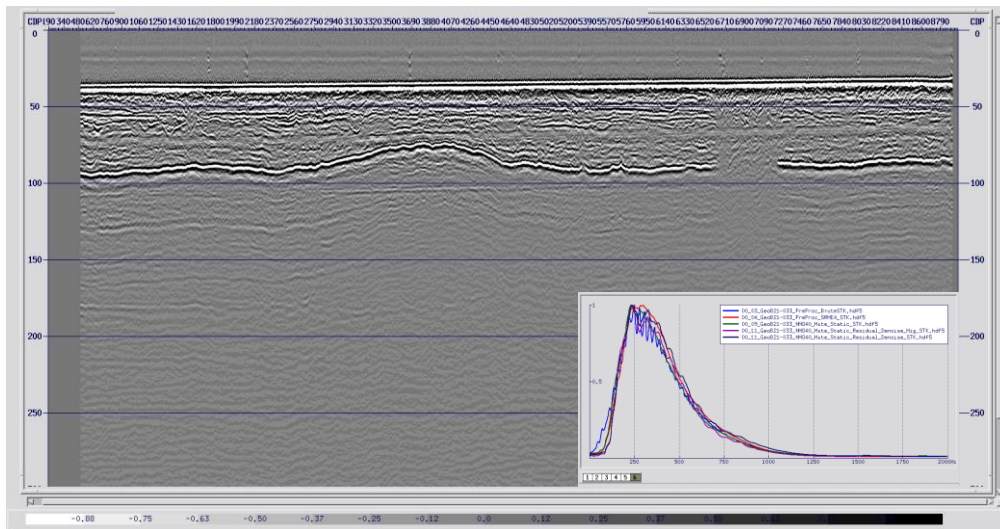


Abbildung 7: Post-Stack-Daten nach Anwendung des entworfenen Verarbeitungsfusses. Zusätzlich der Vergleich des in verschiedenen Phasen des Verarbeitungsfusses berechneten Frequenzspektrums.

Die Arbeiten umfassten eine Adaption von Processing-Schritten (Kap. 2.1.2), um die wahren Amplitudenwerte aus den seismischen Daten und ihren Informationsgehalt zu erhalten bzw. wiederherzustellen, damit diese in der nachfolgenden Amplitudeninterpretation oder v.a. -inversion verwandt werden können. Diese Daten enthalten quantitative Amplitudeninformationen, die für die folgenden Arbeitsschritte in AP 2 benötigt wurden, und in AP 4 verwendet werden konnten. Außerdem wurden sie für die qualitative Interpretation mit stratigraphischen & strukturellen Informationen in AP 5 verwandt.

2.1.2.2 SEISMISCHE PRESTACK-MIGRATION (GRT)

Für das weitere Datenprocessing und -verarbeitung war die bereits erwähnte Erhaltung von realen, ungestörten Amplitudenwerten wichtig. GRT-Migration weist unter den zahlreichen existierenden Migrationsverfahren das Alleinstellungsmerkmal auf, dass es als eine *amplitudenbewahrende Migration* in der Lage ist, Ergebnisse zu produzieren, aus denen die Reflexionskoeffizienten entlang von Schichtkontrasten des Untergrundes direkt ablesbar sind. GRT ist eine Prestack-Depth-Migrationsmethode, die aus regulierten und nicht regulierten seismischen Dateneingaben Reflexionswinkel mit wahren Amplitudenwerten berechnet. Die Ausgabe der Methode kann nach leichter Nachbearbeitung durch Eliminierung von Residualmultiplikatoren und Ereignisausrichtung als Eingabe für die Prestack- (und Poststack) Inversion verwendet werden. Im Rahmen des Projekts wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Eine bereits vorhandene 2D-Version von GRT wurde an die Eingabedefinition für Geometriedaten in x/y angepasst, indem die Spuren (Linien), die durch die Koordinaten von Quelle und Empfänger als definierende Endkoordinaten der Linie lokalisiert sind, auf eine „Common-Depth-Point“ (CDP)- Linie abgebildet wurden, z.T. kombiniert und gefolgt von einer „Normal Moveout“ (NMO)-Korrektur der Laufzeiten.
- Die angepasste Software wurde dann den Projektpartnern zusammen mit einer Anleitung zur Nutzung des Softwarepakets sowie zur Interpretation und weiteren Verwendung der Ergebnisse zur Verfügung gestellt.
- In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern konnte ein Schema für eine Multiple Migration in Geschwindigkeitsmodelle mit prozentualer Störung entwickelt und für ein Parallel-Processing (sog. Multithread-

Ausführung) implementiert werden. Abbildung 8 zeigt migrierte Stapel (obere Reihe) mit verschiedenen Geschwindigkeitsstörungsvarianten des Stapelgeschwindigkeitsanalysemodells und (untere Reihe) migrierte Cluster/ Ansammlungen an sechs CDP-Standorten in Abhängigkeit von den fünf Geschwindigkeitsstörungen. Eine Geschwindigkeitsaktualisierung durch räumliches und vertikales Auswählen der Geschwindigkeit, die die Ereignisse am besten abflacht, konnte ermöglicht werden. Die Änderung der vertikalen Reflektorposition kann zusätzlich als Unsicherheitskriterium genutzt werden. Das Verfahren, welches unter der Multi-Velocity-GRT bekannt ist, ist hocheffizient, und einsetzbar für die Verwendung zur Tiefenbildgebung von sehr hochaufgelösten (UHR⁷-) Daten.

- Der GRT-Raytracer (ein feature zur Darstellung von Strahlenausbreitung bzw. -verfolgung) wurde extrahiert und an die Aufgabe der Q-Tomographie (s. Kap. 2.1.2.4) angepasst, in dem die Strahlen zwischen Gitterpunkten unter der Oberfläche und auf der Oberfläche verfolgt werden, und die partielle Laufzeit jedes Strahls in jeder Zelle des gerasterten Untergrunds berechnet wird.

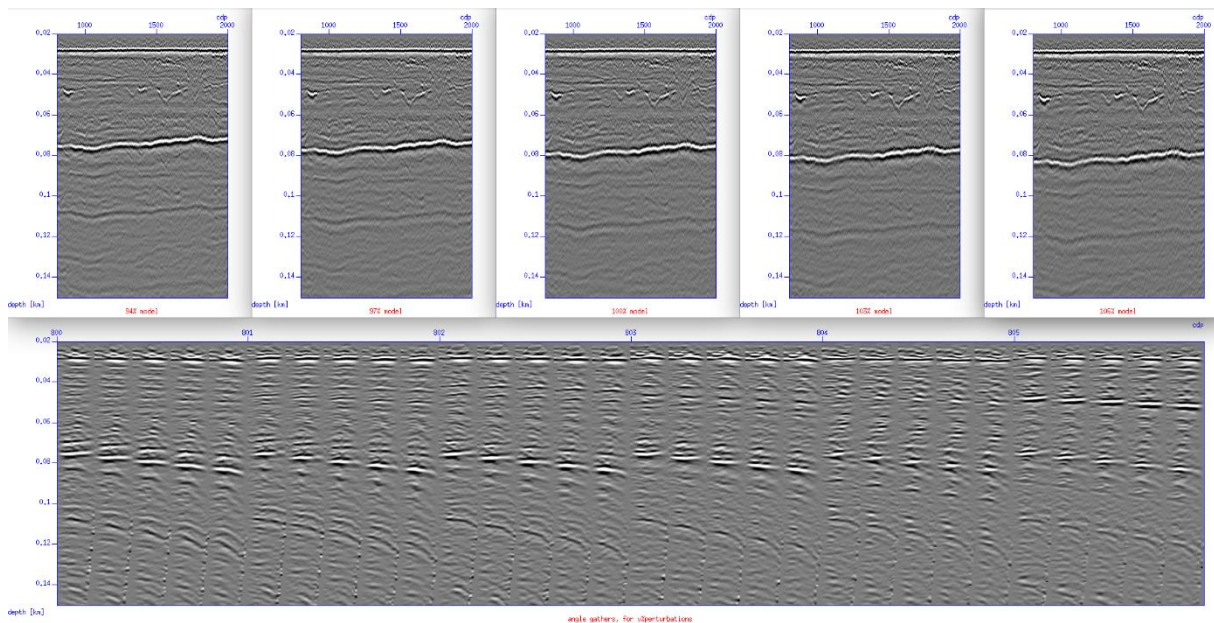


Abbildung 8: Migrierte Stapel (obere Reihe), migrierte Winkelsammlungen (untere Reihe) für einen Satz von fünf Geschwindigkeitsmodellen.

2.1.2.3 ANGEPASSTER ALGORITHMUS FÜR DIE REFLEXIONSTOMOGRAPHIE/ Q-TOMOGRAPHIE

In der Reflexionsseismologie quantifiziert der anelastische Dämpfungsfaktor, ausgedrückt als seismischer Qualitätsfaktor oder Q (der umgekehrt proportional zum Dämpfungsfaktor ist), die Auswirkungen der anelastischen Dämpfung auf eine seismische Welle, die durch Flüssigkeitsbewegung und Kornreibung verursacht wird: Während sich eine seismische Welle durch ein Medium ausbreitet, wird die mit der Welle verbundene elastische Energie allmählich vom Medium absorbiert. Dies wird als Absorption (oder anelastische Dämpfung) bezeichnet und führt schließlich zum vollständigen Verschwinden der seismischen Welle.

Der Zweck der Q-Tomographie besteht darin, ein räumlich variierendes Q -Wert-Modell zu erstellen, das die Dämpfungseigenschaften des Untergrunds beschreibt. Ein solches Modell kann bei der Tiefenmigration mit wahrer Amplitude pre-stack oder alternativ nach der Konvertierung in Zeitbereichs-Post-

⁷ UHR: Ultra High Resolution Data – (Extrem) hochaufgelöste Daten

migrations-Workflows verwendet werden, um die Dämpfung der Amplituden aufgrund von Anelastizität und Mehrfachstreuung zu kompensieren und die Migrationsergebnisse bei der nachfolgenden Amplitudeninterpretation oder -inversion zu verwenden.

Die hier im Projekt entwickelte Implementierung nutzt den Vorteil des Winkelbereichs der zugehörigen GRT-Migration, um die Zuordnung zwischen Untergrundpositionen und der Erfassungsoberfläche effizient durchzuführen und so das tomographische System zu generieren.

Die Q-Tomographie besteht aus einer großen Anzahl einzelner Funktionalitäten, die durch den Austausch von Steuerparametern und Koordinaten, die die Lokalisierung von Objekten beschreiben, wie Horizontauswahlen, zeitliche oder Tiefen-Erfassungen, Geschwindigkeitsmodelle, Migrationsergebnisse, Q-Wert-Eingabemodelle, aktualisierte Q-Ausgabemodelle, Raytrace-Modelle und Untergrundtomographiegitter, die miteinander interagieren. Die folgende Skizze (siehe Abbildung 9) symbolisiert diese Komplexität und bietet einen detaillierten Überblick über die Komponenten, die alle im Rahmen des Projekts entwickelt und implementiert wurden.

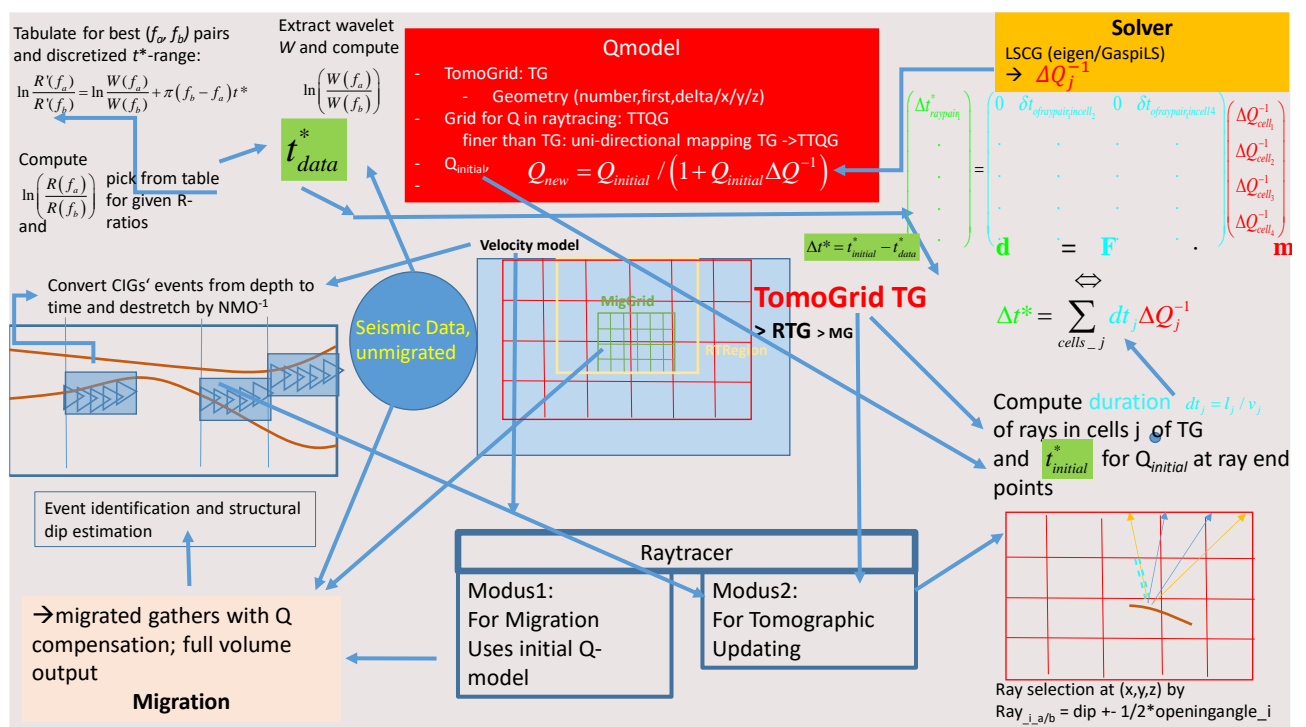


Abbildung 9: Komponenten des Q-Tomographie-Workflows und ihre Interaktionen.

Das Auftreten von anelastischer Dämpfung führt zu einer Frequenzabhängigkeit der seismischen Amplituden, so dass die Amplituden $R(f)$ an den Empfangsorten mit den Amplituden $S(f)$ an Quellen- oder Referenzorten wie in Gleichung (1.1) in Beziehung stehen. G ist ein frequenzunabhängiger Skalierungsfaktor und berücksichtigt hauptsächlich den geometrischen Ausbreitungsverlust (attenuation), während der Filter H einen exponentiellen Verlust (Gleichung (1.2)) beschreibt, der von der Größe t^* geleitet wird. t^* kann durch Integration des Kehrwerts des charakteristischen Material- oder Formationsparameters Q entlang von Strahlenpfaden berechnet werden, parametrisiert durch die Laufzeit t (Gleichung (1.3)).

$$R(f) = GH(f)S(f) \quad (1.1)$$

$$H(f) = \exp(-\pi ft^*) \quad (1.2)$$

$$t^* = \int_{\text{ray}} \frac{1}{c_0 Q} dl = \int_{\text{ray}} \frac{1}{Q} d\tau \quad (1.3)$$

Das Einfügen von Gleichung (1.2) in Gleichung (1.1) ergibt

$$\ln\left(\frac{R(f_a)}{R(f_b)}\right) = \ln\left(\frac{S(f_a)}{S(f_b)}\right) + \pi(f_a - f_b)t^* = a + bt^* \quad (1.4)$$

welche die messbaren seismischen Amplitudengrößen mit t^* *verknüpft*, also über Gleichung (1.3) mit den Q -Werten im Untergrund. Im Kontext des tomographischen Systems

$$\mathbf{a}' = \mathbf{G}\mathbf{q}' \quad (1.5)$$

der seismische Datenvektor \mathbf{a}' besteht aus t^* -Werten, die aus Gleichung 1.4 aus seismischen Amplituden abgeleitet wurden. Der Modellvektor \mathbf{q}' besteht aus dem unbekanntem Q -Wert der Zellen des gerasterten Untergrunds. Die Systemmatrix \mathbf{G} besteht somit in jedem ihrer Elemente (Spalte i , Zeile j) aus dem Beitrag von q'_i zum gemessenen/berechneten t^* für Experiment j . Index j stellt das Migrationsergebnis an einem Horizont, in einem CDP⁸, für einen Reflexionswinkel dar. Die Matrix \mathbf{G} ist groß, da sie so viele Spalten wie Zellen des gerasterten Untergrunds gemäß der ausgewählten räumlichen Auflösung des Untergrund- Q -Modells hat, und ihre Zeilenanzahl entspricht dem Produkt der ausgewählten migrierten Reflektorelemente, der Anzahl der CDP-Standorte und der Anzahl der migrierten (nachgewählten) Reflexionswinkel. \mathbf{G} ist aber nur spärlich besetzt; das System wurde mit einem Gradientenlöser des linearen Lösungspakets Eigen gelöst. Alternative Löser wurden ebenfalls getestet.

Abbildung 10: Abbildung 9 unten demonstriert die Funktionalität aller Komponenten des Arbeitsablaufs und deren Interaktion. Der wichtigste Teil ist die Berechnung der t^* -Werte mit Gleichung 1.4. Es wurde versucht, die Methode zu stabilisieren, indem

- die nutzbare Bandbreite abgeschätzt wurde,
- t^* für eine große Menge von Frequenzkombinationen f_a-f_b (innerhalb des geschätzten Frequenzbands) berechnet wurde, gefolgt von Mittelwertbildung oder Medianauswahl,
- das Extraktionsfenster optimiert wurde, um das Eindringen des Reflektivitätsspektrums in das Wavelet-Spektrum zu verringern,
- und partielle Winkelstapel um den Analysewinkel erstellt wurden.

Darüber hinaus wurden auch alternative Methoden zur Schätzung von t^* basierend auf der Verschiebung des Frequenzpeaks einer geglätteten Version des Amplitudenspektrums getestet. Trotz alledem führten idealisierte Bedingungen mit sauberen synthetischen Testdaten zwar immer zu perfekten Antworten des berechneten Q -Modells, die Anwendung auf reale Daten, wie sie für das Projekt ausgewählt wurden, zeigte jedoch eine enorme Instabilität. Die Aufgabe, eine stabile t^* -Extraktion aus realen Daten zu entwickeln, bleibt der letzte offene Punkt des in allen anderen Komponenten vollständig entwickelten und gründlich getesteten Q -Tomographie-Workflows und kann Gegenstand zukünftiger Arbeiten sein..

⁸ „Common Depth Point“ Eine Reihe von Pfaden von verschiedenen Quell-Empfänger-Paaren, die alle von einem gemeinsamen Ort im Untergrund reflektiert werden.

Q-tomography (screenshots from workflow with Kaskasi data, profile036)

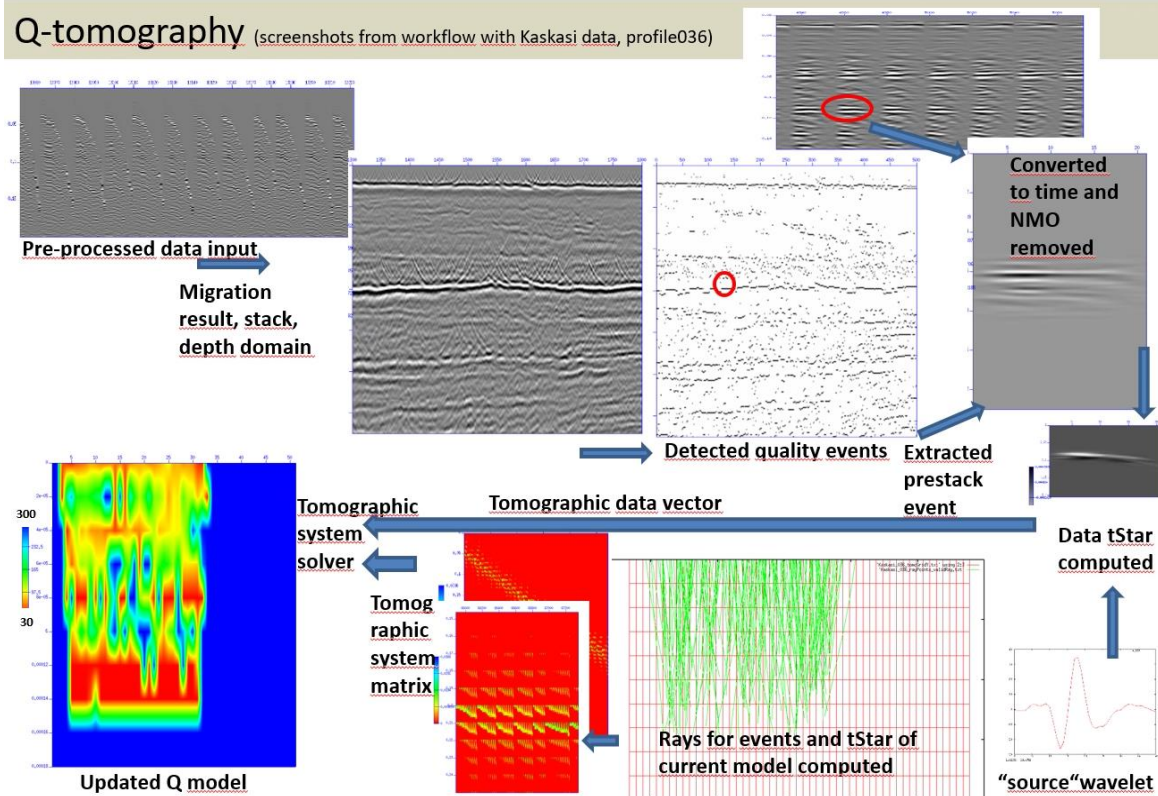


Abbildung 10: Screenshots aus dem auf Kaskasi-Daten angewendeten Q-Tomographie-Workflow.

Ein solches Modell kann bei der Tiefenmigration mit wahrer Amplitude pre-stack oder alternativ nach der Konvertierung in Zeitbereichs-Postmigrations-Workflows verwendet werden, um die Dämpfung der Amplituden aufgrund von Anelastizität und Mehrfachstreuung zu kompensieren und die Migrationsergebnisse bei der nachfolgenden Amplitudeninterpretation oder -inversion zu verwenden.

Zusammenfassung der im AP 2 entwickelten Methoden:

1. Eine mehrkanal-seismischer amplitudengesteuerte Prozessing-Routine (Verarbeitungsablauf) für die Flachwasserseismik-Daten.
2. Eine Pre-Stack-„Konditionierung“ (Umformung und Aufbereitung) für seismische Pre-Stack- und Post-Stack- Daten.
3. Eine Anpassung und Weiterentwicklung der mit dem ITWM entwickelten GRT-Migration für 2D-Fälle und Fälle der Tiefenkonversion.
4. Eine Einschätzung der sog. Pre-Stack-Dämpfung (Attenuation) mit Hilfe von Q-Tomographie

2.1.3 AP 3 Geotechnische Interpretation und Integration von Ground-Truth-Daten

Die Zielparameter für die Inversionsanwendungen, die im Projekt entwickelt wurden, stellen geotechnische Parameter dar. Im Operationsgebiet waren sämtliche verfügbare geotechnische Daten zusammenzuführen und auszuwerten, um die geotechnischen Bedingungen im Gebiet einschätzen zu können und zu quantifizieren.

Zu den Ground-Truth Daten (Daten mit Informationsgehalt über die „realen“ Bedingungen in der Formation) werden im Unterschied zu Daten aus der Reflexionsseismik im Allg. und insbesondere im Folgenden bezeichnet:

- Geophysikalische Bohrlochdaten
- Geotechnische CPT- Profile (Drucksondierungs-Profile)
- Geotechnische Bohrkerndaten

Das Ziel des Arbeitspakets war die Auswertung aller in-situ Messungen, d.h. einschließlich aller geophysikalischer und geotechnischer Messdaten. Ein weiteres zentrales Ziel war die Korrelation zwischen Geophysik und Geotechnik sowie der interpretierten Informationen und deren abschließende Organisation in einer Datenbank.

Das umfasste folgende Arbeitsschritte

1. Auswertung und Interpretation sämtlicher geotechnischer und geophysikalischer Daten.
2. Beschreibung der Geologie des Untergrunds und seiner physikalischen Eigenschaften.
3. Integration aller verfügbaren Ground-Truth-Daten.
4. Organisieren Sie eine Datenbank aus den integrierten Daten.

Abbildung 11 und Abbildung 12 beschreiben den detaillierten Arbeitsablauf zur Durchführung der Aufgabe.

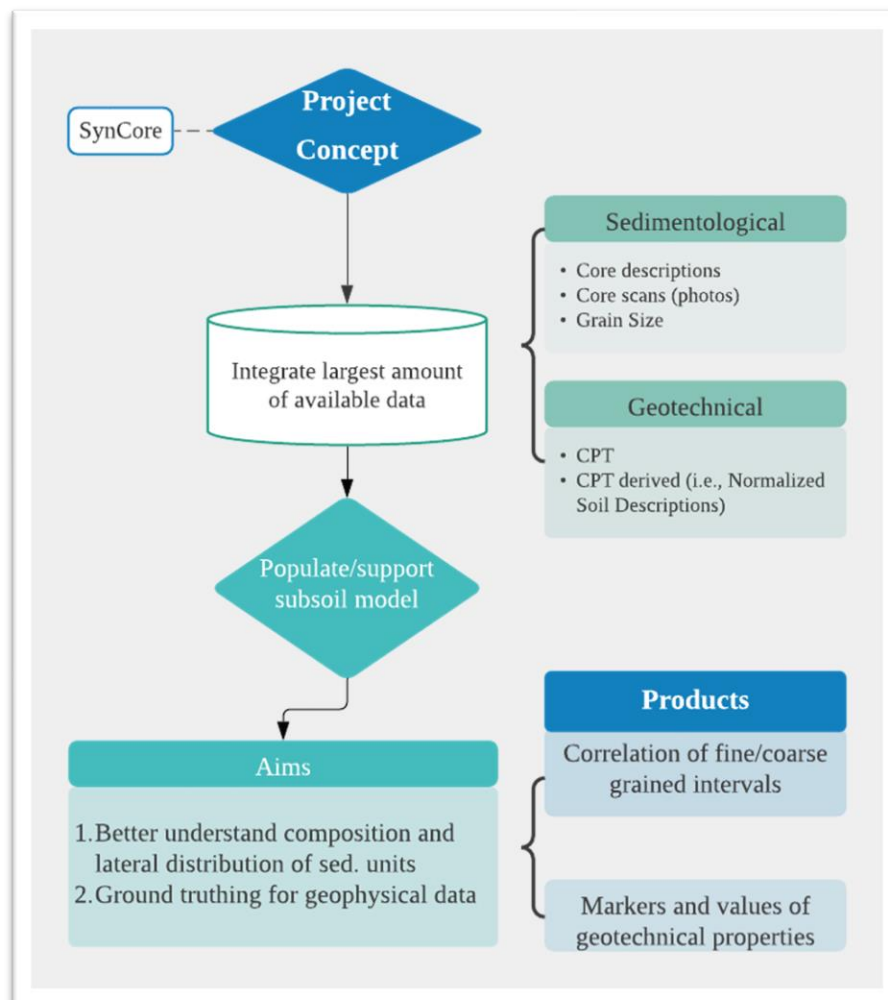


Abbildung 11: Allgemeine Ziele

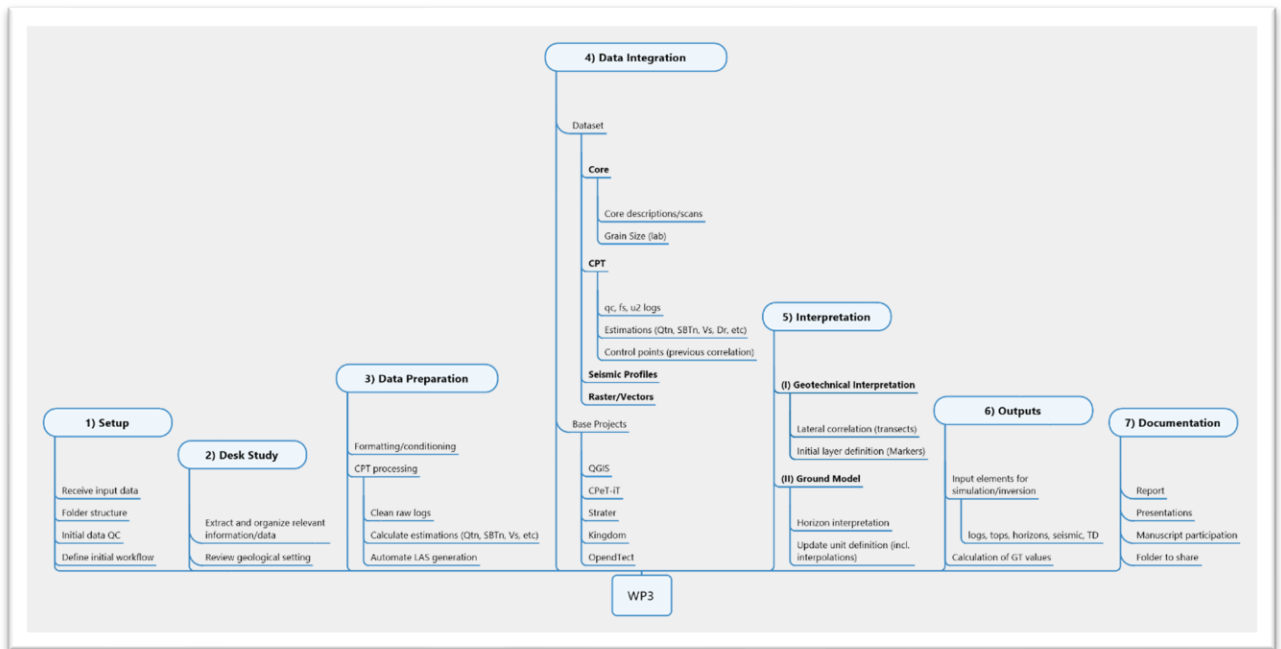


Abbildung 12: Detaillierter Arbeitsablauf für die Ground-Truth-Datenintegration.

Abbildung 13 zeigt ein Beispiel für die Integration der geotechnischen Daten, insbesondere der CPT- (Drucksondierungs-) Daten und Bohrkerndaten, für einen Standort. Nach der standortspezifischen Korrelation konnten bestimmte Informationen/ Parameter in seitlicher (lateraler) Richtung in das Gebiet korreliert werden, wie in Abbildung 14: Abbildung 13 gezeigt. Schließlich wurde die Datenbank, Tabelle 2, erstellt, die die wichtigsten Informationen für jede interpretierte Fläche zusammenfasst.

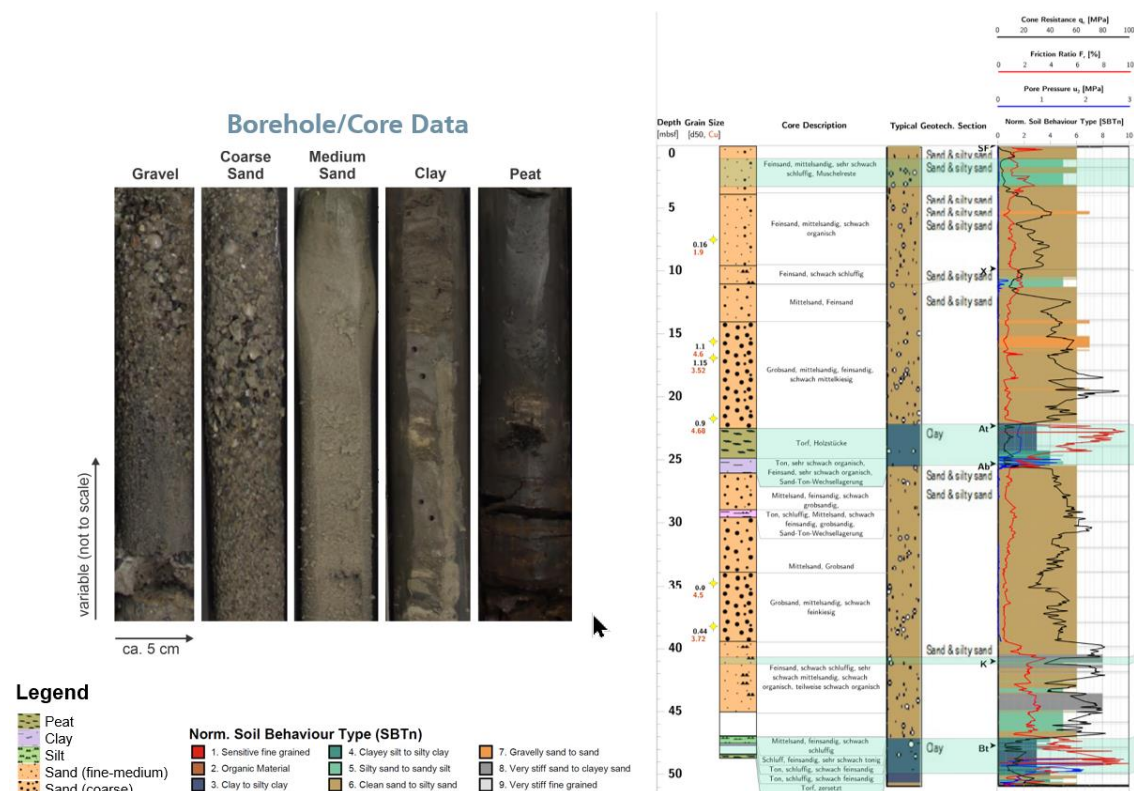
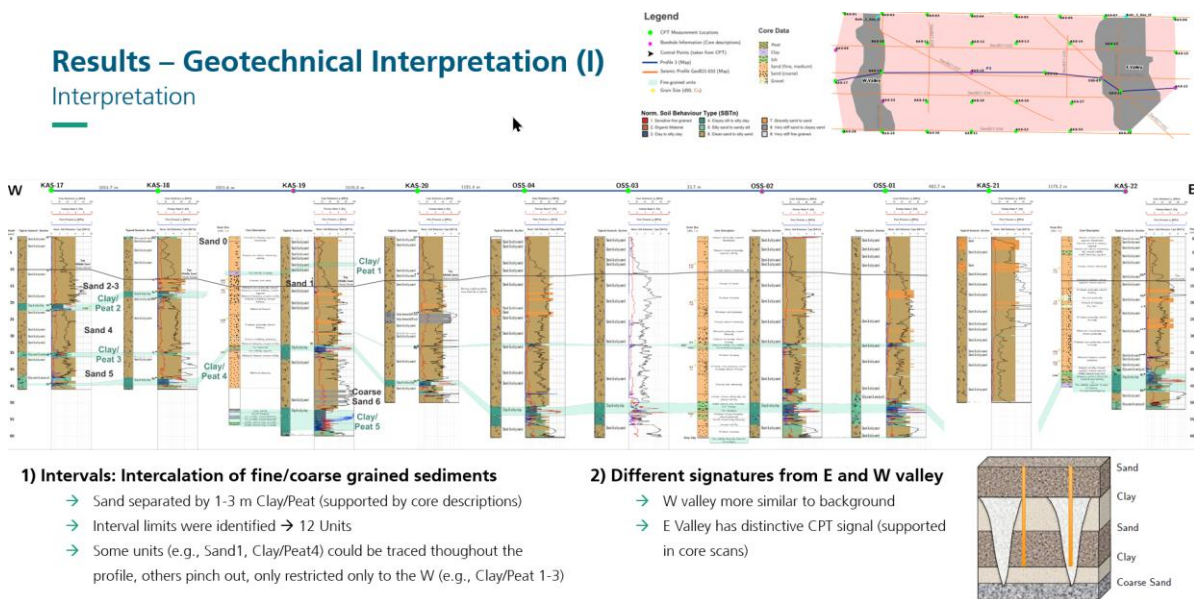


Abbildung 13: Datenintegration: Kerninterpretation und Korrelation mit CPT-Messung.

Diese konnte dann zur Beschreibung und quantitativen Bewertung der Geologie und der physikalischen Eigenschaften des Untergrunds verwendet werden.

Im weiteren Projektverlauf wurden diese Informationen verwendet, um die Inversionsparametrisierung in AP 4 und die Integration mit der Seismik in AP 5 zu unterstützen.



Die in diesem AP entwickelten Methoden sollen hier noch einmal zusammengefasst aufgeführt werden:

- Entwicklung eines Workflows für die CPT-Interpretation (Interpretation von Profilen aus Drucksondierungsmessungen).
- Entwicklung eines Workflows für die Integration von Ground-Truth-Daten, um diese für die Inversion nutzbar zu machen.
- Entwicklung und Etablierung eines Workflow für die Integration von Ground-Truth- und seismischen Daten, mit dem Ziel bestmögliche Inversion zu ermöglichen.

In „Ogunleye, O., Römer-Stange, N., Spieß, V., Keil, H., Morales, N., Pein, T., et al. (2023). Statistical Boundary Conditions of Subsoil Physical Properties in the Arkona Basin – Delineating Interface-Related and Layer-Based Seismic Attributes for Predicting Near-Surface Geotechnical Parameters.“ wird die Anwendung der Methodik vorgestellt und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

Durch die Arbeit mit CPT-Daten und die Integration von Bohrkernen wurden Verständnis und Fähigkeiten geschaffen, die zur Entwicklung eines integrierten 3D-Baugrund-Modells führten.

Unit	Cone resistance qc (MPa)	Friction Ratio Fr (%)	Pore Pressure u2 (Mpa)	SBTn
Sand_0	20-30	0.5-1	<0.2	6-7
Clay_Peat_1	5	10	0.4	3-5
Sand_Fine_1	20-60	0.5-1	<0.2	6-7
Sand_Medium_2	20-100	0.5-1.5	<0.2	6-7
Sand_3	25-60	0.5-1	0.2-0.4	6-7
Clay_Peat_2	5-10	4	0.4	4-5
Sand_Medium_4	20-60	0.5-1	<0.2	6
Clay_Peat_3	5-20	2-6	0.6-2	3-6
Sand_Medium_5	30-60	2-4	0.6-1	4-6
Clay_Peat_4	10-30	3-10	0.6-1	3-5
Sand_Coarse_6	60-100	2	0	5-8
Clay_Peat_5	10-30	2-4	0.5-1.5	3-5

Tabelle 2: Nach der Datenintegration aus allen im Arbeitsbereich verfügbaren Daten generierte Datenbank.

2.1.4 AP 4: Inversion

Das Hauptziel dieses Arbeitspakets bestand darin, eine Lösung für Inversion von geophysikalischen Daten in geotechnische Parameter zu identifizieren und zu entwerfen. Dabei wurden im Besonderen folgende Aspekte berücksichtigt:

1. Anpassung von Inversionstechniken an Flachwasserseismikdaten, wie sie typisch für Offshore-Wind sind
2. Die Entwicklung eines Inversions-Workflows.
3. Ein Vergleich der verschiedenen, in Frage kommenden, Methoden.
4. Die Bewertung der Anwendbarkeit und Aussagekraft der verschiedenen Verfahren und Methoden

Seismische Daten, die in Flachwasser aufgezeichnet werden, und wie sie in der Veredelung von Geophysik für Offshore-Wind-Anwendungen typisch sind, unterliegen starken Einschränkungen und Beschränkungen, wie z.B. dem Auftreten von großen Einfallswinkeln der seismischen Wellen und dem Auftreten von hohen Frequenzen bzw. Abtastfrequenzen. Daher müssen Strategien und Methoden zum Umgang mit diesen Problemen entwickelt werden.

Die im Projekt zielgerichtet weiterentwickelten Geschwindigkeitsmodelle aus AP 2 stellen eine wichtige Grundlage für Inversion dar, und wurden folgerichtig in die Arbeiten zur Entwicklung von Inversion integriert.

2.1.4.1 POST-STACK-IMPEDANZINVERSION

Zum theoretischen Hintergrund: Ein erster Meilenstein für die seismische Inversion, der zuerst von Lindseth (1972) erreicht wurde, war die sog. „Post-stack Impedanzinversion“. Zielgröße dieser Inversion stellt die sog. akustische Impedanz dar.

Nach Lindseth (1972, 1979), Cook & Schneider (1983), Oldenburg (1983) ist eine seismische Spur/Linie prinzipiell einer Zeitreihe vertikal einfallender Wellen ähnlich, und kann durch diese dargestellt werden. Diese Ähnlichkeit wird nicht von Datenverarbeitungs- und Processing-Schritten, wie Stapelung (stacking), Migration und sphärischer Ausbreitungskorrektur, beeinflusst, sondern bleibt durch das Processing hindurch erhalten. So kann eine seismische Linie d in rein akustischen Näherung als Verknüpfung/ Faltung der Zeitreihe w des seismischen Quellsignals mit der Zeitreihe r der Reflexion der Druckwellen PP modelliert werden (ungedämpft und ohne Mehrfachstreuung).

Die Impedanz Z_p , die zum Einen den Widerstand eines Systems gegen Schallfluss infolge von Schalldruck quantifiziert, und zum Anderen durch das Produkt aus ρ und v_p bestimmt ist, hängt mit dem vertikalen Einfallswinkel $\theta = 0^\circ$ der Zoeppritz-Gleichung zusammen. θ , gegeben zum Zeitpunkt i des TWT , ist abhängig von Z_p zu den Zeitpunkten i und $i + 1$. Bei bekannter oder geschätzter w kann r_{pp} aus d abgeschätzt und Z_p rekursiv berechnet werden; und zwar durch Anwendung von Dekonvolution, Autoregression, Vorhersagefiltern oder Optimierungsmethoden:

$$r_{PP,i} = \frac{Z_{P,i+1} - Z_{P,i}}{Z_{P,i+1} + Z_{P,i}} = \frac{\rho_{i+1} \cdot v_{P,i+1} - \rho_i \cdot v_{P,i}}{\rho_{i+1} \cdot v_{P,i+1} + \rho_i \cdot v_{P,i}}$$

Auf der anderen Seite ist wichtig zu bemerken, dass ein seismisches Quellsignal in einem bestimmten Frequenzbereich erzeugt wird, und dessen Zeitreihe infolgedessen auf ein bestimmtes Frequenzband begrenzt ist, womit auch die aus d ermittelte Impedanzabschätzung „bandbegrenzt“ ist. Ein seismisches Wavelet enthält daher nur in einem bestimmten, begrenzten Frequenzbereich ein nutzbares Signal. Die nicht enthaltenen hohen Frequenzen führen zu einer begrenzten Auflösung (Cooke und Cant 2010). Die fehlenden niedrigen Frequenzen hingegen führen dazu, dass der Startwert der bandbegrenzten Impedanz unbekannt ist und einen nicht richtig geschätzten Niederfrequenztrend hat (Ferguson und Margrave, 1996).

Daher schlugen Lindseth (1979) und Ferguson & Margrave (1996) vor, bei einer bandbegrenzten Impedanzschätzung mit niedriger Trennfrequenz einen gefilterten Niederfrequenztrend mit hoher Trennfrequenz hinzuzufügen, der aus Geschwindigkeitsanalysen oder Protokollen abgeleitet wird, um die Niederfrequenzkomponente der Impedanz wiederherzustellen. Zu diesem Zweck musste auch die relative Skalierung einer seismischen Linie geschätzt und korrigiert werden. Das entsprechende Formelwerk wurde im Projekt umgesetzt und implementiert.

Jede so ermittelte Impedanzabschätzung (Z_p -Schätzung), die die aus der Bandbegrenzung von w und d folgende Einschränkungen überwindet, legt die Grundlage für die Entwicklung eines wahren Untergrundmodells. Mit der Einführung von Impedanzbereichen oder -abschnitten in ein Modell können die ersten Schritte zur Umsetzung gegangen, bei allen Einschränkungen denen die Anwendung von Impedanzinversionsalgorithmen unterliegt.

Die Vorteile liegen auf der Hand, aber sollen hier noch einmal zum Ausdruck gebracht werden: durch Impedanzinversion können die gesamten in einem seismischen Post-Stack-Bild kodierten Informationen erhalten werden, während Bilddetails bei einer qualitativen Interpretation immer in der Gefahr sind, verloren zu gehen (Vardy, 2015).

Die Impedanz ist für technische Anwendungen von direktem Wert und kann durch die Umrechnung in geologische oder geotechnische Parameter für potenzielle Endnutzer sogar verbessert werden (Vardy et al., 2017, 2018; Vardy, 2020). Darüber hinaus können subjektive Verzerrungen bei der seismischen Inversion durch eine verbesserte Datennutzung und Automatisierung reduziert werden (Alcalde & Bond, 2022).

2.1.4.2 INTERVALLGESCHWINDIGKEITSINVERSION BASIEREND AUF EINEM GENETISCHEN ALGORITHMUS

Die Methode von Yilmaz (2001) zur Berechnung von Laufzeitkurven konnte im Projekt umgesetzt und implementiert werden. Wie in Yilmaz (2001) angegeben, und bei vertikal variierender Geschwindigkeit, kann die herkömmliche „Normal-Move-Out-Gleichung“ zweiter Ordnung (s. Kap. 2.1.2) zur Berechnung von Laufzeitkurven verwendet werden. Die NMO-Geschwindigkeit v_{NMO} kann durch die quadrierte mittlere Geschwindigkeit v_{RMS} angenähert werden.

$$v_{NMO} \approx v_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N v_{i,n}^2 \cdot \Delta TWT_n}{\sum_{n=1}^N \Delta TWT_n}}$$

Wesentliche Eingabewerte zur Erstellung eines Geschwindigkeitsmodells sind ausgewählte Laufzeitkurven. Das Ziel der Laufzeitkurveninversion besteht dann darin, ein Geschwindigkeits- (v_i -) Modell mit einer Hilfe einer Vorwärtsmodellierung⁹, wie oben beschrieben, zu erstellen. Da nur wenige Schichten als Eingabe verwendet werden, ist das Problem stochastisch zu optimieren.

Für die Laufzeitkurveninversion wurde ein ursprünglich von Storn & Price (1997) vorgeschlagener und von Barros et al. (2015) für CRS¹⁰ übernommener Algorithmus sog. differentieller Evolution implementiert, wie in Abbildung 15 gezeigt. Es wird eine Reihe von seismischen Modellen erstellt, denen zufällig generierte Tiefen- und Geschwindigkeitswerte zugewiesen werden: zugehörige Laufzeitkurven werden für jedes der Modelle berechnet. Eine L_2 -Norm wird bestimmt, um die synthetischen und die

⁹Die Vorwärtsmodellierung seismischer Daten ist eine Technik, mit der aus bekannten geologischen Informationen synthetische seismische Modelle erstellt werden.

¹⁰ Common Reflection Surface Processing ist eine Methode zur Beschreibung der Kinematik von Reflexionen in seismischen Reflexionsdaten mittels einer analytischen Laufzeitnäherung.

ausgewählten Laufzeitkurven zu vergleichen. In Auswertung der Abweichungen werden die Modelle optimiert, und in der Folge können zugehörige, synthetische Laufzeitkurven berechnet werden.

Dieses Verfahren wird fortgesetzt, bis ein bestimmtes Abbruchkriterium erreicht ist. Es wurden zwei mögliche Abbruchkriterien implementiert: Einerseits wird die Standardabweichung der Modellgesamtheit bestimmt, und die Iteration wird beendet, wenn die Modellwerte innerhalb eines festgelegten Grenzwertes liegen. Andererseits kann einfach die Anzahl von Iterationen begrenzt werden, wobei immer eine Verbesserung der initialen Ausgangswerte erreicht wird. Das endgültige Modell wird aus der Menge der optimierten Modelle bestimmt, indem der Mittelwert von $v_{P(z)}$ unter Berücksichtigung der am besten passenden Modelle bestimmt wird.

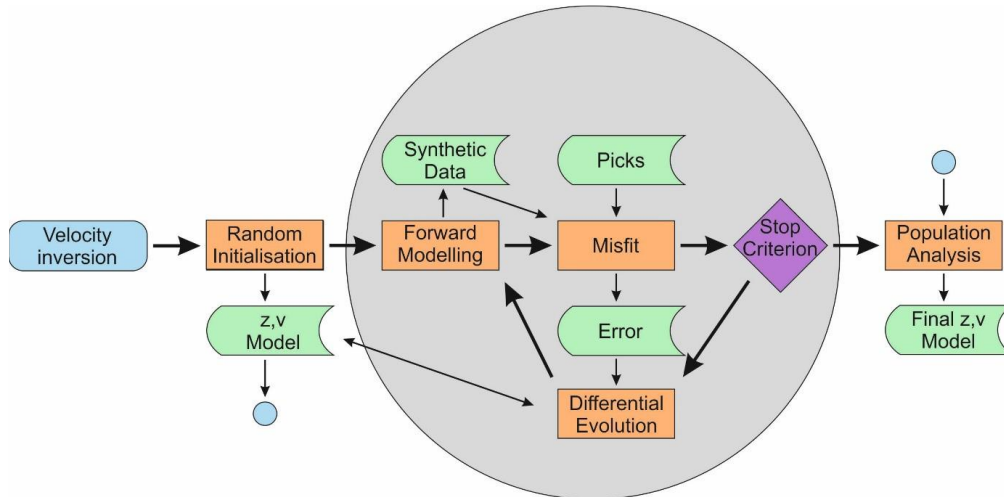


Abbildung 15: Optimierungsverfahren zur Inversion der Laufzeitkurve.

Die sog. differentielle Evolution, wie sie von Storn & Price (1997) und Barros et al. (2015) beschrieben wird, optimiert die „Modellpopulation“ in drei Schritten, die natürliche Evolutionsprozesse nachahmen: Mutation, Crossover und Selektion. Für die Mutation werden drei verschiedene Modelle $m_{G,r}$ 1–3 der Population der Generation G ausgewählt.

$$m_{G+1,mut} = m_{G,r_1} + f_m(m_{G,r_2} - m_{G,r_3})$$

Das Verfahren wurde für FuE- Anwendungen im Projekt umgesetzt und implementiert.

2.1.4.3 DÄMPFUNGSABSCHÄTZUNG

Q stellt eine quantifizierte Dämpfung dar, und kann auf Basis von seismischen Stack-Daten abgeschätzt und anschließend korrigiert und berechnet werden. Die Idee ist, durchschnittliche Q-Faktoren Q_{ave} für bestimmte Bereiche vom Meeresboden bis zu ausgewählten Horizonten sinnvoll abzuschätzen, und dann zu invertieren: Q_{int} . Die invertierten Werte Q_{int} können zum Erstellen eines Q- Modells, und anschließend zur Berechnung der Amplitudenkorrektur verwendet werden, um, wie erwähnt, wahre und von der Dämpfung nicht beeinflusste Amplitudenwerte für das weitere Verfahren zu bestimmen. Zur Bestimmung der erwähnten Werte Q_{ave} wurde der Spektrummodellierungsalgorithmus von Merouane & Yilmaz (2017) für Horizonte angewandt. Die Grundidee der Methode besteht darin, dass das Frequenzspektrum an einem Horizont gleich dem Frequenzspektrum am Meeresboden multipliziert mit der Dämpfungsfunktion ist, wenn ein sinnvoller Q_{ave} Wert für die Dämpfungsfunktion verwendet wird. Das Verfahren, unter anderem die Bestimmung der frequenzabhängigen Dämpfungsfunktion

wird in Jannsen et al., 1985; Pinson et al., 2008; Merouane & Yilmaz, 2017; Nemtsov, 2019 beschrieben, und konnte im Projekt für FuE-Anwendungen umgesetzt und implementiert werden.

2.1.4.4 BANDBEGRENZTE IMPEDANZINVERSION

In Kap. 2.1.4.1 wurde bereits auf die Einschränkungen der Impedanzinversion bei Anwendung auf seismische Quell- und Reflexionssignale aus einem bestimmten Frequenzbereich hingewiesen. Nichtsdestotrotz wurde zunächst eine „bandbegrenzte“ Impedanzinversion in Anlehnung an das Inversionschema von Vardy (2015) implementiert. Im Folgekapitel 2.1.4.5 werden die Schritte vorgestellt, die angewandt wurden, um die Einschränkungen aus der Bandbegrenzung der Ergebnisse zu überwinden. Das allgemeine Optimierungsverfahren ist in Abbildung 16 dargestellt, in der jede gestapelte Spur jedes CMP¹¹ unabhängig invertiert wird. Zunächst wird eine Population von NP - Reflektivitätsmodellen initiiert. Um eine spärliche Initialisierung zu erreichen, wird für jedes Individuum ein Zufallszahlenvektor mit Zahlen im Bereich $[0,1]$ generiert. Wenn die Zufallszahl kleiner als ein festgelegter Grenzwert ist, der als Reflektorwahrscheinlichkeit bezeichnet wird, wird an der spezifischen Position des Individuums eine zufällige Reflektivität innerhalb des Bereichs der erwarteten Werte initiiert. Wenn der Zeitvektor also 100 ms bei einer Abtastrate von 4000 Hz umfasst, haben die Zeit- und Reflektivitätsvektoren eine Länge von 400. Bei einer Wahrscheinlichkeit von 5 % werden im Durchschnitt 20 Reflektoren zu zufälligen Zeiten und mit zufälliger Reflektivität für jede Spur initialisiert.

Anschließend startet die Optimierungsschleife, die so lange wiederholt wird, bis eine festgelegte Anzahl von Iterationen erreicht ist. Innerhalb der Optimierungsschleife werden synthetische seismische Daten für jedes Individuum der Population durch statische Faltung berechnet. Als Maß für die Fehlanpassung an die beobachteten gestapelten Daten wird die L_1 -Norm berechnet, s. auch Kap. 2.1.4.2

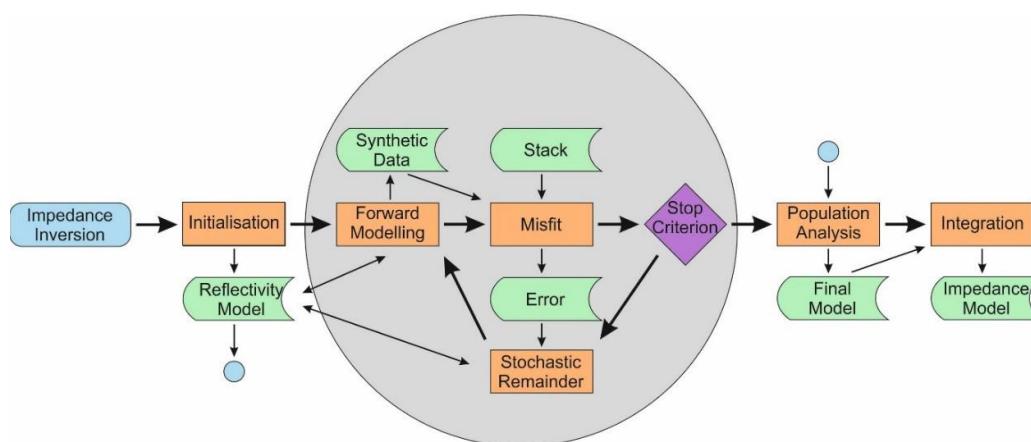


Abbildung 16: Optimierungsverfahren für die Impedanzinversion

In Abbildung 17 werden in A) Vergleich der seismischen Amplituden der Originalspur und des Inversionsergebnisses mit einem Korrelationskoeffizienten (Pearson's R) von 0,96 gezeigt. Für das hier gezeigte Beispiel wurde die Dämpfung nicht korrigiert. Die Ergebnisse der Inversion sind die (B) invertierte Reflektivität und die (C) bandbegrenzte invertierte akustische Impedanz.

¹¹ CMP, Common Mid Point ist ein Fachbegriff der Seismik und bezeichnet den gemeinsamen Mittelpunkt zur Stapelung seismischer Spuren in der Mitte zwischen seismischer Quelle und seismischem Empfänger für verschiedene Quelle-Empfängerkonfigurationen.

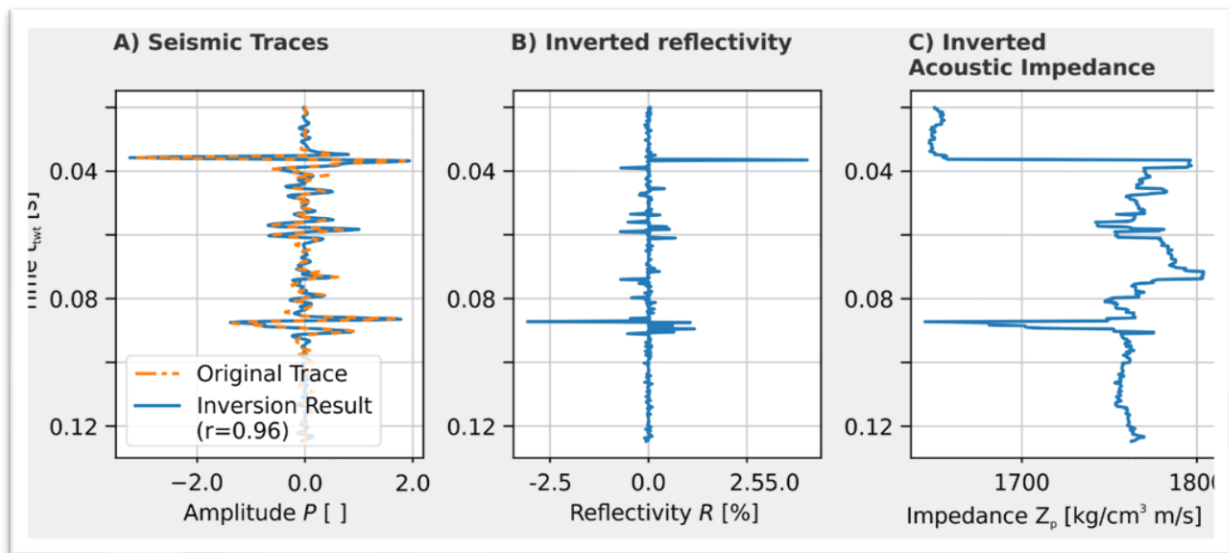


Abbildung 17: : Beispielhafte bandbegrenzte Impedanzinversion von CMP492 neben CPT 3.

2.1.4.5 EINBEZIEHUNG VON NIEDERFREQUENZMODELLEN

Nach Anwendung der bandbegrenzten Impedanzinversion können zwei bedeutende Probleme auftreten. Einerseits fehlt der Niederfrequenztrend, und bestimmte Gradienten, wie der Verdichtungsgradient, sind in den seismischen Aufzeichnungen nicht sichtbar. Andererseits sind die seismischen Aufzeichnungen in der Regel nicht kalibriert. Daher sind weder der an der Quelle emittierte Druck noch die absoluten Druckwerte verlässlich bekannt. Die seismische Verarbeitung ist außerdem oft nicht darauf ausgelegt, die absoluten Amplituden beizubehalten. Um diese Probleme zu kompensieren, wurde der auf Ferguson & Margrave (1996) basierende und in Lloyd (2013) ausführlicher beschriebene Algorithmus Band-Limited IMPedance inversion (BLIMP) implementiert.

Um das Niederfrequenzmodell mit der bandbegrenzten Inversion zu verschmelzen, muss eine charakteristische Frequenz definiert werden. Nach der Filterung wird der berechnete Skalierer angewendet, und die Eingänge werden zurück in den Zeitbereich transformiert. Die Impedanz mit wiederhergestelltem Niederfrequenzinhalt ist dann die Summe/ Kombination der gefilterten Eingänge mit dem linearen Trend des Niederfrequenzmodells.

Die Anwendung der diskutierten Methodik auf die 2D-Linien aus KASKASI führte zur Bestimmung von Impedanzwerten, die in Abbildung 18 dargestellt sind. In Section A sind die Eingabedaten und der Abschnitt, in dem die Horizonte interpretiert wurden, dargestellt. Daraus können Impedanzwerte, die von der Anwendung spezifischer Filter beeinflusst sind, abgeleitet werden: B zeigt die Horizonte und die jeweiligen Einheiten, die für den akustisch invertierten Abschnitt mit einem 10-Hz-Filter für das für das Trendmodell entworfene Modell verwendet wurden. C ist B vergleichbar, jedoch mit einem neuen Linkwitz-Riley-Filter von 40 Hz.

Zusammenfassung der im AP entwickelten Methoden:

Im AP konnten software-Pakete entwickelt werden, die zur Anwendung zur Verfügung stehen.

1. Software zur Erzeugung akustischer Impedanz.
2. Software zur Ermittlung der Laufzeittomographie.
3. Software zur Schätzung des Dämpfungsfaktors.

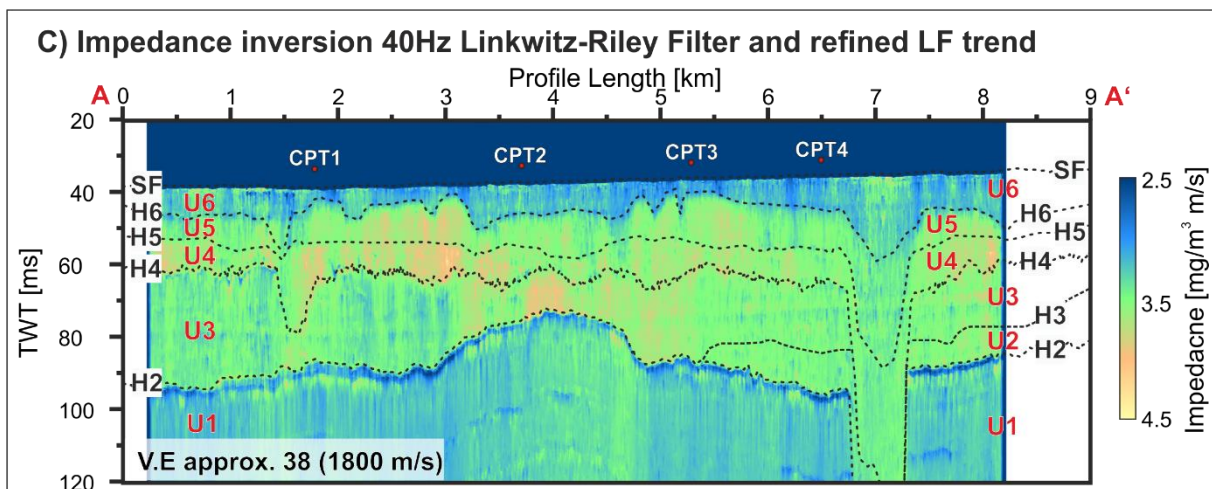
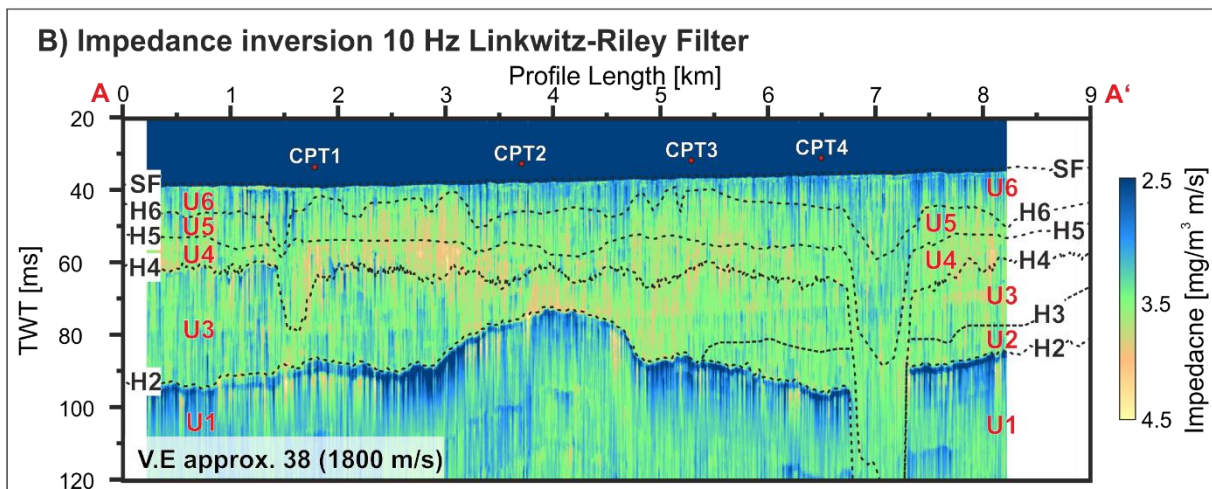
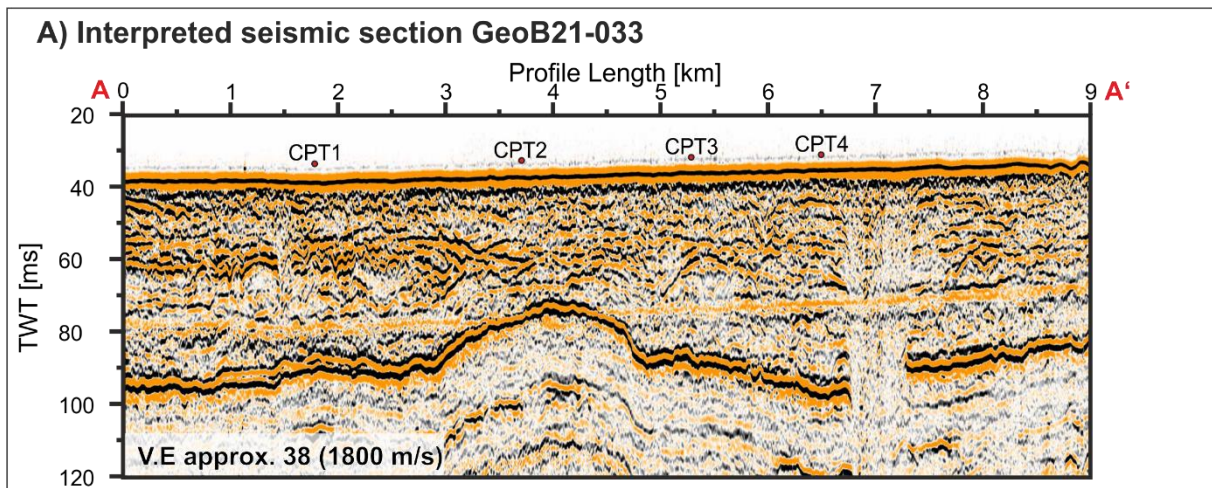


Abbildung 18 Invertierte akustische Impedanz

Um zu akustischer Impedanzinversion, einem Hauptergebnis der Projektes, zu gelangen war eine Adaption von Prozessingschritten zur Bewahrung und Wiederherstellung von realen Amplitudenwerten in Prozessing, Datenmigratin und Q-Tomografie nötig. Erreicht werden konnte eine Impedanzinversion bei der die „Bandbegrenzung“ durch wiederhergestellte Niederfrequenzinhalte kompensiert werden konnte, s. in Kap. 2.6: „Römer, N., Oguro, A. W., Córdova, C. R., & Spieß, V. (2022). Improving Subsurface Investigations with Acoustic Impedance Inversion: Concept and Example from the German

North Sea.“; „Römer, N., Keil, H., Ogunleye, O., Merl, M., Oguro, A., Ramos Córdova, C. (2023). From Interface to Layer Characterization in the Near Surface by Stochastic Seismic Inversion.“

Die Ergebnisse der Impedanzinversion, z.T. dargestellt in Abbildung 18, konnten in das folgende AP 5 zu Geostatistischen Methoden einbezogen werden. Das betraf input für die Methoden des Co-Kriging, ML und die „neuronalen Netzwerke“.

2.1.5 AP 5: Datenintegration

Die Hauptziele dieses Arbeitspakets waren die Entwicklung und Anwendung geostatistischer Methoden und Methoden des maschinellen Lernens (ML) zur Integration seismischer und geotechnischer Datensätze, unter Berücksichtigung der im Projekt entwickelten Methoden und erzeugten Parameter bzw. seismischer Attribute.

Nachdem die Zusammenhänge zwischen den Parametern in AP 2, AP 3 und A P4 verstanden wurden, konnten sie integriert werden. Es wurden Multiattributmethoden auf Basis geostatistischer und neuronaler Netzwerke verwendet, um quantitative Baugrundmodelle zu erstellen.

2.1.5.1 GEOSTATISTISCHER ANSATZ

Kriging

Kriging ist ein lineares geostatistisches Modell, das lokale gewichtete Mittelwerte der Messungen in der Umgebung verwendet, um räumliche Vorhersagen zu treffen. Der interpolierte Wert ist eine lineare Kombination von Messungen in der Nachbarschaft, während die Gewichte so optimiert werden, dass der Interpolationsfehler zu minimieren. Die Kriging-Gewichte werden während einer Matrixinversion berechnet und hängen von den Abständen zwischen den Positionen der Messungen und dem Ziel, den Abständen zwischen den Positionen der Messungen untereinander und von einem Modell der räumlichen Variabilität (Variogramm oder Kovarianz) ab. Je nach der Bedingung der Stationarität und der Anzahl der Variablen, können verschiedene Varianten von Kriging angewandt werden.

Im Gegensatz zu deterministischen Methoden wie Inverse-Distanz-Wichtung (IDW) liefert Kriging zwei Ergebnisse: die Schätzung selbst und die Varianz der Schätzung. Es ist jedoch bekannt, dass:

- Die Kriging-Schätzungen erzeugen eher geglättete Berechnungen, die im Durchschnitt die niedrigen Werte überschätzen und die hohen Werte unterschätzen.
- Es reproduziert nicht die räumliche Variabilität der Originaldaten und die entsprechenden Unsicherheiten.

Hier wird das sog. Ordinary Kriging (OK) angewandt, eine Variante des Kriging welches zur univariaten Vorhersage von synthetischer CPTs verwendet werden kann. Sie kann zur Modellierung einer stationären Variable verwendet werden. Der Begriff „ordinär/ gewöhnlich“ weist darauf hin, dass sie nur dann zur Modellierung nichtstationärer Variablen anwendbar ist, wenn lokale Stationarität in der Umgebung hergestellt wird (Chilès und Delfiner 2012).

Co-Kriging

Falls in den Daten Beziehungen zwischen geotechnischen und seismischen Informationen gefunden werden, sind weitere Ansätze wie Kriging mit externem Drift oder Co-Kriging anwendbar. Im ersten Fall werden die Zusatzinformationen genutzt, um Nichtstationarität ohne hohen Rechenaufwand zu berücksichtigen, im zweiten Fall werden detailliertere Kreuzvariogramme erstellt, um die Co-Kriging-Gewichte zu berechnen.

Ordinary Collocated Cokriging (CoK) ist eine Variante von OK zur multivariaten Modellierung der Hauptvariable (z. B. q_t) unter Berücksichtigung einer Hilfsvariable aus seismischen Daten (z. B. Z_p), die eine bessere oder sogar flächendeckende geografische Abdeckung aufweist. Der Begriff „Collocated“ bezieht sich auf die Situation, wenn die Hilfsvariable an allen Zielpunkten bekannt ist (Wackernagel

2003, Masoudi et al. 2023). Cokriging nutzt die Kreuzkorrelation zwischen einer primären und einer sekundären Variable, um die Varianz des Schätzfehlers zu minimieren (Minnitt und Deutsch 2014).

Modellierungsworkflow Geostatistische Methoden

Da CPTs nicht genau auf der seismischen Linie, mit der sie assoziiert werden sollen, liegen, werden die CPT-Informationen im ersten Schritt auf den nächste gelegenen Punkt der seismischen Linie projiziert. Als Grundlage für die Berechnungen wird ein Semi-3D Gitter erstellt, das den Umfang der für diese Studie verwendeten seismischen Linie abdeckt. Die vertikale Auflösung beträgt 0,1 m und der horizontale Abstand 10 m, was zu einer Gesamtzahl von 640.800 Gridzellen führt. Das Gitter kann verwendet werden, um an jedem beliebigen Punkt synthetische CPT-Profile zu extrahieren. Die seismischen Informationen, die als Orientierungsinformationen für die Vorhersage dienen, werden gitterbezogen migriert.

An den CPT-Standorten werden die geotechnischen Parameter ebenfalls auf das Raster projiziert, und im selben Schritt auf die durch die seismischen Daten vorgegebene Auflösung hochskaliert. Das Modell ist in drei Unterdomänen unterteilt. Die Modellierung erfolgt separat in diesen Unterdomänen, was genauere Vorhersageergebnisse gewährleistet, indem nicht zueinander gehörende Bereiche nicht vermischt werden. Zur Erstellung der Unterdomänen werden die räumlichen Informationen aus den interpretierten und gerasterten seismischen Horizonten verwendet. Die Modell-Unterdomänen werden somit durch die Horizonte definiert. Die entsprechenden CPT-Daten werden ebenfalls den jeweiligen Unterdomänen zugewiesen.

Es musste eine Suchumgebung definiert werden, die einen starken Einfluss auf das geschätzte Ergebnis hat. Für die Interpolation werden nur die Datenpunkte berücksichtigt, die innerhalb des Suchvolumens liegen. Für den vorliegenden Datensatz wurde eine relativ kleine Umgebung von 2,5 m für die vertikale Richtung gewählt, da davon auszugehen ist, dass sich die Daten über geologische Schichten hinweg schneller ändern. Für die horizontale Richtung wurde aufgrund der großen Entfernung zwischen den Ground-Truth- Standorten und um für jeden Interpolationspunkt eine ausreichende Menge an Informationen einzubeziehen, eine vergleichsweise große Umgebung von 3000 m gewählt. Diese große laterale Umgebung setzt eine homogene Geologie der identifizierten Einheiten voraus.

Raumverformung durch Faltung

Um die laterale räumliche Kontinuität zu verbessern, wird die Modellierung in einem transformierte, abgeflachten („entfalteten“) Raum durchgeführt. Eine vereinfachte Darstellung des Konzepts findet sich in Abbildung 19. Auf Sedimentablagerungen oder dynamische Sedimentsysteme einwirkende tektonische Kräfte erzwingen strukturelle Veränderungen und machen den Raum folglich heterogener, indem sie die räumliche Kontinuität der Variablen verringern. Das Entfalten ist eine Technik der Raumverformung, die Raumheterogenitäten reduziert, indem die Sedimentablagerungen in den Zustand vor der Einwirkung tektonischer Kräfte zurückversetzt werden oder indem nicht-horizontale und heterogene Schichtung berücksichtigt wird (Caixeta und Costa 2021, Chautru et al. 2021).

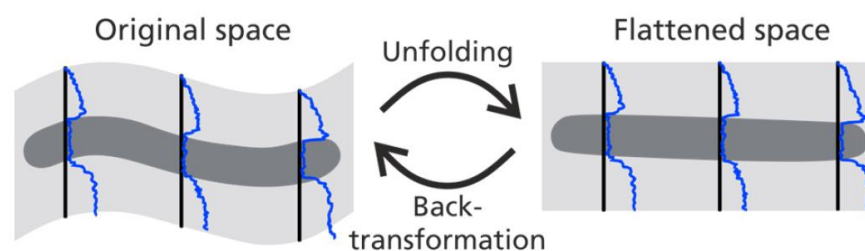


Abbildung 19: Vereinfachte Darstellung des Raumdeformationsansatzes zur verbesserten Vorhersage geotechnischer Parameter (Siemann et al., 2024).

Ergebnisse aus den geostatistischen Ansätzen

Die Prognose der CPT-Parameter erfolgt entlang der 2D-UHR-Seismiklinie. Alle CPT-Parameter werden sowohl mit OK als auch mit CoK gut vorhergesagt, einschließlich des korrigierten Spitzenwiderstands (q_t), der Mantelreibung (f_s) und des Porendrucks (u_2). Zusätzlich wurden einige Rechnungsläufe durchgeführt, bei denen einzelne CPTs als Berechnungsinput entfernt wurden, um so mit Hilfe sogenannter Blindtests Rechnungsergebnisse mit realen Messdaten an konkreten Standorten vergleichen zu können. Der Einfluss, den die sukzessive Herausnahme verschiedener CPT-Profile aus der Berechnung auf die prognostizierten Werte entlang der Seismischen Linie hatte, konnte so untersucht werden. Die prognostizierten, berechneten Werte können später im probabilistischen Design verwendet. Für die geostatistischen Methoden OK und CoK wird das vorhergesagte q_t in Abbildung 20, f_s in Abbildung 26 und u_2 in Abbildung 27 gezeigt. Die Ergebnisse zeigen die beste Schätzung der Vorhersage zusammen mit ihrer Unsicherheit in Form der Standardabweichung. Es sind deutlich lokale Änderungen in der Vorhersage zu erkennen, wenn CPTs aus der Rechnung entfernt werden, was sich insbesondere auf kleinere harte/weiche Schichten auswirkt. Die Prognose folgt der Form und Struktur, die durch die betrachteten seismischen Horizonte eingeführt wurden, die für das oben beschriebene Domänenglättungsverfahren verwendet wurden. Das OK bewirkt ein geglättetes Erscheinungsbild, was ein normales Phänomen bei der Anwendung von Kriging ist, das für seinen Glättungsfaktor bekannt ist. CoK nutzt die akustischen Impedanzergebnisse als Kovariable entlang des Gitters, wenn keine CPT-Informationen vorhanden sind. Dies zeigt sich darin, dass es mehr lokale Variationen in der Prognose gibt, wodurch diese weniger geglättet wird als für OK. Wenn man sich die Statistik der Ausgabe ansieht, ist auffällig, dass die Ergebnisse negative Werte aufweisen, teilweise, innerhalb der Toneinheiten, sogar unter -20 MPa, was weit entfernt ist von typischerweise erwarteten Werten. Der Grund, warum bei CoK negative Werte in Einheit III auftreten können, liegt darin, dass entlang des seismischen Profils Bereiche mit ko-lokalisierten Z_p -Werten auftreten, die unter den minimalen q_t -Werten an den CPT-Positionen liegen. Mit anderen Worten, obwohl die Modellierung gültig ist für die Bandbreite der an den Messorten beobachteten akustischen Impedanz, kann sie zu einer unrealistischen, negativen Extrapolation von q_t in Bereichen führen, in denen Z_p niedriger ist. In den dargestellten Standardabweichungen, in denen gemessenen Daten verfügbar waren, ergibt sich natürlich keine oder eher eine sehr geringe Unsicherheit. Je weiter die Prognose von den tatsächlich gemessenen Daten entfernt ist, desto höher wird die Unsicherheit. Die Unsicherheit in den vorgestellten Methoden basiert auf dem Variogrammodell, das in der Berechnung und Prognose benutzt wird, was sie zu einer modell- und entfernungsabhängigen Unsicherheit macht. Da jede Einheit im Modellierungsverfahren separat betrachtet wurde, ergeben sich für alle unterschiedliche Unsicherheiten. Die höchsten Unsicherheiten treten in der am tiefsten liegenden Einheit auf, was durch eine mit der Tiefe abnehmende Menge an Ground Truth-Informationen erklärt werden kann. Im direkten Vergleich mit OK, nimmt die Gesamtstandardabweichung ab, insbesondere abseits der CPT-Standorte. Dennoch, am gemessenen Ort ist die Standardabweichung höher im Vergleich zu OK, aufgrund des gewählten Variogrammodells für den speziellen Datensatz, das eine höhere Variabilität bei kürzeren Distanzen im Vergleich zum OK Modell umsetzt.

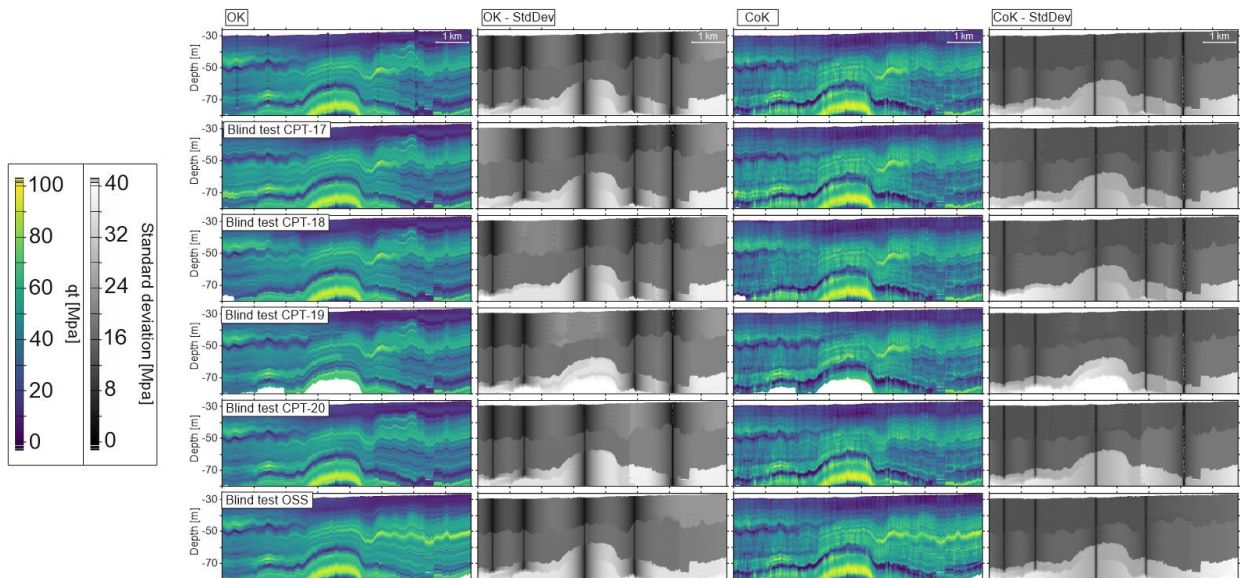


Abbildung 20: Vorhergesagter korrigierter Spitzenwiderstand (q_t) für OK inkl. Standardabweichung (links) und CoK inkl. Standardabweichung (rechts) entlang der 2D-UHR-Seismiklinie. Jede Zeile berücksichtigt ein anderes Blindtestszenario.

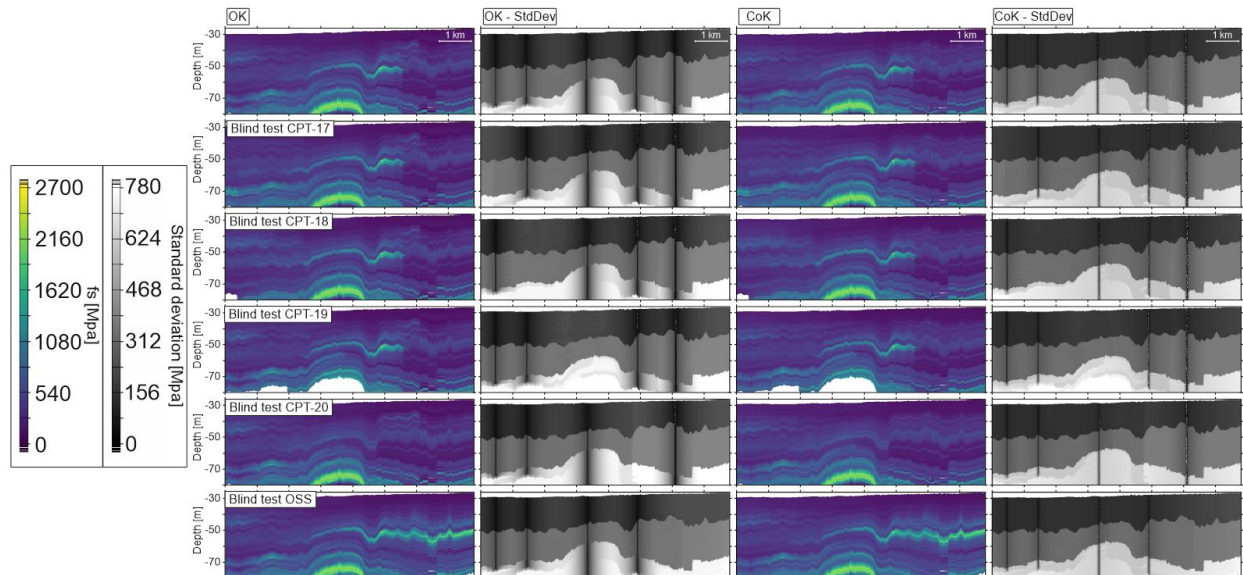


Abbildung 21: Vorhergesagte Mantelreibung (f_s) für OK inkl. Standardabweichung (links) und CoK inkl. Standardabweichung (rechts) entlang der 2D-UHR-Seismiklinie. Jede Zeile berücksichtigt ein anderes Blindtestszenario.

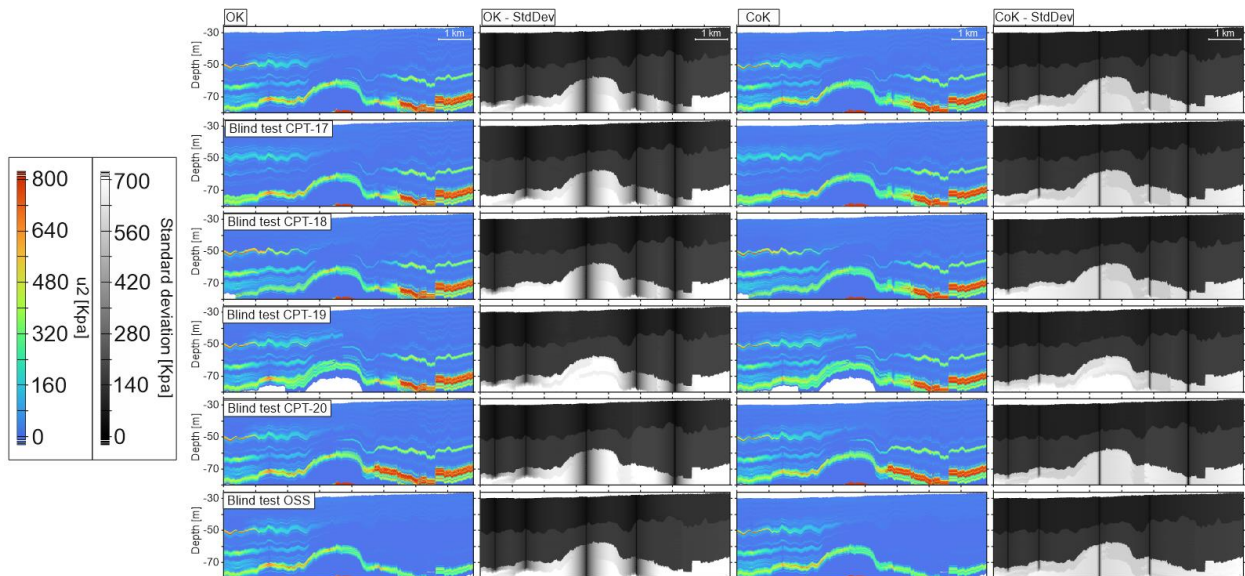


Abbildung 22: Vorhergesagter Porendruck (u_2) für OK inkl. Standardabweichung (links) und CoK inkl. Standardabweichung (rechts) entlang der 2D-UHR-Seismiklinie. Jede Zeile berücksichtigt ein anderes Blindtestzenario.

2.1.5.2 MACHINE LEARNING (MASCHINELLES LERNEN)

Random-Forest-Regression

Es wurde zusätzlich Random-Forest-Regression (RF) angewendet, um synthetische qt-Werte an bestimmten Standorten zu erzeugen. RF hat sich bereits bei der Analyse von Daten von Offshore-Windparks als wirksam erwiesen, wie Studien wie Vanneste et al. (2022) belegen. RF funktioniert durch die Konstruktion eines umfangreichen Netzwerks von Entscheidungsbäumen, wobei jeder Baum als autonomes Regressionsmodell fungiert (Breiman 2001). Die kombinierte Vorhersage der RF-Regression wird durch Mittelung der Ergebnisse aller einzelnen Entscheidungsbäume erreicht. Dieser Ansatz ermöglicht es, mehrere zusätzliche Attribute in den Vorhersage- und Prognoseprozess einzubeziehen.

Feed-Forward-Neuronales Netzwerk

Die Architektur von Feed-Forward-Neuronales Netzwerk (FFNN) umfasst mehrere wesentliche Komponenten: nicht sichtbare (nicht visualisierte) Schichten, die Anzahl der Neuronen in jeder nicht sichtbaren Schicht, die Aktivierungsfunktion für jedes Neuron und den Trainingsalgorithmus zur Bestimmung kollektiver Wichtungsfaktoren und Trends (Bias). Während die Eingabe- und Ausgabeschichten unterschiedliche Rollen bei der Präsentation und Extraktion von Daten erfüllen, wird die Zuweisung der Neuronenmengen innerhalb dieser Schichten durch die Eigenschaften der Eingabe- und Ausgabefunktionen bestimmt. Nicht sichtbare Schichten, die zwischen den Eingabe- und Ausgabeschichten positioniert sind, besitzen bestimmte Gewichte und Biase und leiten Eingabedaten durch Aktivierungsfunktionen, um nichtlineare Transformationen zu durchlaufen (Sharma et al. 2017). Die Eingabedaten werden mithilfe der Min-Max-Normalisierung normalisiert, was eine schnellere Konvergenz bei hohen Lernraten ermöglicht. In Forschungsarbeiten, wie denen von Shoukat et al. (2023), wurde FFNN zur Prognose synthetischer CPTs in Offshore-Umgebungen verwendet.

Vorgehen beim maschinellen Lernen

Für die maschinellen Lernmodelle Rf und FFNN ist das für die geostatistischen Methoden beschriebene Verfahren zum Arbeiten im entfalteten Raum nicht erforderlich, da beide Methoden eine Regression mit mehreren Attributen verwenden, die nicht durch geometrische Beschränkungen eingeschränkt ist. Für die Berechnung wird dasselbe Raster wie für die geostatistischen Vorhersagen verwendet. Zum

Trainieren beider maschineller Lernmodelle werden seismische und geotechnische Daten aus dem Untersuchungsgebiet einbezogen. Neben Z_p wurden im Trainingsprozess weitere Informationen verwendet, darunter seismische Attribute, Wassertiefe, geografische Koordinaten und die Identifizierung geologischer Einheiten (Abbildung 23: Abbildung 21). Neben Z_p werden dem Trainingsprozess acht weitere Poststack-Attribute hinzugefügt: Instantaneous Amplitude, einschließlich erster und zweiter Ableitung, Energie, Instantaneous Bandbreite, Instantaneous Frequenz, Instantaneous Q-Faktor und Smilarity. Die Einbeziehung von mehr Attributen und damit auch mehr Informationen ist ein klarer Vorteil dieser Methodik im Vergleich zu den anderen.

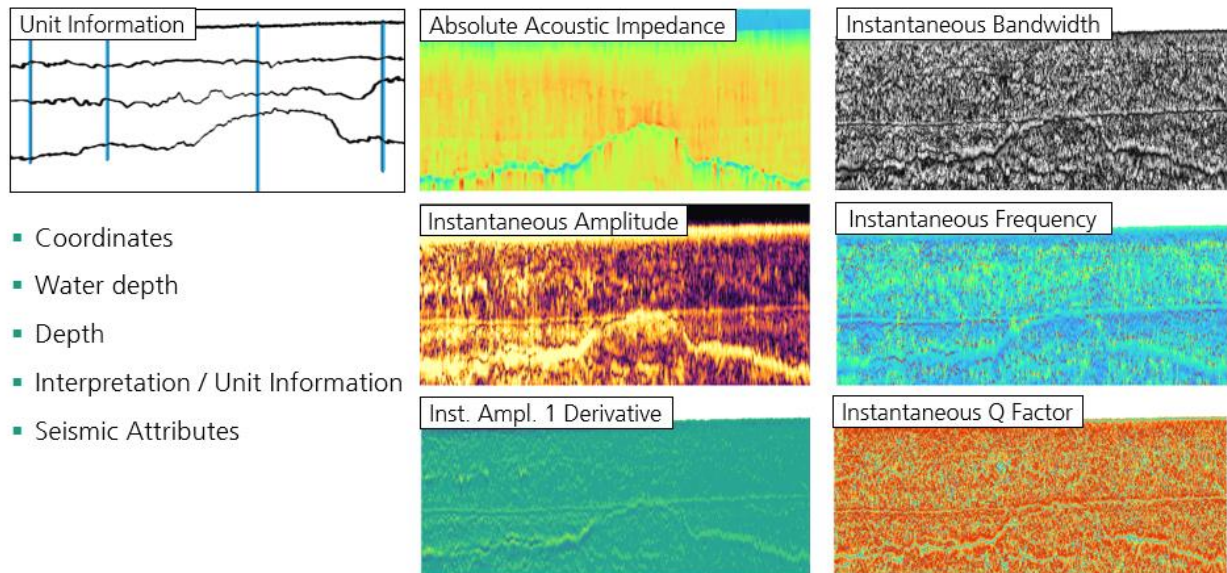


Abbildung 23: Übersicht über die Funktionen, die zur Prognose von CPTs mithilfe von ML verwendet werden. Die seismischen Attribute sind nur eine Auswahl der Gesamtmenge, die für den Trainingsprozess verwendet wird.

Ergebnisse aus den ML-Ansätzen

Abbildung 24: Abbildung 22 zeigt den Einfluss der Anzahl der für den Trainingsprozess des ML ausgewählten Attribute auf das Prognoseergebnis von q_t . Beide Methoden zeigen eine Verbesserung in der Vorhersage. Insbesondere werden die RF-Ergebnisse weniger „blockig“, und es können mehr geologische Merkmale erfasst werden, während die FFNN-Ergebnisse geschärft werden. Zukünftige Studien und Untersuchungen werden sich auf die Bewertung des einzelnen Beitrags verschiedener seismischer Attribute auf den Prognoseprozess konzentrieren, um Entscheidungen darüber zu ermöglichen und zu erleichtern, welche Attribute verwendet werden sollen.

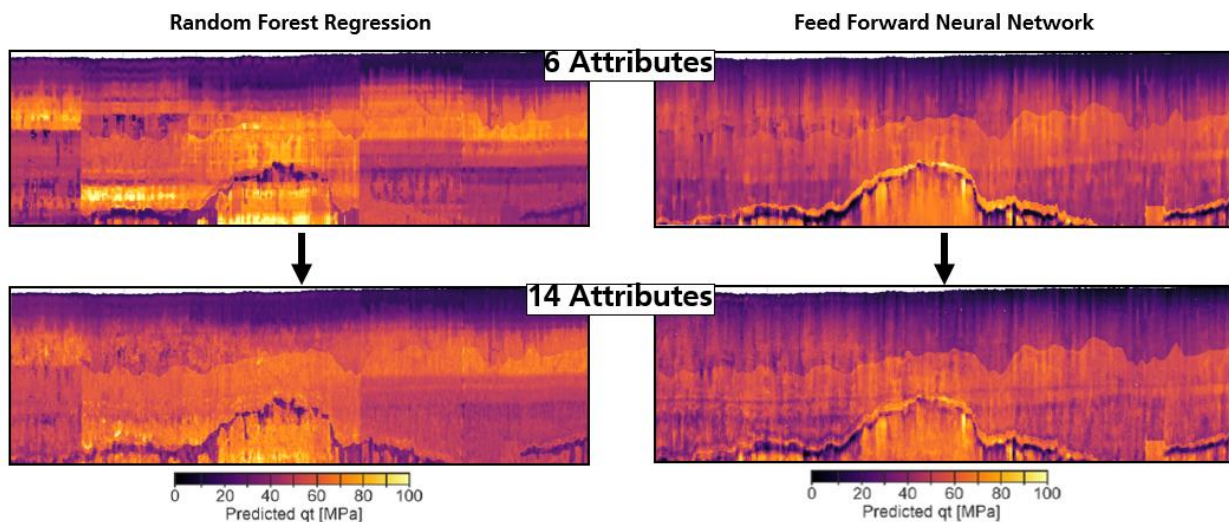


Abbildung 24: Einfluss der Anzahl der für die ML-Vorhersage verwendeten Attribute für 6 Attribute (oben) und 14 Attribute (unten). Links: Random Forest Regression; Rechts: Feed Forward Neural Network.

Wie bei den geostatistischen Verfahren, werden alle CPT-Parameter sowohl mit RF als auch mit FFNN vorhergesagt, einschließlich des korrigierten Spitzenwiderstands (q_t), der Mantelreibung (f_s) und des Porendrucks (u_2).

Die RF-Vorhersage repliziert die Schichtstruktur nicht so wie die anderen zuvor beschriebenen Methoden, was an den unterschiedlichen Modellierungsansätzen für RF und FFNN liegt. Da die akustische Impedanz keine klare Schichtung aufweist, kann sie mit dem RF-Ansatz nicht repliziert werden. Die untere Toneinheit wird nicht so genau erfasst wie bei den anderen Methoden, und im Osten des Profils werden überwiegend zu hohe Werte erhalten. In einigen Bereichen ändert sich die Größenordnung der vorhergesagten Parameter plötzlich an scharfen Grenzen. Dieselben Artefakte sind in der Standardabweichung zu erkennen, die insgesamt die niedrigste aller getesteten Methoden ist. Das Erscheinungsbild erschwert die Verfolgung der vordefinierten Horizonte. Dies wird durch eine Beschränkung der Methode bei der Verwendung begrenzter Datenmengen verursacht. Für diesen speziellen Eingabedatensatz werden die Teilmengen in den Entscheidungsbäumen zu groß, was zu einem blockartigen Erscheinungsbild im seismischen Profil führt.

Die allgemeine strukturelle Ähnlichkeit der FFNN-Ergebnisse mit der invertierten akustischen Impedanz lässt darauf schließen, dass erstere stark von letzterer beeinflusst werden. FFNN kann die untere Toneinheit erfassen, obwohl es einen Bereich mit relativ hohen Werten direkt darüber vorhersagt, was bei den anderen Methoden meist nicht der Fall ist. Außerdem hinterlässt das Vielfache einen unerwünschten, aber starken Eindruck bei der Rekonstruktion. FFNN leidet unter demselben Problem wie CoK und KED und sagt negative Werte innerhalb der unteren Toneinheit voraus. Dies lässt sich auch dadurch erklären, dass abseits der Trainingsdaten niedrigere AI-Werte auftreten, die beim Training nicht berücksichtigt wurden. Dies führt wiederum zu einer negativen Extrapolation. Dieses Problem kann überwunden werden, indem der Normalisierungsbereich der Eingabedaten für das Training angepasst wird.

Bei beiden Methoden ist die Vorhersage von u_2 am schwierigsten, was zu einem vergleichsweise hohen u_2 -Abschnitt in Einheit III führt. Interessanterweise ist das Gesamtbild der u_2 -Vorhersage beim Blindtest CPT-19 im Vergleich zu den anderen Ergebnissen recht unterschiedlich. Offenbar verursacht CPT-19 Störungen im Trainings- und Validierungsprozess, wenn es einbezogen wird, was zu Problemen bei allen anderen Vorhersagen führt.

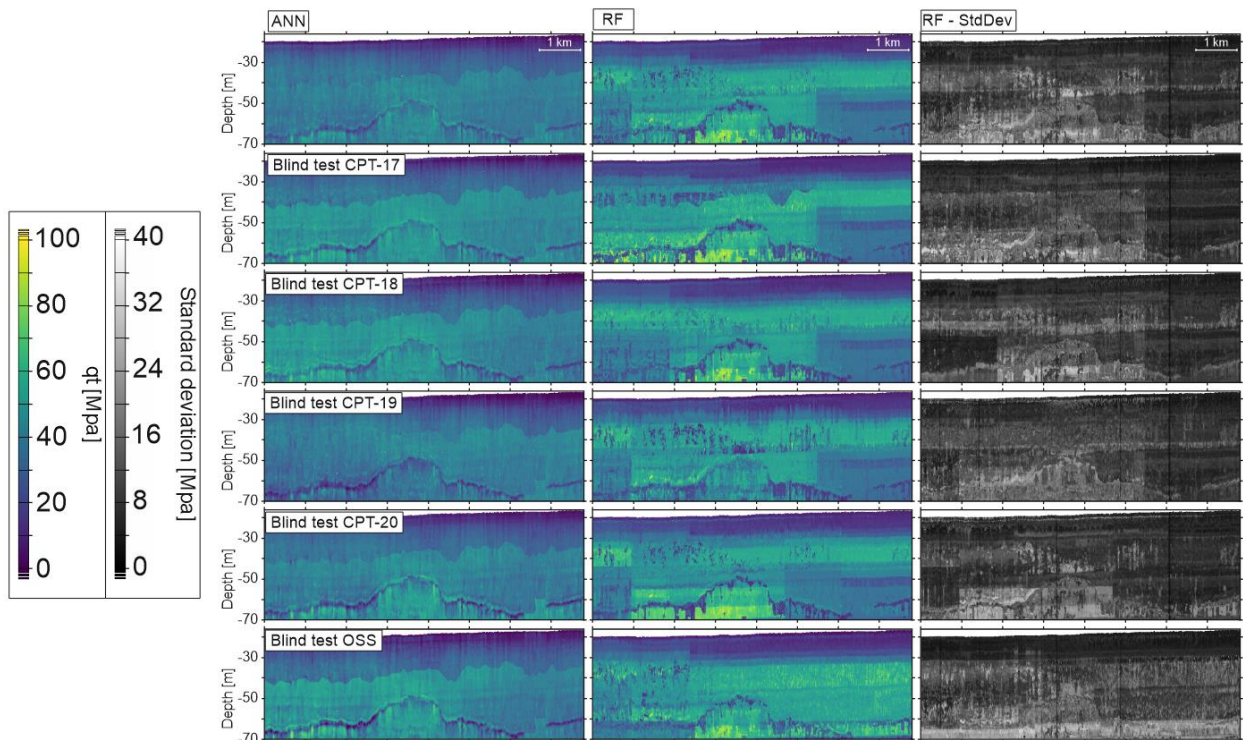


Abbildung 25: Vorhergesagter korrigierter Spitzenwiderstand (qt) für das ANN (links), RF (Mitte) und Standardabweichung von RF (rechts) entlang der 2D-UHR-Seismiklinie. Jede Zeile berücksichtigt ein anderes Blindtestszenario.

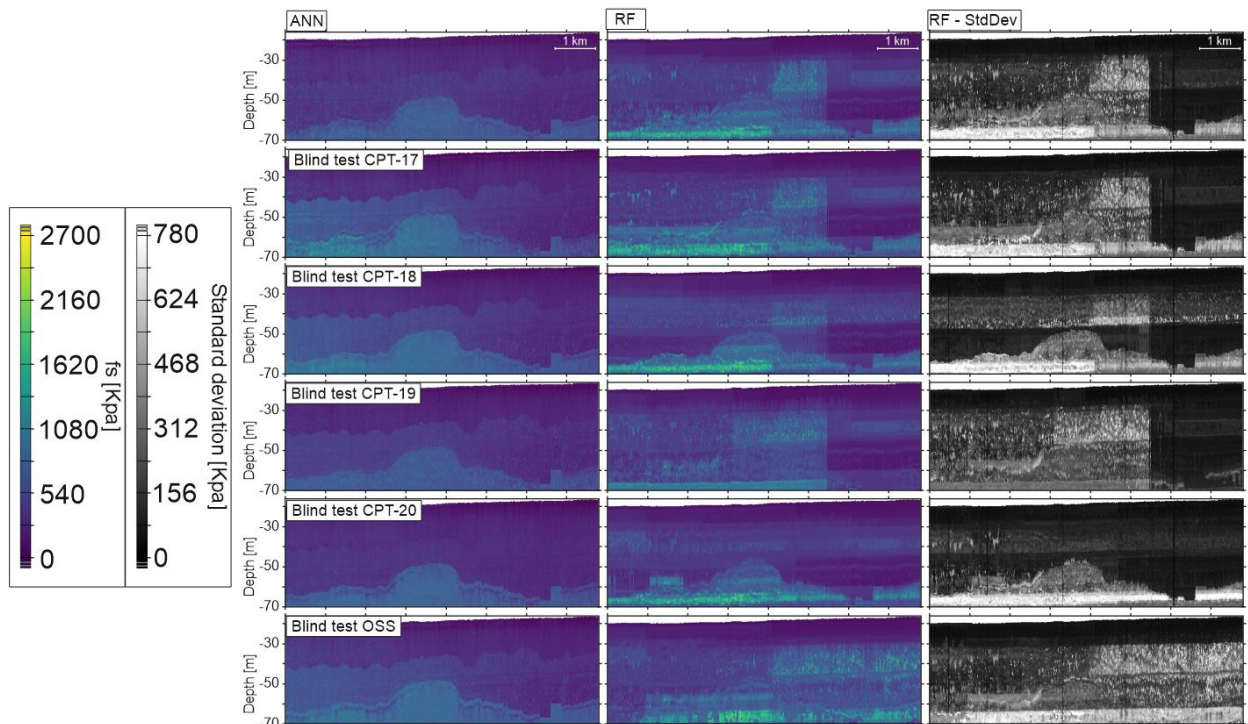


Abbildung 26: Vorhergesagte Mantelreibung (fs) für ANN (links), RF (Mitte) und Standardabweichung von RF (rechts) entlang der 2D-UHR-Seismiklinie. Jede Zeile berücksichtigt ein anderes Blindtestszenario.

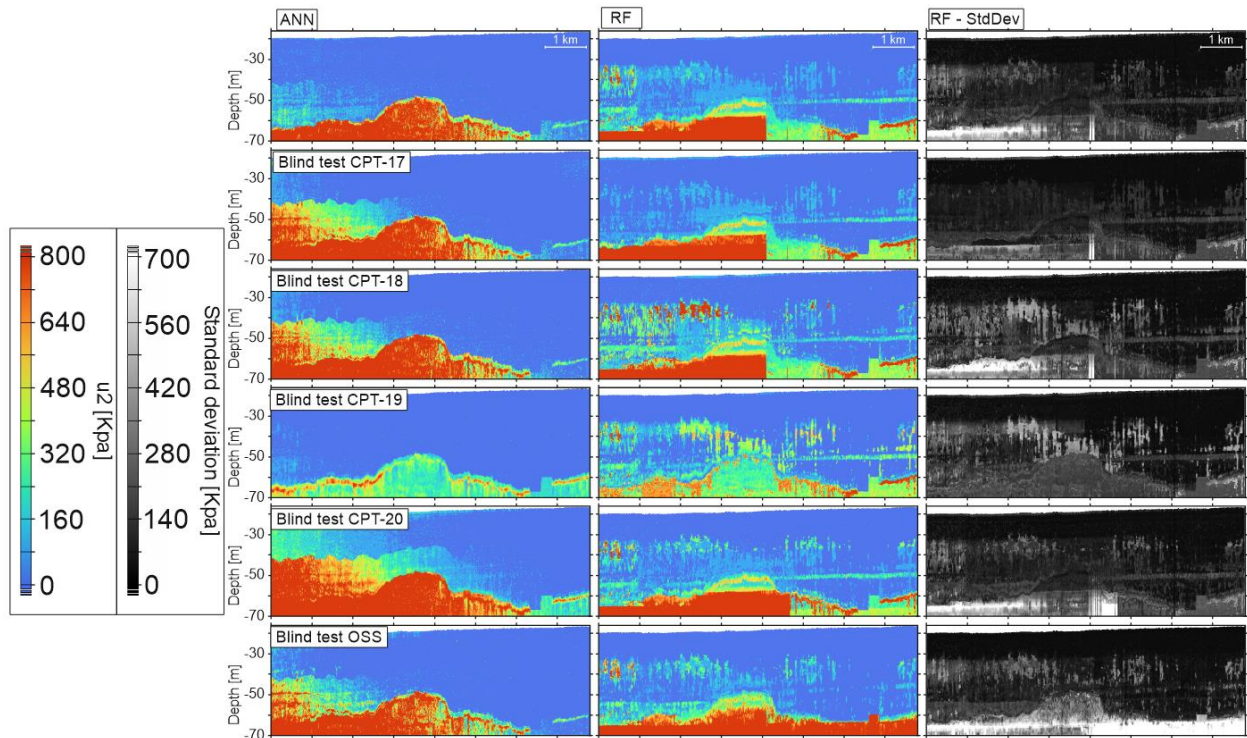


Abbildung 27: Vorhergesagter Porendruck (u_2) für das ANN (links), RF (Mitte) und Standardabweichung von RF (rechts) entlang der 2D-UHR-Seismiklinie. Jede Zeile berücksichtigt ein anderes Blindtestzenario.

Blind tests und deren Auswertung

Zusätzlich zur qt-Vorhersage auf der seismischen Linie zeigt Abbildung 28 Abbildung 26 repräsentativ die Ergebnisse von qt für die verschiedenen getesteten Methoden (blaue Kurve) an der Position des Blindprofils CPT-19 (schwarze Kurve). Auf eine Glättung der Messdaten wurde verzichtet, um die Limitierung synthetischer Profile gegenüber realen Daten angemessen darzustellen und zu berücksichtigen. Der blau schattierte Bereich gibt die Standardabweichung der entsprechenden Methode an, die für FFNN nicht vorhanden ist.

Alle Methoden erfassen den allgemeinen Trend von qt in Einheit I, obwohl RF dazu neigt, zu stark zu vereinfachen. In Einheit II weisen alle Methoden im Vergleich zu Einheit I eine höhere Abweichung von den gemessenen Daten auf. Insbesondere können sie die lokalen Extreme nicht richtig vorhersagen. Dies liegt daran, dass beispielsweise die sehr dichte Schicht in etwa 25 m Tiefe in den angrenzenden Profilen nicht vorhanden ist und daher nicht vorhersagbar ist. Außerdem wird diese Schicht in den Ergebnissen der akustischen Impedanz nicht angezeigt, sodass sie für CoK, RF und FFNN, die Z_p als Zusatzinformation verwenden, nicht sichtbar ist. Kleinere Extreme (z. B. bei ca. 31 m und 33 m) sind in der Vorhersage nicht zu sehen, da ihre vertikale Ausdehnung kleiner ist als das, was die seismischen Daten auflösen können. Diese Informationen gehen beim Upscaling-Prozess verloren und werden daher bei der Vorhersage nicht berücksichtigt. Alle Methoden neigen dazu, das gemessene Profil zu unterschätzen, mit Ausnahme der niedrigen Widerstände bei ca. 22 m und 33 m. Dies ist umso kritischer, da insbesondere Schichten mit geringem Widerstand eine potenzielle Gefahr bei der Pfahlinstallation darstellen und von besonderem Interesse für Entwurfsprozesse sind und daher in synthetischen CPT-Profilen erfasst werden müssen. Für Einheit III erfassen alle Methoden außer RF den allgemeinen Verlauf des Blindprofils. Während OK dazu neigt, die ursprünglichen Daten zu unterschätzen, überschätzen CoK und FFNN qt, insbesondere unterhalb der Toneinheit. Bei den Ansätzen, die Z_p als sekundäre Information betrachten, ist eine leichte vertikale Verschiebung zwischen der unteren Toneinheit und niedrigen qt-Vorhersagen zu beobachten, die bei den univariaten Methoden nicht zu sehen

ist. Dies ist einerseits durch vertikale Unsicherheit erklärbar, die durch den Migrationsprozess sowie durch Upscalings-prozesse eingeführt wird. Andererseits könnte die Unsicherheit durch die Projektion der CPT-Daten auf die seismische Linie verursacht werden. CPT-19 liegt 88 m von der seismischen Linie entfernt, wodurch vertikale Änderungen der Position der Tonablagerung sehr wahrscheinlich sind. Für technische Zwecke ist es besonders wichtig, Bereiche mit geringem Widerstand zu erfassen, was für die meisten Methoden außer RF gilt. OK führte zu verbesserten Vorhersagen der Tonvorkommen, da es nicht vom Z_p beeinflusst wird und nicht unter möglichen vertikalen Fehlanpassungen leidet.

Die geostatistischen Varianten schneiden vergleichbar gut im Vergleich zu den getesteten ML-Methoden ab, da entlang der getesteten seismischen Linie viele CPTs verfügbar sind. Sie sind in der Lage, die durch die seismischen Horizonte bedingte geologische Schichtung mithilfe der Entfaltungstechnik zu erfassen. Dennoch muss diese Methode sorgfältig geprüft werden, da sie keine größeren geologischen Veränderungen zwischen den Referenzhorizonten berücksichtigt. Im Allgemeinen haben die geostatistischen Varianten mehr Probleme in Situationen, in denen weniger Daten zur Verfügung stehen und in denen die Zielpunkte weit entfernt von den gemessenen Daten sind, aufgrund der distanzbasierte Gewichtung. Hier erzielen die getesteten ML-Ansätze Vorteile, da sie regressionsbasiert und damit unabhängig von der Distanz zwischen Messdaten und Zielort. Darüber hinaus kann maschinelles Lernen mehrere Attribute berücksichtigen. Deren Auswahl muss jedoch sorgfältig geprüft werden um sicherzustellen, dass sie verbesserte Vorhersagen erzeugen.

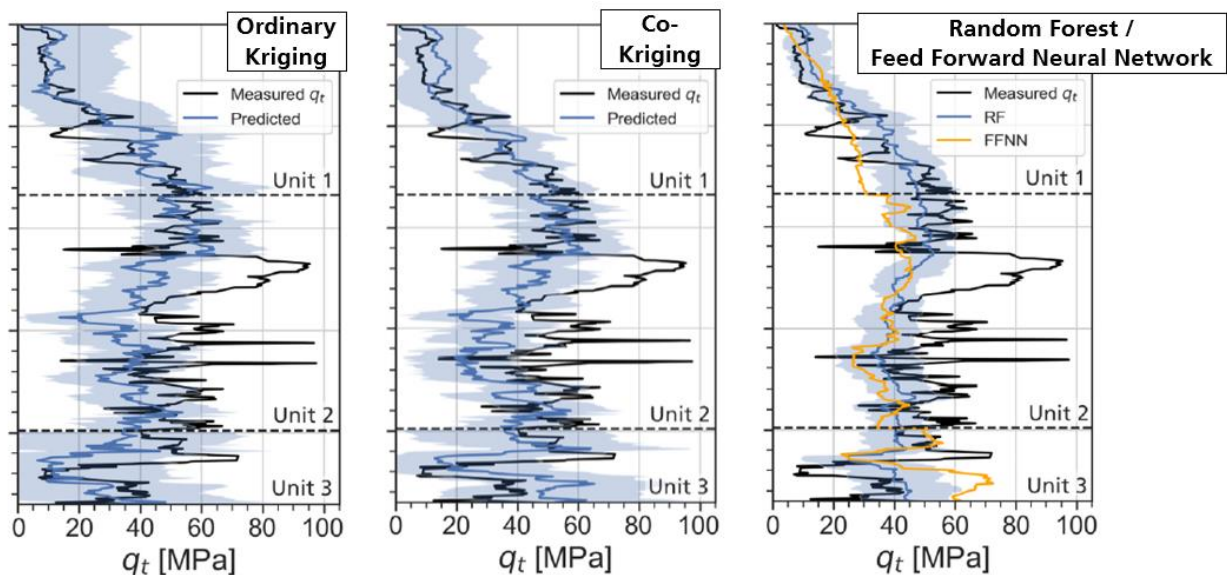


Abbildung 28: Vergleich der verschiedenen getesteten Vorhersagemethoden mit CPT-04 als Blindtest. Die schwarze Linie zeigt die gemessenen Daten und die blaue das vorhergesagte Profil. Die Standardabweichung wird durch die blau schattierten Bereiche angezeigt.

Zusammenfassung der entwickelten Methoden:

- 1) Entwicklung eines Workflows unter Verwendung geostatistischer Techniken (Kriging, Co-Kriging unter Einbeziehung seismischer Attribute, akustischer Impedanz) für die Entwicklung eines quantitativen Baugrundmodells für Windparks
- 2) Entwicklung eines Workflows mit Techniken des maschinellen Lernens für die Entwicklung eines quantitativen Baugrundmodells für Windparks

AP 6: Lösungspaket

Die Hauptziele des Arbeitspakets waren:

1. Entwicklung einer Methodik zur integrierten quantitativen Bodenklassifizierung, insbesondere zur Generierung von Kennwerten.
2. Bewertung der wirtschaftlichen Aspekte: Kosten und Nutzen.
3. Berücksichtigung von Branchenanforderungen an die technische Gestaltung

Durch die Integration der Arbeitsabläufe aus WP2, WP3, WP4 und WP5 konnte eine umfassende und integrierte Ablaufsequenz entworfen werden.

2.1.6 AP 7: Probabilistisches Design

Um den Anforderungen der Offshore-Windenergie gerecht zu werden, sollen aus den bisher erzielten Ergebnissen Datenprodukte entwickelt und der gesamte Workflow exemplarisch durchgeführt werden. Als letzter Schritt sollte unter der Leitung von GUD GEOTECHNIK UND DYNAMIK CONSULT GMBH eine Methodik zur Ermittlung der Designpfahlänge auf Basis räumlich korrelierter probabilistischer Standortprofile in Bezug auf ein Grenzwertkriterium für ein definiertes Sicherheitsniveau entwickelt werden.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind durch die angefallenen Personalkosten entstanden: Im Projekt waren hauptsächlich drei wissenschaftliche Mitarbeiter an der Projektarbeit beteiligt, die hauptsächlich die Datenverarbeitung und -interpretation, die Korrelation von Ground Truth und die Datenintegration umfasste. Z.T. wurde Software zur Bearbeitung beschafft; der Fokus lag allerdings auf Eigenentwicklungen

Reisekosten entstanden vor allem durch die Zusammenarbeit mit GUD GEOTECHNIK UND DYNAMIK CONSULT GmbH, FRAUNHOFER ITWM und RWE.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Zur Erreichung der Projektziele

1. Weiterentwicklung und Erweiterung seismischer Akquisition- und Processing-Methoden mit Blick auf seismische Inversion.
2. Integration und Kalibrierung geotechnischer Daten.
3. Inversion seismischer Daten
4. Entwicklung eines integrierten, geostatistischen Gesamtmodells des Untergrundes im Offshore-Planungsgebiet, mit der Möglichkeit synthetische Bemessungsprofile zu erzeugen.
5. Anwendung stochastischer Verfahren bei der Gründungsauslegung unter Berücksichtigung der Streuungseigenschaften, der aus dem räumlichen Untergrundmodell prognostizierten Bemessungsmodelle.

waren die in Kap. 2.1 erläuterten Arbeiten nötig. Das umfasste:

- Definition der Randbedingungen für ideale seismische Datenakquise mit dem Ziel beste Voraussetzungen für seismische Inversion zu schaffen
- Entwicklung und Anwendung eines Workflows für amplitudengesteuertes Processing (Daten-Verarbeitung).
- Entwicklung und Anwendung von Q-Tomografie
- Entwicklung und Anwendung eines Workflows für die Integration von Ground-Truth-Daten (hauptsächlich geotechnische CPT- und Bohrkerndaten, aber auch geophysikalische Bohrlochmessungen).
- Entwicklung und Anwendung von Inversionssoftware, die für seismische Flachwasserdaten, wie sie für Offshore-Wind typisch sind, anwendbar ist.
- Integration seismischer und Ground-Truth-Daten in ein integriertes Baugrundmodell.

Die Arbeit mit den Daten aus dem KASKASI-Windparkplanungsgebiet (seismische und Ground-Truth-Daten) war notwendig, um die Bedingungen für eine Quantifizierung physikalischer Eigenschaften bei Verwendung seismischer Ausgangs-Daten zu verstehen.

Die Arbeiten zur Adaption der Processing-Schritte (Kap. 2.1.2) waren notwendig, um die wahren Amplitudenwerte aus den seismischen Daten und ihren Informationsgehalt zu erhalten bzw. wiederherzustellen, damit diese in der nachfolgenden Amplitudeninterpretation oder v.a -inversion verwandt werden können. Der Erhalt der Amplitudenwerte war für die Processing-Schritte (Kap. 2.1.2.1) und die Arbeitsschritte in der Migration (Kap. 2.1.2.2) zu sichern. Die Entwicklung eines räumlich variierenden Q-Wert-Modells (Q-Tomographie in Kap. 2.1.2.3), das die Dämpfungseigenschaften des Untergrundes beschreibt, sollte es hingegen ermöglichen, die Dämpfung der Amplituden aufgrund von Anelastizität und Mehrfachstreuung zu kompensieren, um die Migrationsergebnisse bei der nachfolgenden Amplitudeninterpretation oder -inversion verwenden zu können.

Durch die Arbeit mit CPT-Daten und die Integration von Bohrkernen wurden Verständnis und Fähigkeiten geschaffen, die zur Entwicklung eines integrierten 3D-Baugrund-Modells führten.

Der entwickelte Inversionsalgorithmus ermöglichte die räumliche Quantifizierung der physikalischen Eigenschaften entlang von zweidimensionalen seismischen Linien, was eine Anwendung unter in unterschiedlichen Phasen der Offshore Windparkplanung und -entwicklung ermöglicht.

Die Untersuchung der geostatistischen Methoden nahm breiten Raum ein und war zur Bestimmung der für CPT-Interpolation adäquaten Verfahren nötig. Die Interpretation und geostatistische Analyse der gewonnenen Daten war nötig, um zum eingangs definierten Projektziel, der direkten Verwendung von CPT-Daten zu integrierten Baugrundmodellen zu gelangen.

Die Integration der seismischen Interpretation, der Ground-Truth-Interpretation und der durch Inversion berechneten physikalischen Eigenschaften ermöglichte die Entwicklung eines zuverlässigen, belastbaren integrierten Baugrundmodells.

Angemessen waren die Arbeit deshalb, weil die Ziele ohne den angeführten Aufwand kaum zu erreichen gewesen wären. Die Arbeit mit den im Kaskasi-Windparkplanungsgebiet erhobenen Daten wurde von den Forschungspartnern als am besten praktikabel, etwa gegenüber der Auswertung anderer Projekte, eingeschätzt.

Damit kann konstatiert werden, dass die geleisteten Arbeiten zur Erreichung des Gesamtprojekterfolges notwendig und angemessen waren. Die Aufgaben wurden gewissenhaft und unter effizienter und wirtschaftlicher Verwendung der zur Verfügung stehenden Mittel erledigt.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Projekt SYNCORE wurde im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ durchgeführt. In diesem Kontext leistet dieses Projekt einen wichtigen Beitrag zur Beschleunigung des Ausbaus der Windenergie auf See und zur Kostensenkung in der Erkundungsphase von Offshore-Windparkprojekte. Die im Projekt eingesetzten Technologien, die Datenverarbeitungsschritte, die Integration der Ground-Truth-Informationen und vor allem die Integration zwischen seismischen und Ground-Truth-Daten sind Bestandteile Baugrunderkundung von Offshore-Windparks, halten als innovative Ansätze aber erst nach und nach Einzug in die Planungs- und Entwicklungspraxis.

Die wichtigsten Ergebnisse des Forschungsprojekts waren die

- Entwicklung eines Inversionstools zur
- Entwicklung geostatistischer und ML Methoden unter Verwendung seismischer Attribute zur Erstellung integrierter Baugrundmodelle.

Die Ergebnisse dieses Projektes werden veröffentlicht und stehen damit der Offshore-Windenergiebranche als Informationsquelle und Entscheidungshilfe frei zur Verfügung.

Die Entwicklung des Processing- Workflows diente hauptsächlich der Bewahrung von quantitativen Amplitudeninformationen in Processing und Daten-Migration (GRT) zur Anwendung von Q-Tomografie (Kap. 2.1.2) und der Eröffnung und Entwicklung der Inversionsanwendungen in AP 4.

Das entwickelte Inversionstool wird in workflows zur Erstellung von 3D-Baugrundmodellen eingesetzt werden. Werden 2D-Linien invertiert, können Ergebnisse mit Hilfe geostatistischer Methoden in die dritte Raumrichtung extrudiert werden.

Außerdem können die Ergebnisse der Inversion dazu benutzt werden, um geophysikalische Datensätze auf Plausibilität gegenüber geotechnischen Erkundungen abzugleichen. Dadurch wird die Zuverlässigkeit und Belastbarkeit von Integrierten Baugrundmodellen (IGM) erhöht.

Wie bereits erwähnt, werden geostatistische Methoden zur Erstellung und Weiterentwicklung von Baugrundmodellen eingesetzt. Die Zuverlässigkeit dieser Methoden wird durch die Einbeziehung von seismischen Attributen und Inversionsresultaten erhöht. Dadurch wird die mittelbare Anwendung von

Inversionsergebnissen und seismischen Attributen gewährleistet. Weiterentwickelt wird die Methodik in Richtung probabilistischer Modellierung.

Durch die Entwicklung und Anwendung können geotechnische Parameter direkt und mittelbar aus seismischen Daten erzeugt werden: Profilweise, sowie in 2D- und in 3D-Umgebungen. Wie bereits erwähnt, werden die Ergebnisse zunächst im Rahmen der Baugrundmodellierung angewandt und weiter verwendet. Das verbessert und veredelt Integrierte Baugrundmodelle (IGM) signifikant..

Integrierte Baugrundmodelle (IGM) stellen Produkte dar, die explizit und einzeln, oder im Zusammenhang mit anderen Produkten und Anwendungen, am Offshore-Windmarkt nachgefragt werden. Eine Anwendung von Inversionstool und Geostatistischen Methoden in IGM sichert eine unmittelbare Verwertung ab. Gleichzeitig stellen Inversion und ML innovative „Anreicherungen“ von IGM dar, wodurch die Attraktivität der IWES-Lösung von IGM gesteigert wird.

Eine Folgeprodukt von IGM sind synthetische geotechnische Parameter, und treffen damit den Projektziel des abgeschlossenen Forschungsvorhabens. Eine Anwendung synthetisch erzeugter Parameter/ Ergebnisse aus dem IGM wird in der Planung und Entwicklung von Windparklayouts und im technischen Design der Gründungskonstruktionen von OWEA gesehen – Eine Aufgabe, die im Projekt durch die Partnerschaft mit GUD GEOTECHNIK UND DYNAMIK CONSULT GMBH und die Arbeiten in AP 8 adressiert und integriert wurde.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass erhebliches Interesse am Markt besteht, die Planungsflexibilität innerhalb der verschiedenen Projektphasen zu erhöhen. Werden Informationen aus geologischen und geotechnischen Untersuchungen in einen räumlichen Zusammenhang gestellt und durch die Entwicklung von synthetischen Baugrundprofilen abgeschlossen, kann auf Layout-Änderungen in späten Planungsphasen reagiert werden, ohne aufwändige geotechnische Nacherkundungen durchzuführen. FRAUNHOFER IWES hat bereits vor einigen Jahren begonnen, Forschungsergebnisse aus SEISMIK NORDOST (3D-Seismik) und VIBRO-CPTU (synthetische CPT) zu einem Produkt zu integrieren, um diese Methoden zukünftig kombiniert dem Markt zur Verfügung zu stellen. Die Projekte sind auch aus dieser Sicht ein voller Erfolg für die Projektpartner

Die Integration geophysikalischer und geotechnischer Parameter in einem vollintegrierten Baugrundmodell soll auch weiterhin erforscht und verbessert werden. Hierzu wurde das Projekt PROPPERMODEL beantragt, in dem die Abschätzung der Unsicherheiten in den synthetischen Baugrunddaten im Mittelpunkt steht, und wofür die Arbeiten in SYNCORE wertvolle Vorarbeiten darstellen.

2.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

International gibt es einige Forschungsprojekte bzw. Forschungsinstitutionen, die sich mit der hier untersuchten Thematik der Nutzung von seismischer Inversion für die Baugrunduntersuchung für Offshore-Windparks befassen. Relevant sind in diesem Zusammenhang die Forschungen zu Flachwasseranwendungen von SAND Geophysics (GB), dem National Oceanography Centre Southampton (NOCS) (GB), dem Norwegischen Geotechnischen Institut (NGI) und DELFT INVERSION.

SAND hat nach einer Reihe von erfolgreichen Versuchsprojekten ein Verarbeitungssystem entwickelt, das die quantitative Charakterisierung der marinen oberflächennahen Schichten mit geophysikalischen Daten unter Verwendung einer Vielzahl von seismischen Quellen ermöglicht. Diese Verfahren werden in kommerziellem Umfeld proprietär angewendet.

Am Graduate School of the National Oceanography Centre Southampton wurde in Forschungsprojekten, wie 'Inversion of very-high-resolution reflection data to quantify sediment properties', an Methoden zur seismischen Inversion für hochaufgelöste Seismik gearbeitet. Hauptziele waren die Untersuchung der Anwendung akustischer Inversion auf seismische Daten mit sehr hoher Auflösung (Sparker,

Boomer & Chirp) und Verwendung dieser Inversionstechniken für die schnelle, hochauflösende räumliche Kartierung von Bodeneigenschaften.

Das Norwegische Geotechnischen Institut (NGI) führte und führt Forschungsaktivitäten im Themenfeld seismischer Inversion aus, insbesondere zur Analyse von seismischen Informationen zur Festlegung von geotechnischen Eingangsparametern für geomechanische Modelle.

Die im vorliegenden Projekt erzielten Fortschritte decken die Anforderungen an die Baugrundmodellierung für verschiedene Sektoren in Europa ab und können auf andere Standorte weltweit ausgeweitet werden.

2.6 Geplante und erfolgte Veröffentlichungen der Projektergebnisse

Folgende Veröffentlichungen, Vorträge und Berichte wurden unmittelbar aus den Projektergebnissen geschöpft:

Römer-Stange, N., & Spieß, V. (2022). Requirements and Boundary Conditions for Near Surface Seismic Inversion. Presented at the Second EAGE Conference on Seismic Inversion. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202229012>

Römer-Stange, N., Oguro, A. W., Córdova, C. R., & Spieß, V. (2022). Improving Subsurface Investigations with Acoustic Impedance Inversion: Concept and Example from the German North Sea. Presented at the EAGE GET 2022 Conference. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202221057>

Römer-Stange, N., Keil, H., Ogunleye, O., Merl, M., Oguro, A., Ramos Córdova, C., et al. (2023). From Interface to Layer Characterization in the Near Surface by Stochastic Seismic Inversion. Presented at the DGG 2023 Annual Meeting, Bremen, Germany. Retrieved from <https://events.dgg2023.smart-abstract.com/#/event/44645>

Ogunleye, O., Römer-Stange, N., Spieß, V., Keil, H., Morales, N., Pein, T., et al. (2023). Statistical Boundary Conditions of Subsoil Physical Properties in the Arkona Basin – Delineating Interface-Related and Layer-Based Seismic Attributes for Predicting Near-Surface Geotechnical Parameters. Presented at the AGU 2023 Annual Meeting. San Francisco, CA, USA. Retrieved from <https://agu.confex.com/agu/fm23/meetingapp.cgi/Paper/1336585>

Römer-Stange, N., Spieß, V., Ogunleye, O., Keil, H., Merl, M., Ettrich, N., et al. (2023). Advanced Subsurface Characterization and De-Risking of Offshore Infrastructure Installations or Drillings with High Resolution Marine Seismic Methods. Presented at the AGU 2023 Annual Meeting. San Francisco, CA, USA. Retrieved from <https://agu.confex.com/agu/fm23/meetingapp.cgi/Paper/1255168>

Siemann, L. S., Masoudi, P. M., Maraka, R. M., Opris, R. O., Pande, Y. P., Römer-Stange, N. R.-S., et al. (2024). Comparison of Different Prediction Methods to Derive Synthetic CPT Profiles - An Offshore Wind Farm Case Study from the German North Sea. 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Data-driven site characterization. <https://doi.org/10.23967/isc.2024.233>

Darüber hinaus haben die beiden als Doktoranden im Projekt an der UNIVERSITÄT BREMEN beschäftigten Wissenschaftler im Frühjahr 2024 ihre Promotionen erfolgreich verteidigt. Die Dissertationen sind bei der Staats- und Universitätsbibliothek eingereicht und tragen die Titel

Ogunleye, O. (2024). Seismic Stratigraphy and Structural Analysis of Shallow Seabed in the Southern Arkona Basin, Baltic Sea – Delineating Seismic Attributes for Resolving Geological Complexity and Predicting Geotechnical Parameters (Dissertation). University of Bremen, Bremen, Germany.

Römer-Stange, N. (2024). Near Surface Seismic Inversion: Quantitative Interpretation of the Physical Properties of Unconsolidated Sediments (Dissertation). University of Bremen, Bremen, Germany.

Da es sich bei diesen Dissertationen um kumulativen Charakter handelt, ist die Veröffentlichung folgender Manuskripte geplant:

Ogunleye, O., Keil, H., Spieß, V. (in prep.). Seismic Stratigraphy and Structural Analysis of Shallow Seabed in the Southern Arkona Basin.

Ogunleye, O., Morales, N., Pein, T., Spieß, V. (in prep.). Statistical Boundary Conditions of Subsoil Physical Properties in the Arkona Basin – Delineating Potential Seismic Attributes for Predicting Near-Surface Geotechnical Parameters

Ogunleye, O., Römer-Stange, N., Sauvin, G., Vanneste, M., Spieß, V. (in prep). Post-Stack Acoustic Impedance as a Reliable Indicator of Variation in Lithologic and geotechnical Properties in the Southern Arkona Basin – Assessment of two Near-Surface Impedance Inversion Approaches Using Stationary Wavelets

Römer-Stange, N., Keil, H., Wenau, S., Merl, M., Oguro, A., Ramos Córdova, C., Spieß, V. (in review). Data Acquisition Requirements and Limitations for Near Surface Reflection Seismic Inversion

Römer-Stange, N., Morales, N., Keil, H., Ettrich, N., Wilhelm, S., Wenau, S., Oguro, A., Merl, M., Ramos Córdova, C., Siemann, L., Pein, T., Arnold, P., Spieß, V. (in prep.). From Interface to Unit Characterisation: Stochastic Near Surface Seismic Impedance Inversion in the German North Sea

Römer-Stange, N., Morales, N., Ettrich, N., Keil, H., Spieß, V. (in prep.). Pre-Stack Inversion on Near Surface Reflection Seismic Data

2.7 Literatur

Aki, K., Christoffersson, A., & Husebye, E. S. (1977). Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, 82(2), 277–296. <https://doi.org/10.1029/JB082i002p00277>

Amaechi, C. V., Reda, A., Butler, H. O., Ja'e, I. A., & An, C. (2022). Review on Fixed and Floating Offshore Structures. Part I: Types of Platforms with Some Applications. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(8), 1074. <https://doi.org/10.3390/jmse10081074>

Armstrong, K. (2015). Chapter 13 - Emerging Industrial Applications. In P. Styring, E. A. Quadrelli, & K. Armstrong (Eds.), *Carbon Dioxide Utilisation* (pp. 237–251). Amsterdam: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62746-9.00013-X>

Ben-Menahem, A. (1995). A concise history of mainstream seismology: Origins, legacy, and perspectives. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(4), 1202–1225. <https://doi.org/10.1785/BSSA0850041202>

Bishop, T. N., Bube, K. P., Cutler, R. T., Langan, R. T., Love, P. L., Resnick, J. R., et al. (1985). Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media. *GEOPHYSICS*, 50(6), 903–923. <https://doi.org/10.1190/1.1441970>

BMWi. Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, BAnz AT 30.12.2014 B1 § (2014). Retrieved from https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/bekanntmachung-forschungsfoerderung-im-6-en-ergieforschungsprogramm.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Boehm, G., Carcione, J. M., & Vesnaver, A. (1996). Reflection tomography versus stacking velocity analysis. *Journal of Applied Geophysics*, 35(1), 1–13. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(95\)00025-9](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)00025-9)

Bohlen, T. (2002). Parallel 3-D viscoelastic finite difference seismic modelling. *Computers & Geosciences*, 28(8), 887–899. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00006-7](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00006-7)

Breiman, L. 2001. "Random Forests". *Machine Learning* 45 (1): pp. 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

BSH. (2023). *Flächenentwicklungsplan 2023 für die deutsche Nordsee und Ostsee* (No. 7608) (p. 133). Hamburg and Rostock, Germany: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. Retrieved from <https://www.bsh.de>

BVG, A. (2019). *Guide to an offshore wind farm* (p. 128). Swindon, UK: The Crown Estate, CATAPULT Offshore Renewable Energy. Retrieved from <https://guidetoanoffshorewindfarm.com>

Caixeta, R. M. and Costa, J. F. C. L. 2021. "A robust unfolding approach for 3-D domains". *Computers & Geosciences* 155, 104844.

Chautru, J., Binet, H., Masoudi, P., Geffroy, F. and Renard, D. 2021. "Modeling Complex Tectonic Structures in any Kind of Grid without Space Deformation". In: 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition 2021 (1), pp. 1-5. European Association of Geoscientists & Engineers.

Chilès, J. P. and Delfiner, P. 2012. "Geostatistics: modeling spatial uncertainty" (Vol. 713). John Wiley & Sons.

Chopra, S., & Castagna, J. P. (2014). *AVO*. (M. N. Nabighian, Ed.). Tulsa, Okla: Society of Exploration Geophysics. Retrieved from <https://doi.org/10.1190/1.9781560803201>

Chopra, S., & Marfurt, K. J. (2007). *Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization*. Society of Exploration Geophysicists and European Association of Geoscientists and Engineers. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801900>

- Clementi, M., Boiero, D., Leone, C., & Masnaghetti, L. (2022). Towards Holistic Characterization of the Near Seabed for Renewable Energy Installations in Shallow Marine Environments (Vol. 2022, pp. 1–5). Presented at the EAGE GET 2022, European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202221112>
- Connolly, P. (1999). Elastic impedance. *The Leading Edge*, 18(4), 438–452. <https://doi.org/10.1190/1.1438307>
- Cooke, D. A., & Schneider, W. A. (1983). Generalized linear inversion of reflection seismic data. *GEOPHYSICS*, 48(6), 665–676. <https://doi.org/10.1190/1.1441497>
- Downton, J. E., Pickford, S., & Lines, L. R. (2001). Constrained three parameter AVO inversion and uncertainty analysis. In *SEG International Exposition and Annual Meeting* (p. SEG-2001). SEG. Retrieved from <https://onepetro.org/SEGAM/proceedings-abstract/SEG01/All-SEG01/89192>
- Espin, I., Salaun, N., & Jiang, H. (2022). From Conventional Acquisition to UHR Image Using FWI in the Barents Sea (Vol. 2022, pp. 1–5). Presented at the EAGE GET 2022, European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202221035>
- Fawad, M., Hansen, J. A., & Mondol, N. H. (2020). Seismic-fluid detection—a review. *Earth-Science Reviews*, 210, 103347. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103347>
- Ferguson, R. J., & Margrave, G. F. (1996). *A simple algorithm for band-limited impedance inversion* (CREWES Research Report No. 8) (p. 10).
- Fogg, A. (2019). Seismic Inversion for Near Surface Applications and the Derivation of Geomechanical Properties (Vol. 2019, pp. 1–4). Presented at the 81st EAGE Conference and Exhibition 2019 Workshop Programme, European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201901921>
- Forsberg, C. F., Sauvin, G., Klinkvort, R. T., Vardy, M. E., Vanneste, M., & Kort, A. (2022). *Integrated Ground Model Report* (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, Rijksdienst voor Ondernemend Nederland No. 20190798- 04- R) (p. 964). Oslo, Norway: Norwegian Geotechnical Institute.
- FUGRO. (2020). *Synthetic CPT Profiles Hollandse Kust (west) Wind Farm Zone Dutch Sector, North Sea* (Geotechnical Report No. WOZ2190152) (p. 104). Utrecht, Netherlands: Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. Retrieved from <https://offsho-rewind.rvo.nl/generalv>
- Henson, H., & Sexton, J. L. (1991). Preliminary study of shallow coal seams using high-resolution seismic reflection methods. *GEOPHYSICS*, 56(9), 1494–1503. <https://doi.org/10.1190/1.1443171>
- Knott, C. G. (1899). III. Reflexion and refraction of elastic waves, with seismological applications. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 48(290), 64–97. <https://doi.org/10.1080/14786449908621305>
- Köhn, D. (2011). *Time Domain 2D Elastic Full Waveform Tomography* (PhD Thesis). Kiel University, Kiel (Germany). Retrieved from https://macau.uni-kiel.de/receive/diss_mods_00006786
- Lailly, P. (1984). The seismic inverse problem as a sequence of before stack migrations. In J. B. Bednar, E. Robinson, & A. B. Weglein (Eds.), *Inverse Scattering. Theory and Application (SIAM)* (pp. 206–220). Philadelphia.
- Lesny, K., Atzler, R., Bartholomä, A., Bellmer, H., Geduhn, M., Gehrmann-Vorbau, J., et al. (2014). *Standard Ground Investigations - Minimum requirements for geotechnical surveys and investigations into offshore wind energy structures, offshore stations and power cables* (Standard No. BSH-No 7004) (p. 41). Hamburg and Rostock, Germany: Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH). Retrieved from https://www.bsh.de/DE/PUBLIKATIONEN/Anlagen/Downloads/Offshore/Standards/Standard-Ground-investigation-for-offshore-wind-energy_en.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- Lindseth, R. O. (1972). Approximation of acoustic logs from seismic traces. *Canadian Well Logging Society*, 5, 13–26.
- Lindseth, R. O. (1979). Synthetic sonic logs—a process for stratigraphic interpretation. *GEOPHYSICS*, 44(1), 3–26. <https://doi.org/10.1190/1.1440922>
- Ma, X. (2002). Simultaneous inversion of prestack seismic data for rock properties using simulated annealing. *GEOPHYSICS*, 67(6), 1877–1885. <https://doi.org/10.1190/1.1527087>
- Ma, Y., Loures, L., & Margrave, G. F. (2004). *Seismic modelling with the reflectivity method* (p. 7).
- Mankins, J. (1995). *Technology Readiness Levels-A White Paper* (White Paper). Washington, D.C.: NASA. Retrieved from <https://www.semanticscholar.org/paper/Technology-Readiness-Levels-A-White-Paper-Mankins/3072b8cfd9bec59c53e212c8876ef1d087489d9>

- Masoudi, P., Binet, H., Simon, C., Pelletier, B., Rambert, F., and Assy, Y. 2023. "Improving Seismic Velocity Mapping Using Standard Penetration Test Data in a Cokriging Interpolation". In: NSG2023 29th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics 2023 (1), pp. 1-5. European Association of Geoscientists & Engineers.
- Minnitt, R. and Deutsch, C. V. 2014. "Cokriging for optimal mineral resource estimates in mining operations". Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy 114 (3), pp. 189-189.
- Nikitas, G., Bhattacharya, S., & Vimalan, N. (2020). 16 - Wind Energy. In T. M. Letcher (Ed.), *Future Energy (Third Edition)* (pp. 331–355). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00016-5>
- Ogunleye, O. (2023, December). *Seismic Stratigraphy and Structural Analysis of Shallow Seabed in the Southern Arkona Basin, Baltic Sea – Delineating Seismic Attributes for Resolving Geological Complexity and Predicting Geotechnical Parameters* (Dissertation). University of Bremen, Bremen, Germany.
- Ogunleye, O., Römer-Stange, N., Spieß, V., Keil, H., Morales, N., Pein, T., et al. (2023). Statistical Boundary Conditions of Subsoil Physical Properties in the Arkona Basin – Delineating Interface-Related and Layer-Based Literatur | Spieß, Römer-Stange, Ogunleye
- Oldenburg, D. W., Scheuer, T., & Levy, S. (1983). Recovery of the acoustic impedance from reflection seismograms. *GEO-PHYSICS*, 48(10), 1318–1337. <https://doi.org/10.1190/1.1441413>
- Owen, A. (2020). 17 - Tidal Current Energy: Origins and Challenges. In T. M. Letcher (Ed.), *Future Energy (Third Edition)* (pp. 357–374). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00017-7>
- Pein, T., Werpup Oguro, A., Keil, H., Spieß, V., Preu, B., Herwig, V., & Wenau, S. (2020). Interpolation of CPT Data Supported by 3D Seismic Data for Offshore Soil Characterization. In NSG2020 4th Applied Shallow Marine Geophysics Conference (pp. 1–5). .: European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202020155>
- PWEA. (2022). Offshore wind vessel availability until 2030: Baltic Sea and Polish perspective. Warsaw, Poland: Polish Wind Energy Association, H-BLIX Sp.z o.o. Retrieved from <https://windeurope.org>
- Richards, A. F., Palmer, H. D., & Perlow, M. (1975). Review of continental shelf marine geotechnics: Distribution of soils, measurement of properties, and environmental hazards. *Marine Geotechnology*, 1(1), 33–67. <https://doi.org/10.1080/10641197509388151>
- Robertson, P. K. (2016). Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system — an update. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12), 1910–1927. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0044>
- Römer-Stange, N. (2023, October). *Near Surface Seismic Inversion: Quantitative Interpretation of the Physical Properties of Unconsolidated Sediments* (Dissertation). University of Bremen, Bremen, Germany.
- Römer-Stange, N., Spieß, V., Ogunleye, O., Keil, H., Merl, M., Ettrich, N., et al. (2023). Advanced Subsurface Characterization and De-Risking of Offshore Infrastructure Installations or Drillings with High Resolution Marine Seismic Methods. In AGU 2023. San Francisco, CA, USA. Retrieved from <https://agu.confex.com/agu/fm23/meetingapp.cgi/Paper/1255168>
- Römer-Stange, N., Wenau, S., Bihler, V., Keil, H., Córdova, C. A. R., & Spiess, V. (2022). Boulder Detection in the Shallow Sub-Sea-floor by Diffraction Imaging With Beamforming on Ultra-High Resolution Seismic Data—A Feasibility Study. *Earth and Space Science*, 9(6). <https://doi.org/10.1029/2021ea002156>
- Russell, B. H. (2014). Prestack seismic amplitude analysis: An integrated overview. *Interpretation*, 2(2), SC19–SC36. <https://doi.org/10.1190/INT-2013-0122.1>
- Sauvin, G., Vanneste, M., & Madshus, C. (2018). High-Resolution Quantitative Ground-Model for Shallow Subsurface. Presented at the 3rd Applied Shallow Marine Geophysics Conference, Porto, Portugal. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802659>
- Sauvin, G., Vanneste, M., Vardy, M. E., Klinkvort, R. T., & Carl Fredrik, F. (2019). Machine Learning and Quantitative Ground Models for Improving Offshore Wind Site Characterization. Presented at the Offshore Technology Conference, Offshore Technology Conference. <https://doi.org/10.4043/29351-MS>
- Seismic Attributes for Predicting Near-Surface Geotechnical Parameters. In AGU 2023. San Francisco, CA, USA. Retrieved from <https://agu.confex.com/agu/fm23/meetingapp.cgi/Paper/1336585>
- Shoukat, G., Michel, G., Coughlan, M., Malekjafarian, A., Thusyanthan, I., Desmond, C. and Pakrashi, V. 2023. "Generation of Synthetic CPTs with Access to Limited Geotechnical Data for Offshore Sites". *Energies* 16. <https://doi.org/10.3390/en16093817>

- Siemann, L. S., Masoudi, P. M., Maraka, R. M., Opris, R. O., Pande, Y. P., Römer-Stange, N., et al. (2024). Comparison of Different Prediction Methods to Derive Synthetic CPT Profiles - An Offshore Wind Farm Case Study from the German North Sea. 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Data-driven site characterization. <https://doi.org/10.23967/sc.2024.233>
- Simm, R., & Bacon, M. (2014). *Seismic Amplitude: An Interpreter's Handbook*. Cambridge University Press.
- Tarantola, A. (1986). A strategy for nonlinear elastic inversion of seismic reflection data. *Geophysics*, 51(10), 1893–1903. <https://doi.org/10.1190/1.1442046>
- Vanneste, M., Forsberg, C. F., Knudsen, S., Kvalstad, T. J., L'Heureux, J. S., Lunne, T., et al. (2015). Integration of very-high-resolution seismic and CPTU data from a coastal area affected by shallow landsliding - The finneidfjord natural laboratory. In *Frontiers in Offshore Geotechnics III - 3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, ISFOG 2015* (pp. 1017–1022). CRC Press/Balkema. Retrieved from <https://pennstate.pure.elsevier.com/en/publications/integration-of-very-high-resolution-seismic-and-cptu-data-from-a->
- Vanneste, M., Sauvin, G., Dujardin, J. R., Forsberg, C. F., Klinkvort, R. T., Forsberg, C. S. and Hansen, R. C. 2022. "Data-Driven Ground Models: The Road to Fully-Integrated Site Characterization and Design". In: *Proceedings of the 2nd Vietnam Symposium on Advances in Offshore Engineering*. Springer Singapore, Singapore, pp. 3-21.
- Vardy, M. E. (2015). Deriving shallow-water sediment properties using post-stack acoustic impedance inversion. *Near Surface Geophysics*, 13(2), 143–154. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2014045>
- Vardy, M. E. (2020, May 26). Marine Site Investigation and Reducing Risk - The evolving role of seismic reflection data within offshore site investigation. *GEO ExPro*, 17(2). Retrieved from <http://www.geoexpro.com/articles/2020/05/marine-site-investigation-and-reducing-risk>
- Vardy, M. E., Clare, M. A., Vanneste, M., Forsberg, C. F., & Dix, J. K. (2018). Seismic Inversion for Site Characterization: When, Where and Why Should We Use It? Presented at the Offshore Technology Conference, Offshore Technology Conference. <https://doi.org/10.4043/28730-MS>
- Vardy, M. E., L'Heureux, J.-E., Vanneste, M., Longva, O., Steiner, A., Forsberg, C. F., et al. (2012). Multidisciplinary investigation of a shallow near-shore landslide, Finneidfjord, Norway. *Near Surface Geophysics*, 10(4), 267–277. <https://doi.org/10.3997/1873-2012022>
- Vardy, M. E., Vanneste, M., Henstock, T. J., Clare, M. A., Forsberg, C. F., & Provenzano, G. (2017). State-of-the-art remote characterization of shallow marine sediments: the road to a fully integrated solution. *Near Surface Geophysics*, 15(4), 387–402. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2017024>
- Veeken, P. C. H., & Silva, M. D. (2004). Seismic Inversion Methods and some of their constraints. *First Break*, 22(6). <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2004011>
- Virieux, J., & Operto, S. (2009). An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics. *GEOPHYSICS*, 74(6), WCC1–WCC26. <https://doi.org/10.1190/1.3238367>
- Wackernagel, H. 2003. "Multivariate geostatistics: an introduction with applications". Springer Science & Business Media.
- Whitcombe, D. N., Connolly, P. A., Reagan, R. L., & Redshaw, T. C. (2002). Extended elastic impedance for fluid and lithology prediction. *GEOPHYSICS*, 67(1), 63–67. <https://doi.org/10.1190/1.1451337>
- WindGuard. (2024). Status des Offshore-Windenergieausbaus in Deutschland (No. Jahr 2023) (p. 12). Varel, Deutschland: Deutsche WindGuard GmbH. Retrieved from <https://www.windguard.de>
- Woodward, M. J., Nichols, D., Zdraveva, O., Whitfield, P., & Johns, T. (2008). A decade of tomography. *GEOPHYSICS*, 73(5), VE5–VE11. <https://doi.org/10.1190/1.2969907>
- Zoeppritz, K. (1919). VII b. Über Reflexion und Durchgang seismischer Wellen durch Unstetigkeitsflächen. *Nachrichten von Der Gesellschaft Der Wissenschaften Zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1919, 66–84.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel SynCore – Ableitung virtueller geotechnischer Baugrunddaten aus Seismischer Inversion und Geostatistischer Datenintegration	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Aisgo Werpup Oguro, Lennart Siemann, Jan Hebig	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2023
	6. Veröffentlichungsdatum 27.09.2024
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Fraunhofer IWES, Am Fallturm 1 28359 Bremen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03EE3020A
	11. Seitenzahl 50
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen 28
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
<p>18. Kurzfassung</p> <p>Die Forschungsaktivitäten in diesem Projekt waren der Entwicklung und Anwendung von Verfahren seismischer Inversion in der Baugrundmodellierung von Offshore-Windparks gewidmet. Die frühzeitige und zuverlässige Ableitung geotechnischer Parameter trägt zur verbesserten Standortcharakterisierung in frühen Planungsphasen bei, und erschließt Anwendungen in der Bemessung von Gründungskonstruktionen für Offshore-Windenergie-Anlagen.</p> <p>Die Forschungspartner stellen sich der Herausforderung, die quantitative Interpretation seismischer Attribute, die zur Ableitung mechanischer Baugrundparameter geeignet ist, für Offshore Wind Power nutzbar zu machen. Methoden der traditionellen seismische Inversion (Tomografische Methoden und Amplitude versus Offset-Ansätze) kamen hierzu ebenso zum Einsatz wie Methoden, die unter dem Begriff der Multi-Attribut-Analyse zusammengefasst werden. So konnte ein 3D-Bodenmodell entwickelt werden, welches auf seismischen Daten basiert und bereits mechanisch-elastische Parameter beinhaltet und folgende Vorteile bietet:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vollintegriertes 3D-Boden-Modell des Windparks mit elastischen Eigenschaften (im Bereich kleiner Dehnungen). • Erzeugung von Bemessungsprofilen an jedem möglichen Standort. Dadurch ergeben sich eine: • Erhöhte Flexibilität für das Windpark-Design über den gesamten Planungszeitraum. • Kostengünstige Standortbewertung als Ergebnis von weniger Untersuchungen und kürzeren Durchlaufzeiten. 	

19. Schlagwörter

Inversion, seismische Attribute, Q-Tomografie, synthetische Seismogramme, geostatistische Simulation, Untergrundmodell

20. Verlag

21. Preis