

**NEUE NUMERISCHE METHODEN ZUR BEARBEITUNG UND
3D-INTERPRETATION VON GEODATEN UND -MODELLEN IN
INTERDISZIPLINÄRER FORSCHUNG**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Diplom-Geoinformatiker Peter Menzel

Kiel, 2016

Erster Gutacher: Prof. H.-J. Götze

Zweiter Gutacher: Prof. W. Rabbel

Tag der mündlichen Prüfung: 12. September 2016

Zum Druck genehmigt:

Neue numerische Methoden zur Bearbeitung und 3D-Interpretation von Geodaten und -modellen in interdisziplinärer Forschung

Peter Menzel

eingereicht am 28.06.2016

Zusammenfassung

Anhand allgemeiner und spezifischer Aufgaben und Fragen, die sich aus der Mitarbeit in den beiden Forschungsprojekten AIDA und TiPOT3D ergaben, wird in dieser Arbeit gezeigt, wie Ansätze und Verfahren aus der Geoinformatik die Prozessierung und die Interpretation der Geophysik und hier speziell der Potentialverfahren unterstützen können.

Zuerst wird gezeigt, wie die Kommunikation und Interaktion in interdisziplinären Forschungsprojekten durch Arbeiten mit Schwerpunkt Geoinformatik unterstützt werden kann. Dies erfolgt exemplarisch am BMBF-Verbundprojekt "AIDA - From Airborne Data Inversion to In-Depth Analysis". Für die interne Projektkommunikation und Interaktion wird das "AIDA-Projekt-Wiki" vorgestellt. Es soll einerseits die Kommunikation innerhalb des Projekts unterstützen und gleichzeitig eine online-basierte Plattform zum Austausch und der Archivierung projektbezogener Daten ermöglichen. Das "AIDA-Projekt-Wiki" koordiniert und archiviert die Projektkommunikation und vereinfacht die planerische Organisation von Projekttreffen, Publikationen und Tagungsteilnahmen. Zusätzlich wurden Schnittstellen für den Austausch der verschiedenen Projektdaten zwischen den Projektteilnehmern bereitgestellt. Anhand zweier Anwendungen wird gezeigt, wie Modellinformationen zwischen verschiedenen Modellrepräsentation konvertiert werden.

Die Evaluierung geologischer 3D Untergrundmodelle mittels Dichte-Modellierungen war eines der Hauptanliegen im BMBF-Verbundprojekt. In AIDA wurde von den Projektpartnern für ein Untersuchungsgebiet in Norddeutschland ein solches 3D Untergrundmodell entwickelt (Bremerhaven-Cuxhavener Rinne mit Informationen und Daten aus Strukturgeologie, Elektro-Magnetik, Gravimetrie, Seismik und Bohrungen). In dieser Arbeit wird gezeigt, wie die Modellgeometrie für die Schweremodellierung aufbereitet und mit Literatur-Dichten für die verschiedenen lithologischen Einheiten vervollständigt wurde. Der berechnete Modellschwereffekt wird mit den Ergebnissen frü-

herer Arbeiten verglichen. Der Vergleich mit den residualen Schwerfeldern ergab eine weitgehende Übereinstimmung. Unterschiede werden damit begründet, dass Dichteänderungen innerhalb der oberflächennahen lithologischen Einheiten nicht im Modell abgebildet werden konnten. Später wird ein hier entwickeltes Verfahren zur statistischen Abschätzung unbekannter Verteilungen von Materialparametern im Untergrund abgeleitet und gezeigt, wie diese oberflächennahen Dichten abgeschätzt werden können. Das Verfahren ermöglicht es, aus der vorhandenen Verteilung der spezifischen Widerstände für die Bremerhaven-Cuxhavener Rinne Aussagen über die relative Verteilung der Dichten im Modellgebiet zu treffen.

Der heutzutage übliche enorm große Datenumfang geophysikalischer Datensätzen erschwert die numerische Verarbeitung oft massiv. Es wird deshalb untersucht, wie Punktdatensätze und/oder triangulierte Netze so optimiert werden können, dass sie trotz erheblich reduziertem Datenumfang für geophysikalische Anwendungen bei der Modellierung weiter verwendet werden können: **CIDRe** heißt das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren, das es erlaubt, die Punktmenge von Datensätzen so zu reduzieren, dass in Regionen mit geringen Änderungen in den Datenparametern niedrigere Punktdichten erzielt werden als in Regionen mit sich stark ändernden Werten. Anwendungen basieren auf der Auswertung von Datensätzen der Satellitenaltimetrie vor Nord-Chile und Aero-Gradiometer-Messungen in Nord-Norwegen.

Auch eine enorm hohe Anzahl von Dreiecken in einem triangulierten Geometriemodell erschwert die Verwendung dieser Geometrie in der 3D Modellierung und bei der Visualisierung. Um die Dreiecksanzahl dieser Modelle zu reduzieren, werden Verfahren vorgestellt, die hoch aufgelöste triangulierte Modelle vereinfachen und dabei deren "Form" weitgehend erhalten. Hierzu wurden verschiedene Ansätze der "*Mesh-Simplification*" implementiert und an die Erfordernisse der Schwerberechnung angepasst. Mit Hilfe dieser Verfahren wird ein sehr hoch aufgelöstes Modell zweier Salzstöcke im Gifhorner Trog, auf nur 5% der initialen Dreiecksanzahl reduziert, ohne dass die Güte der darauf basierenden Schwermodellierung beeinträchtigt wird; d.h. es werden nur Differenzen zwischen den berechneten Schwerfeldkomponenten und -gradienten für das Ausgangsmodell und die vereinfachten Modelle von 1% zugelassen.

3D-Druck ist ein inzwischen weit verbreitetes Mittel zur analogen Repräsentation digitaler 3D Modelle vor allem in der Industrie und den Ingenieurwissenschaften. Es wird untersucht, wie ein 3D-Druck für geophysikalische Anwendungen genutzt werden kann. Beispielhaft wird dies am 3D-Drucker "Ultimaker 2" gezeigt und beschrieben, wie verschiedene 2D und 3D Modelle aus der Gravimetrie für den 3D-Druck aufbereitet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird gezeigt, dass mit analogen Repräsentationen von geophysikalischen Ergebnissen ein hoher kommunikativer Mehrwert erzielt werden kann.

Summary

Based on both general and specific tasks and questions that arise from collaboration in the two research projects AIDA and TiPOT3D, this thesis reveals the support for processing and interpretation in geophysics by methods of Geoinformatics; here particularly for potential field methods.

Initially, it is shown how to support communication and interaction in interdisciplinary research with Geoinformatics. Here, the BMBF joint-project “ AIDA - From Airborne Data Inversion to In-Depth Analysis ” is used as an example. In this project, the “AIDA-project-wiki” homepage was used to be the internal communication platform to maintain inherent project data. Additionally, this website helps to coordinate and plan project meetings, publications and conference contributions. Software interfaces supply the exchange of variable project data between project participants. Using two applications it is demonstrated how model information is converted between different model representations.

The evaluation of geological 3D subsurface models by density modeling was a major concern in the BMBF joint-project AIDA. Therefore, the 3D subsurface model for the study area in Northern Germany between Bremerhaven and Cuxhaven was developed implementing all available data from geology, electro-magnetics, gravimetry, seismics and boreholes. For significant lithological units densities from literature were assigned to structural bodies. Then the modeled gravity field was compared with measured gravity field data of the area. The fit was quiet good. Remaining differences are based on density variations in the near-surface lithologic units that are not included into the density model. However, to obtain more information on these densities, a statistical approach was developed. It tries to estimate the subsurface density distribution in the modeling area from the distribution of resistivity data.

Today geophysical data bases consist of large data amount which often hinders massively numerical processing. Therefore, it was investigated how data sets consisting of scattered data points or triangulated meshes can be optimized by reducing the amount of data with minimum information loss: The **CIDRe** method, developed in this thesis, allows to reduce the number of points in a scattered data set by analyzing the gradients in the data parameters. Thus, in regions without significant parameter changes a much lower point density can be obtained compared to regions with strong changes in the parameters. The CIDRe approach is demonstrated with applications based on the evaluation of satellite altimetry and aero-gradiometry data.

Also, a huge amount of triangles building the hull of the model geometry can complicate the use of this geometry for 3D modeling and visualization. In computer graphics, methods are available, which can simplify such triangulated models while maintaining their outer shape. In this thesis, three approaches for “*mesh-simplification*” were imple-

mented and adapted for particular needs of potential field modeling. Applying these methods, a high resolution model of two salt domes in the area of “Gifhorner Trog” in Northern Germany is reduced to only 5% of the initial number of triangles. The differences in the gravity fields of both original and reduced model remain smaller than only 1%.

3D printing is now widely used for analog representations of digital 3D models. In the context of this thesis it is demonstrated how 3D printing can be used for visualization of geophysical applications. This is demonstrated by operating the printer “Ultimaker 2” and it is shown how to prepare 2D and 3D models of gravimetry for 3D printing. In this thesis, a high communicative benefit of 3D printed geophysical results is achieved.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	8
1 Einleitung	11
2 Interaktionen in interdisziplinärer Forschung	17
2.1 Interaktions- und Kommunikationsaufgaben und ihre Umsetzung	17
2.1.1 Datenbereitstellung, Datenaustausch und Datenpräsentation . .	20
2.1.2 Koordination der internen und öffentlichen Kommunikation . . .	23
2.2 Das Verbundprojekt AIDA - From Airborne Data Inversion to In-Depth Analysis	24
2.2.1 Die Projektteilnehmer und Projektziele	24
2.2.2 Projektinteraktion, Kommunikations- und Datenströme	25
2.2.3 Aufgaben, Ziele und Ergebnisse	27
2.3 Schlüsselfragen für die weiteren Arbeiten	30
3 Evaluierung und Bearbeitung von Geometrieinformationen als Basis für Vor- wärtmodellierungen von Potentialfeldern und ihren Gradienten	33
3.1 Berechnung des Schwereeffekts komplizierter 3D Untergrundmodelle .	34
3.1.1 Grundsätzliche Methodik zur Berechnung des Schwerefeldeffekts von triangulierten Polyedern	34
3.1.2 Die Erstellung von Untergrundmodellen mit der Anwendersoft- ware IGMAS/IGMAS+	37
3.1.3 Anforderungen an eine externe, triangulierte Geometrie	38
3.1.4 Konsistenzprüfung	39
3.2 Anwendungsbeispiel KTB: Portierung und Überarbeitung des Dichtemodells der Kontinentalen Tiefbohrung	42
3.2.1 Einführung und Motivation	42
3.2.2 Übertragung der Modellinformationen	43
3.2.3 Überarbeitung der KTB Modelltopologie	45
3.2.4 Ergebnis und zukünftige Arbeiten	48
3.3 Anwendungsbeispiel Bremerhaven-Cuxhavener Rinne: Validierung des geologischen Geometriemodells mittels Gravimetrie	50
3.3.1 Erstellung eines Dichtemodells aus einem lithologischen Modell	51
3.3.2 Dichten und verwendete Schweredaten	52
3.3.3 Analyse des berechneten Schwereeffekts	57
3.4 Fazit	58

4	Methoden zur Optimierung von Daten und Modellgeometrie	61
4.1	Parameter abhängiges Resampling von verteilten Daten	61
4.1.1	Constrained indicator data resampling - A parameter constrained irregular resampling method for scattered point data	62
4.1.2	Erweiterungen zum CIDRe-Verfahren	80
4.2	Optimierung triangulierter Modelle	85
4.2.1	“Mesh-Simplification”: Strategien zur hierarchischen Vereinfachung von triangulierten Geometrien	85
4.2.2	Anwendung: Vereinfachung der hoch aufgelösten Untergrund- geometrie zweier Salzstöcke in Norddeutschland	94
4.3	Zusammenfassung und Fazit	97
5	Statistische Abschätzung von Parametermodellen	99
5.1	Methodischer Hintergrund	99
5.1.1	Ausgangsannahmen und statistischer Hintergrund	101
5.1.2	Synthetisches Beispiel	106
5.1.3	Klassifizierte Abschätzung für mehrere Untergrundmaterialien .	108
5.2	Validierung des Verfahrens durch Vergleich mit einer Geschwindigkeits- Dichte-Relation	109
5.3	Anwendungsbeispiel Bremerhaven-Cuxhavener Rinne	118
5.4	Fazit	124
6	3D-Druck - Möglichkeiten der Anwendung analoger 3D Repräsentationen geophysikalischer Modelle	125
6.1	Allgemeines Verfahren	125
6.2	Aufbereitung geophysikalischer Datensätze für den 3D-Druck	129
6.3	Fazit	131
7	Abschließendes Fazit und Ausblick	133
A	Weitere Anwendungen des CIDRe Verfahrens	138
A.1	Resampling mittels mehrerer Datenparameter: HEM-Datensatz der Bremerhaven- Cuxhavener Rinne (Projekt AIDA)	138
A.2	Resampling hoch aufgelöster Topografiedaten für die Korrektur von Schwe- regradienten (Karasjok, Nord-Norwegen)	141
B	Statistische Abschätzung von Parametermodellen	144
B.1	Herleitung der linearen Relation für den Spezialfall, dass S und T die gleiche Dichtefunktion aufweisen	144
B.2	Weitere synthetische Beispiele	145

B.3 Ergänzungen zur Abschätzung von Dichten aus seismischen Geschwindigkeiten	147
C Verzeichnis über den dieser Arbeit beiliegenden Code	149
Abbildungsverzeichnis	151
Tabellenverzeichnis	153
Literatur	154

1 Einleitung

*„Geomodeling consists of the set of all the mathematical methods allowing to model in a **unified way the topology, the geometry and the physical properties of geological objects** while taking into account any type of data related to these objects.“*

J.-L. Mallet (Geomodeling, 2002)

In den Geowissenschaft hat die Vernetzung zwischen ihren verschiedenen Teildisziplinen in den letzten Jahrzehnten stetig zugenommen. Zum Beispiel kombinieren große Verbundprojekte und Sonderforschungsbereiche die Expertise aus Geologie, Mineralogie, Petrologie, Geophysik und Geodesie oder deren Teildisziplinen, um Lösungen für komplexe Fragestellungen über das System Erde und die darin ablaufenden Prozesse zu finden. Beispiele dafür sind die Verbundprojekte “CO₂-MoPa - Modellierung und Parametrisierung von CO₂-Speicherung in tiefen, salinaren Formationen für Dimensions- und Risikoanalysen” (Bauer et al., 2012) oder “AIDA - From Airborne Data Inversion to In-Depth Analysis” (AIDA, 2016; Götze et al., 2014) sowie der Sonderforschungsbereich (SFB) 574 “Volatile und Fluide in Subduktionszonen: Climate Feedback and Trigger Mechanisms for Natural Disasters” (SFB 574, 2016).

Immer größere Datenmengen müssen innerhalb dieser Projekte bearbeitet, ausgetauscht, gespeichert und archiviert werden. Dies wird erst durch einen hohen Grad an Digitalisierung und Automatisierung ermöglicht. Aus diesem Grund kommt der Disziplin der Geoinformatik innerhalb der Geowissenschaften eine stetig wachsende Bedeutung zu. Die Geoinformatik kombiniert die Werkzeuge aus Informatik und Angewandter Mathematik, wie Softwareentwicklung, Algorithmen und Datenstrukturen, Datenbanken, Computergrafik, Numerik sowie räumliche und multivariate Statistik, mit dem Wissen über Anforderungen, Konventionen und Problemstellungen in den Geowissenschaften. In aktuellen interdisziplinären Forschungsprojekten der Geowissenschaften werden aus diesem Grund immer häufiger Teilprojekte oder spezialisierte Projektpartner mit eindeutigem geoinformatischem Schwerpunkt vorgesehen. Deren Aufgaben innerhalb der Projekte betreffen häufig

- die Bereitstellung von Schnittstellen zum Austausch von Daten und Modellen,
- deren Archivierung und Bereitstellung in speziellen Datenbanken und Web-Servern und
- die Präsentation und Kommunikation von Daten, Modellen und Ergebnissen des Projekts nach innen und außen.

Damm und Götze (2009) beschreiben dies für den SFB 574 und Thomsen et al. (2012) für das Projekt CO₂-MoPa. Darüber hinaus sind die

- Formalisierung geowissenschaftlichen Wissens,
- die Entwicklung von mathematischen Modellen, Algorithmen und geowissenschaftlicher Software sowie
- die Evaluierung und Optimierung komplexer Daten und Modelle

Hauptschwerpunkte der Geoinformatik. Für die Geowissenschaften und speziell für die Geophysik stellt die Geoinformatik daher in erster Linie eine Hilfswissenschaft dar. Sie kann allgemeine, fachfremde Verfahren aus Mathematik und Informatik auf die spezifischen Fragestellungen anpassen und so zur Lösung geophysikalischer Probleme beitragen (unter anderem Götze et al., 2015a). So sollte z.B. die Frage geklärt werden, welche Anforderungen Geometrie- und Parametermodelle aus Geophysik und Geologie erfüllen müssen, um sie als Basis für eine gravimetrische Vorwärtsrechnung verwenden zu können. Für diese geophysikalische Anwendung gilt es zusätzlich zu klären, in wie weit es möglich ist, den zum Teil großen Datenumfang gravimetrischer Messdaten (z.B. aus Satelliten-, Schiffs- oder Aero-Gravimetrie) und triangulierten Geometriemodellen aus der Interpretation hochauflösender Seismik zu reduzieren, ohne dass dies signifikante Auswirkungen auf die Ergebnisse der Vorwärtsmodellierung hat. Dafür wurden für das Projekt AIDA verschiedene Schnittstellen zur Konversion von Geometriemodellen zwischen verschiedenen Geometrierepräsentationen implementiert und Verfahren zur Analyse und Korrektur dieser Geometriemodelle entwickelt und angewandt.

Mit Bezug zur Erarbeitung eines Startmodells für die Vorwärtsmodellierung wurde ein statistischer Ansatz entwickelt, um zu klären, in wie weit es möglich ist, die unbekannt verteilte Verteilung eines geophysikalischen oder petro-physikalischen Parameters anhand von zusätzlichen, aber unabhängigen Informationen abzuschätzen. Die Entwicklung eines solchen Abschätzungsverfahrens wurde notwendig, da eine gravimetrische Vorwärtsmodellierung eines geologischen Geometriemodells mit konstanten Dichten für die einzelnen lithologischen Einheiten die vorhandenen Schweredaten nicht zufriedenstellend erklären konnte. Aus diesem Grund sollte versucht werden, Aussagen über die relative Verteilung der Dichte für die internen Strukturen des Sediments anhand von vorhandenen aber unabhängigen geophysikalischen Informationen abzuleiten.

In den Geowissenschaften ist die Präsentation von Daten und Ergebnissen über interaktive und stereografische 3D Computergrafik inzwischen weit verbreitet. Dieses Präsentationsmittel setzt allerdings das Vorhandensein von spezieller Hardware voraus. Zudem benötigt der Betrachter ein Mindestmaß an Expertise, um diese Art der Visualisierung angemessen interpretieren zu können. Hierbei sollte der Frage nachgegangen werden, ob und wie ein gänzlich anderes Präsentationsmittel, der 3D-Druck, ebenfalls für geophysikalische Präsentationen genutzt werden kann.

Für den weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit ist es notwendig, die Bedeutung einiger häufig verwendeter Begriffe zu klären.

Bei **interdisziplinären Arbeiten** handelt es sich um eine kooperative Zusammenarbeit zwischen mindestens zwei verschiedenen Disziplinen oder mehreren unabhängigen Teildisziplinen eines übergeordneten Themenkomplexes. Im Kontext dieser Arbeit werden zum Beispiel interdisziplinäre Forschungsprojekte aus den Geowissenschaften behandelt, in welchen ein Forschungsgegenstand durch mehrere Teildisziplinen (z.B. Geophysik, Geologie, Geoinformatik, Petrologie, Geochemie usw.) bearbeitet und die Ergebnisse unter den Disziplinen ausgetauscht und gemeinsam bearbeitet und interpretiert werden. Im Gegensatz dazu werden bei so genannten **multidisziplinären** Arbeiten die verschiedenen Ansätze der Teildisziplinen unabhängig und parallel durchgeführt und erst die einzelnen Ergebnisse im einem gemeinsamen Kontext interpretiert (Götze et al., 2015a). Interaktionen, kooperative Bearbeitung von Daten und ein Austausch von Zwischenergebnissen zur gemeinsamen Diskussion findet hier meist nicht statt. Beispiele für interdisziplinären Forschungsvorhaben sind z.B. der SFB 574 und das Verbundprojekt AIDA.

Häufig werden die beiden Begriffe **“komplex”** und **“kompliziert”** synonym verwendet. Dies ist jedoch nicht korrekt, da sie unterschiedliche Eigenschaften eines Sachverhaltes beschreiben. **“Kompliziert”** beschreibt einen Sachverhalt, der für einen Anwender ohne entsprechende Expertise schwer zu erfassen und zu verstehen ist. Besitzt oder erwirbt dieser Anwender jedoch die notwendige Expertise, so verliert der Sachverhalt die Eigenschaft **“kompliziert”**. Es handelt sich aus diesem Grund um eine subjektive Eigenschaft. Im Gegensatz dazu beschreibt **“komplex”** eine objektive Eigenschaft eines Sachverhalts oder Prozesses. Etwas ist **“komplex”**, wenn es aus einer Menge von mit einander in Beziehung stehenden Einheiten besteht, die **“dynamisch”** miteinander agieren. Die einzelnen Einheiten lassen sich meist einfacher beschreiben als der komplette Sachverhalt, zwischen den Einzeleinheiten treten aber Interaktionen und Synergien auf. Aus diesem Grund ist es möglich, dass sich der Zustand oder das Verhalten eines Sachverhalts nicht komplett beschreiben oder vorhersagen lässt, auch wenn dies für alle Einzeleinheiten separat durchaus möglich ist. Diese Eigenschaft wird als **“Emergenz”** bezeichnet und ist ein entscheidender Bestandteil von komplexen Sachverhalten (unter anderem Sharma et al., 2013 und Alvers et al., 2014). Komplexe Sachverhalte sind eben durch diese Interaktionen innerhalb der Gruppe der Einzelbausteine immer **“mehr als die Summe ihrer Einzelteile”**. Die oben beschriebenen interdisziplinären Arbeiten weisen aus diesem Grund einen sehr viel höheren Grad an Komplexität auf als multidisziplinäre Arbeiten.

Unter dem Begriff “**Daten**” wird laut deutschem Duden (<http://www.duden.de/rechtschreibung/Daten>, 2016) Folgendes verstanden:

1. Durch Beobachtungen, Messungen, statistische Erhebungen u.a. gewonnene (Zahlen-) werte, auf Beobachtungen, Messungen, statistischen Erhebungen u.a. beruhende Angaben, formulierbare Befunde
2. (EDV) elektronisch gespeicherte Zeichen, Angaben, Informationen
3. (Mathematik) zur Lösung oder Durchrechnung einer Aufgabe vorgegebene Zahlenwerte, Größen

Für den Kontext der Geoinformatik sind alle drei Definitionen von Bedeutung. Eine wichtige Eigenschaft von gemessenen Daten ist, dass man sie, im Gegensatz zu den Ergebnissen einer Modellierung als “wahr” innerhalb einer gewissen Genauigkeit annehmen kann. Für Anwendungen in der Geophysik wird in erster Linie die erste Definitionsmöglichkeit verwendet.

Die zweite Definition findet in dieser Arbeit immer im Kontext der Kommunikation und Präsentation von Informationen Anwendung. Daten in diesem Sinne müssen keine reinen Messdaten sein, sondern können durchaus auch Ergebnisse aus anderen Verfahren oder einer Modellierung oder Metainformationen sein. Bei **Metainformationen** oder Metadaten handelt sich um “Daten über Daten”, also Informationen, welche nicht den eigentlichen Inhalt eines Datensatzes beschreiben, sondern Angaben zu seinem Zustandekommen und Zustand, zum Beispiel über den Urheber, wie, wo und wann die Daten entstanden sind oder wie groß ihr Umfang ist, wie sie formatiert sind und womit sie verarbeitet wurden, aber auch über Zugriffsmöglichkeiten, Ungenauigkeiten und Fehler. Diese Informationen sind für eine korrekte Verwendung von Daten entscheidend, werden aber erst seit kurzer Zeit tatsächlich systematisch erfasst und verwaltet (unter anderem Thomsen et al., 2012 und Götze et al., 2015a). Diese Metadaten können in einem abstrakteren Kontext wiederum als Daten verwendet und verarbeitet werden. Für die Beschreibung der Arbeitsweise von Algorithmen und Verfahren wird in dieser Arbeit die dritte (mathematische) Definition verwendet. Im Kontext der Algorithmenentwicklung werden unter “Daten” vor allem die “Eingangsdaten” eines Verfahrens verstanden. Dies sind alle Größen, die als “Input” für ein Verfahren oder einen Algorithmus dienen.

Die Definitionen der Begriffe “**Modell**” und “**Modellierung**” sind schwer zu spezifizieren. Die Wissenschaft der Modelltheorie erlaubt einen sehr allgemeinen Modellbegriff, von ikonischen Modellen, also verkleinerten Abbildern der Realität, über Analogmodelle, die reale Sachverhalte mittels Analogien repräsentieren, bis hin zu symbolischen Modellen, z.B. mathematischen Gleichungen und Formeln (nachzulesen zum

Beispiel in Thalheim und Nissen, 2015). Dieser Modellbegriff geht für den Kontext dieser Arbeit viel zu weit. Für die im Folgenden beschriebenen Verfahren und Anwendungen sind engere Definitionen für "Modell" und "Modellierung", angepasst an die Bedürfnisse der Geowissenschaften, von Bedeutung, welche unter anderem in Mallet (2002a) und Götze et al. (2015b) angegeben werden. Im Allgemeinen handelt es sich bei einem "Modell" um ein auf ausgewählte Eigenschaften reduziertes (vereinfachtes) Abbild der Realität. Ein "mathematisches Modell" ist dabei eine formalisierte Beschreibung bestimmter (niemals aller) Eigenschaften eines realen Sachverhaltes. Eine "Modellierung" ist demzufolge die Anwendung eines oder mehrerer mathematischer Modelle auf gegebene Informationen, um Aussagen über die Eigenschaften und das Verhalten eines bestimmten Untersuchungsgegenstandes zu erhalten. Das Ergebnis einer Modellierung entspricht niemals komplett der Realität, sondern bildet im besten Fall wenige Aspekte eines realen Zustands oder Verhaltens ab. Es handelt sich also bei einem solchen Resultat ebenfalls um ein Modell gemäß der oben gegebenen allgemeinen Definition.

Der Vorgang der Modellierung in den Geowissenschaften umfasst laut Mallet (2002a) alle mathematischen Verfahren, welche es erlauben, Geometrie, Topologie und Parameterverteilung eines Untersuchungsobjektes basierend auf allen zur Verfügung stehenden Informationen eindeutig zu repräsentieren. Dabei beschreibt die Geometrie direkt die räumliche Lage der einzelnen Punkte an denen eine Information modelliert werden soll und die Topologie, wie diese Punkte untereinander verknüpft sind (z.B. als eine Dreiecksvermaschung). Sind für eine Anwendung in erster Linie die Geometrie und Topologie entscheidend, wird im Folgenden von einem Geometriemodell gesprochen. Liegt der Hauptfokus auf den modellierten physikalischen, petrologischen, chemischen usw. Eigenschaften, wird das verwendete Modell als Parametermodell bezeichnet.

2 Interaktionen in interdisziplinärer Forschung

In Anlehnung an das soeben gesagte sind Interaktionen und Kommunikation zwischen den einzelnen Teilnehmern und Teilprojekten eines komplexen Verbundprojektes entscheidend für das Erreichen der Ziele des Forschungsverbundes und der Einzelprojekte. Im Folgenden werden verschiedene Interaktionsarten innerhalb eines komplexen interdisziplinären Forschungsvorhabens vorgestellt. Die praktische Umsetzung wird in Abschnitt 2.2 am Beispiel des Verbundprojekts AIDA vorgestellt. Anschließend werden aus den Arbeiten und Aufgaben im Projekt AIDA die weiteren in dieser Arbeit zu beantwortenden Schlüsselfragen abgeleitet.

2.1 Interaktions- und Kommunikationsaufgaben und ihre Umsetzung

Große interdisziplinäre Verbundprojekte umfassen immer sehr viele Verbundteilnehmer, die in zahlreichen Teilvorhaben des Forschungsverbundes eingebunden sind. Dabei hat jedes einzelne Teilvorhaben eigene Zielvorgaben und Vorgehensweisen. In jedem dieser Teilprojekte werden zumeist eigene, fachspezifische Konventionen, Datenformate, Softwaresysteme und Modellphilosophien verwendet.

Für die Arbeit innerhalb solcher Projektverbünde ist es essentiell, dass einzelne Projekte und Teilnehmer untereinander interagieren, um neben den Zielen der Einzelvorhaben, auch die Ziele des Verbundprojektes zu erreichen (Synergie). Dies kann z.B. durch das Bereitstellen eigener Rohdaten oder Ergebnisse und der zugehörigen Expertise für die anderen Verbundteilnehmer, durch das Arbeiten mit einer gemeinsamen Datenbasis oder dem gemeinsamen Arbeiten an Publikationen geschehen. Als "Interaktion" versteht man im Allgemeinen die Wechselbeziehung zwischen handelnden Akteuren. Ein großer Teil dieser Interaktionen lässt sich unter dem Stichwort "Kommunikation" zusammenfassen, also der Weitergabe oder dem Austausch von Informationen und lässt sich in verschiedene Bereiche klassifizieren:

direkt Die aktive Anfrage nach/Weitergabe von Informationen.

indirekt Das "passive" Bereitstellen von Informationen.

intern Der Informationsaustausch innerhalb des Projektverbundes.

öffentlich Der Informationsaustausch nach außen mit der Öffentlichkeit (externe Websites, Tagungsbeiträge und sonstige Vorträge/Poster, Publikationen usw.).

Für die Kommunikation zwischen zwei spezifischen Kommunikationspartnern wird im Folgenden auch die Bezeichnung "1-1-Kommunikation" verwendet, für die Kommunikation von einem Partner zu einer Gruppe von Kommunikationspartnern die Bezeichnung "1-N-Kommunikation". Dabei kann die Gruppe auch aus nur einem Partner

bestehen, 1-N-Kommunikation umfasst also auch die 1-1-Kommunikation.

Unter direkter Kommunikation wird jegliche aktive 1-N-Kontaktaufnahme verstanden, die in einen Austausch von Informationen münden kann. Dies ist zum Beispiel dann der Fall, wenn ein Projektteilnehmer einen anderen Teilnehmer um die Weitergabe von Informationen (Daten/Metadaten, Expertise, administrative Informationen) bittet und dadurch eine Kommunikation zustande kommt. Ebenso ist die aktive Weitergabe von Informationen durch einen Projektteilnehmer an alle anderen z.B. über eine Mailing-Liste oder einen Vortrag eine Form der direkten Kommunikation. Abhängig von dem gewählten Kommunikationsmittel ist die nachträgliche Dokumentationsmöglichkeit für die nicht an der Kommunikation Beteiligten sehr unterschiedlich. So können z.B. die bei analogen Gesprächen mit begrenztem Teilnehmerkreis (meist 1-1-Kommunikation, persönlich, telefonisch) ausgetauschten Informationen kaum dokumentiert werden, wenn kein dauerhaftes Kommunikationsmedium verwendet wird, wie z.B. bei einem analogen Briefwechsel. Die einzige Möglichkeit der Dokumentation ist eine (in der Praxis kaum zu realisierende) manuelle Protokollierung. Digitale Kommunikation (Chats, E-Mail, Video-Telefonie usw.) kann (auf Wunsch) automatisch protokolliert und gespeichert und somit nachträglich den nicht Beteiligten zugänglich gemacht werden. Gleiches gilt für digitale Kommunikationsmedien wie Präsentationen oder Videos.

Für eine indirekte Kommunikation ist zwingend ein (dauerhaftes) Medium notwendig. Analog zu einem "Schwarzes Brett" können über dieses Medium Informationen bereitgestellt werden und jeder Interessierte kann diese jederzeit abrufen. Diese Art der Informationsbereitstellung ist um so effektiver, je mehr Nutzern die bereitgestellten Informationen zur Verfügung stehen. Digitale Möglichkeiten dafür sind die Informationsbereitstellung über Webseiten und der Datenaustausch über Web-Server-basierte Datenbanken, wie sie unter anderem in Thomsen et al. (2012) für das Projekt CO₂-MoPa beschrieben wurden (siehe Abschnitt 2.1.1).

Eine Möglichkeit, direkte und indirekte digitale Kommunikation zu kombinieren, sind die Mittel des "Web 2.0", vor allem so genannte Wiki-Seiten. Eine Wiki-Seite ist eine Webseite, welche über ein Hypertext-System vom Benutzer nicht nur gelesen, sondern auch direkt verändert werden kann. Sie bietet den Benutzern viel Freiheit bei der äußeren Gestaltung der Webseite und ihrer Inhalte. Auf dieser Kommunikationsplattform ist sowohl direkte 1-1- und 1-N-Kommunikation möglich, als auch die indirekte Bereitstellung von Informationen. Es ist möglich, den Benutzerkreis der Webseite oder einen Teil der Seite einzuschränken, so dass diese Plattformen auch für die interne Kommunikation verwendet werden können. Zeitgleich können andere Teile der Webseite auch für jeden zugänglich sein und so für die öffentliche Kommunikation genutzt werden (unter anderem Leuf und Cunningham, 2001). Die Verwendung solcher Mittel des "Web 2.0" hat den Vorteil, dass jegliche darüber erfolgende Kommunikation



Abbildung 2: Interaktive Visualisierung komplexer geologischer Strukturen als Teil der Teilprojekte M3 und M1b (Thomsen et al., 2012) des Verbundprojektes CO₂-MoPa - hier am Beispiel des Untergrunds von Schleswig-Holstein - im Visualization Centre des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung - UFZ, Leipzig. 3D Modell: F. Heese, LLUR, Flintbek; Foto und Visualisierung: B. Zehner, UFZ, Leipzig.

Fall aber weiterhin notwendig.

Folgende grundlegende Aufgaben müssen von dem mit der Interaktionskoordination beauftragten Projektpartner erfüllt werden:

- Koordination und Unterstützung von Datenbereitstellung, Datenaustausch und Datenpräsentation
- Koordination der internen Kommunikation
- Koordination der öffentlichen Kommunikation

Auf diese wird im Folgenden näher eingegangen und sie werden an Beispielen erläutert.

2.1.1 Datenbereitstellung, Datenaustausch und Datenpräsentation

In Bezug auf komplexe interdisziplinäre Forschungsvorhaben sollten alle in der Einleitung gegebenen Definitionen für den Begriff "Daten" berücksichtigt werden. Im Allgemeinen sind Daten hier die vorhandenen Informationen über einen zu beschreibenden Forschungsgegenstand, welche die Grundlage zur Gewinnung neuer Erkenntnisse über eben diesen Forschungsgegenstand bilden. Diese neuen Erkenntnisse (Resultate)

können wiederum die Datenbasis weiterer Forschungen darstellen. Ein Datensatz ist in diesem Zusammenhang eine Sammlung von Daten, die im gleichen Kontext entstanden sind und die einen inhaltlichen Bezug zu einander haben, welcher durch die zugehörigen Metainformationen beschrieben wird.

Alle in einem Verbundprojekt verwendeten Daten und erzielten Modelle und Ergebnisse müssen auf eine angemessene Weise präsentiert werden. Neben verschiedenen Möglichkeiten der 2D Visualisierung kommen dafür auch Computergrafik-basierte 3D Visualisierung und interaktive Stereovisualisierung in Frage. Die dazu notwendige technische Infrastruktur steht als getrackte "head-mounted displays" wie "Oculus Rift" (Hersteller Samsung, <http://www.oculus.com/>) oder moderne Stereomonitore bereits für wenige Hundert Euro zur Verfügung. Diese Displays sind allerdings häufig auf ein bis zwei Betrachter beschränkt. In Damm und Götze (2009) wird eine kosteneffektive Installation für ein interaktives Stereodisplay für mehrere Betrachter gleichzeitig beschrieben. Spezielle Visualisierungszentren stellen zudem großskalige High-End-Lösungen bereit. In Abb. 2 wird die Verwendung der interaktiven Stereoinstallation des Visualisierungszentrums am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Leipzig gezeigt.

Unabhängig davon, welche technische Lösung für die Datenvisualisierung gewählt wird, ist die Präsentation der verwendeten Daten, Modelle und erzielten Resultate essentiell für jedes Verbundprojekt. Die für die Präsentation verwendete Hard- und Software benötigt meist eine spezielle Formatierung der darzustellenden Informationen. Diese weicht zum Teil stark von der für die Erstellung und Auswertung der betreffenden Daten verwendeten Repräsentation ab, da meist andere Voraussetzungen und Anforderungen erfüllt werden müssen. Die notwendige Übertragung von einer Repräsentation in eine andere oder die Bereitstellung der dazu notwendigen Austausch- und Konvertierungsschnittstellen ist ebenfalls Teil der Datenbereitstellung. Im Folgenden werden zwei praktische Ansätze zur Lösung der hier beschriebenen Kommunikationsaufgabe vorgestellt. Der erste Ansatz wurde innerhalb des Sonderforschungsbereichs SFB 574 (SFB 574, 2016) verwendet. Als zweites Beispiel wird der im Verbundprojekt CO₂-MoPa verwendete Ansatz beschrieben. Aufgrund der Komplexität der beiden Verbundprojekte und der hohen Anzahl an jeweiligen Verbundpartner werden die oben beschriebenen Aufgaben in beiden Fällen jeweils durch ein spezialisiertes separates Teilprojekt übernommen, welches die notwendige zentrale Infrastruktur für alle Projektpartner bereitstellt und zugehörige Dienstleistungen übernimmt.

Der in Damm und Götze (2009) beschriebene Ansatz basiert auf einem monolithischen System, bei dem das für Datenbereitstellung und -austausch verwendete Datenbanksystem, sowie die dazugehörigen Web-Interfaces, auf einer einzelnen Serverarchitektur angesiedelt sind und von einem Datenbank-Management-System (DBMS) verwaltet werden. Ein spezialisiertes Teilprojekt verwaltet die notwendige Hardware und entwi-

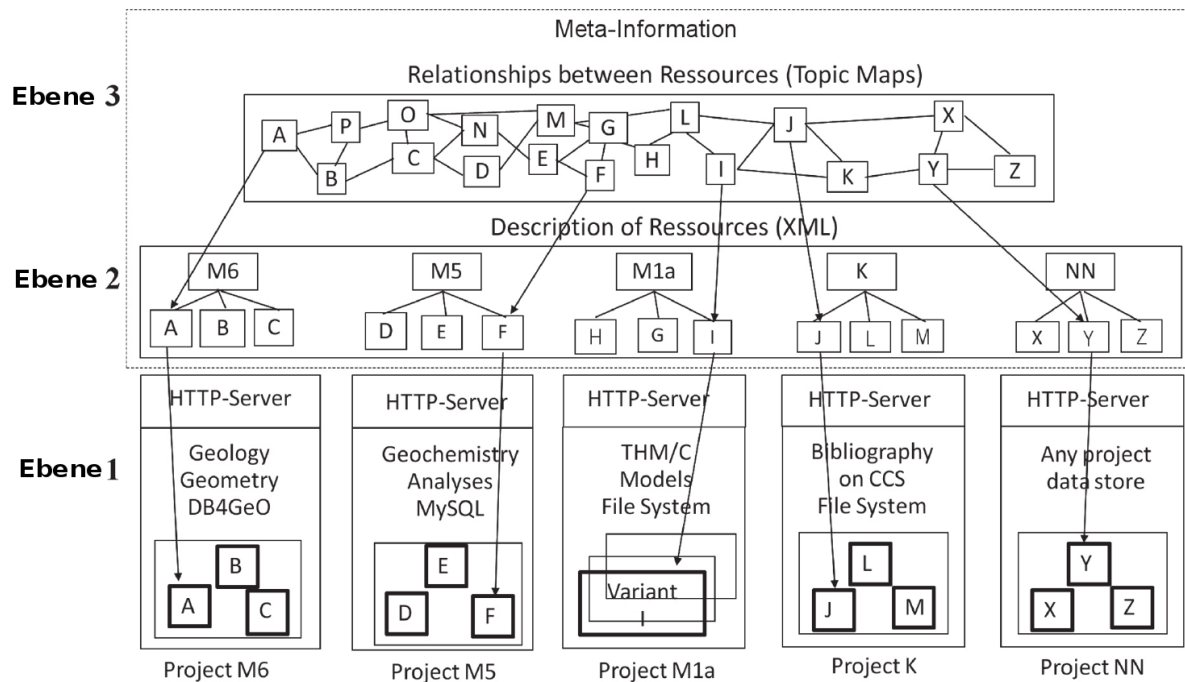


Abbildung 3: Verteiltes System für den Austausch heterogener Daten im Projekt CO₂-MoPa. Auf separaten Web-Servern werden die Ressourcen der einzelnen Teilprojekte dezentral und heterogen vorgehalten (Ebene 1). Die einzelnen Datenquellen werden über ihre Metainformationen in einer XML-Datenbank zentral zusammengeführt und die Einzeldatensätze über eine homogene XML-Repräsentation abgebildet (Ebene 2). In einer so genannten "Topic Map" (Ebene 3) werden die Beziehungen zwischen den Datensätzen und Datenquellen repräsentiert (Abbildung nach Thomsen et al., 2012).

ckelt die zur Datenbereitstellung und -austausch notwendige Software. Dieses Teilprojekt stellt zudem Equipment, Expertise und Software für die Datenpräsentation bereit. Als Präsentationshardware sind sowohl eine UltraHD-Monitorinstallation (Auflösung: 3840x2400 Pixel), als auch verschiedene Stereodisplays für die in diesem Verbundprojekt verwendeten Daten und erzielten Ergebnisse verfügbar. Dazu gehören neben einer auto-stereoskopischen, Monitor-basierten Lösung ohne Benutzerinteraktion auch eine "head-mounted display"- und eine Beamer-basierte Lösung. Diese können mit einem optischen Trackingsystem gekoppelt werden und ermöglichen so eine interaktive Stereo-Präsentation.

In Thomsen et al. (2012) anstelle einer zentralen Serverarchitektur ein darauf aufbauender, verteilter Ansatz verfolgt. Das Schema für den Aufbau der verwendeten Strukturen ist in Abb. 3 dargestellt. Die Daten jedes Teilprojekts werden heterogen, in einem fachspezifischen Format auf eigenen Web-Servern und Datenbanken bereitgestellt werden (Ebene 1). Dieser dezentrale Aufbau erlaubt es, dass die einzelnen fachspezifischen Komponenten unabhängig voneinander erweitert und verändert werden können. Die Beziehungen zwischen den einzelnen fachspezifischen Datenservern und die Metainformationen zu den einzelnen Datensätzen werden in einer übergeordneten XML-

basierten Metainformations-Datenbank verwaltet, über welche dann auch ein zentraler Zugriff auf die einzelnen Datenressourcen ermöglicht wird (Ebene 2). Über so genannte "Topic Maps" sollen in einer dritten Organisationsebene die Zusammenhänge und Beziehungen der in den beiden unteren Ebenen organisierten Objekte, sowie die ihnen zugrunde liegenden Prozesse und Verfahren, dargestellt und verwaltet werden. Diese "Topic Maps" können unter anderem dazu verwendet werden, um spezielle Szenarien für eine synoptische Interpretation der erzielten Ergebnisse innerhalb des Verbundprojekts zu definieren. Im speziellen Fall arbeiteten mehreren Teilprojekte für die Datenpräsentation eng zusammen, da die verschiedenen verwendeten Hardwarelösungen (siehe z.B. Abb. 2) unterschiedliche Datenrepräsentationen benötigen und dafür Austauschinterfaces bereitgestellt werden müssen.

Später wird in den Abschnitten 2.2.2 und 2.2.3 über die Umsetzung des Aufgabenkomplexes "Datenbereitstellung, Datenaustausch und Datenpräsentation" im Verbundprojekt AIDA berichtet werden. Aufgrund der sehr viel geringeren Komplexität dieses Verbundprojektes im Vergleich zu den oben genannten Beispielen (CO₂-MoPa) war kein eigenes Teilprojekt mit dieser Aufgabe betraut. Diese wurde statt dessen als Teil der administrativen Aufgaben der Projektleitung mit erfüllt. Der eigentliche Datenaustausch erfolgte in erster Linie durch direkte 1-1-Kommunikation zwischen den beteiligten Teilprojekten oder über das an der CAU Kiel aufgesetzte "AIDA-Projekt-Wiki".

2.1.2 Koordination der internen und öffentlichen Kommunikation

Neben den in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen Aufgaben ist auch Kommunikation ohne direkten Datenbezug für das Erreichen der Ziele der Einzelvorhaben und des Gesamtprojekts entscheidend. Dazu gehören u.a.

- direkte interne 1-1-Kommunikation zwischen Projektteilnehmern, z.B Weitergabe von Expertise und Ergebnissen,
- administrative 1-N-Kommunikation, z.B. Koordination und Planung von projektinternen Meetings, projektbezogenen Tagungsteilnahmen und -Beiträgen, Gemeinschaftspublikationen und Zwischen- und Ergebnisberichte
- interne 1-N-Weitergabe von Ergebnissen und Informationen an andere Projektteilnehmer
- und die Weitergabe von Ergebnissen der Teilprojekte und des Gesamtprojekts an die Öffentlichkeit durch Publikationen, Beiträge zu Tagungen sowie sonstige (auch nicht-wissenschaftliche) Informationsweitergabe.

Eine effektive Kommunikation innerhalb eines Projektverbundes und eines Projektverbundes mit der fachlichen und fach-fremden Öffentlichkeit bedarf einer straffen Koor-

dination. Die direkte 1-1-Kommunikation zwischen Projektmitarbeitern innerhalb eines Teilprojektes und zwischen verschiedenen Teilprojekten eines Projektverbundes ist die am häufigsten auftretende Kommunikationsform und bietet nur sehr eingeschränkte Möglichkeiten zur Dokumentation und Koordination. In den meisten Fällen haben nur die direkt an der Kommunikation Beteiligten die Möglichkeit, diese für Nichtbeteiligte zu protokollieren. Werden für diese Kommunikation digitale Kommunikationsplattformen (Echtzeit-Chat, E-Mail usw.) verwendet, so besteht aber zumindest grundsätzlich die Möglichkeit, die Kommunikation zu dokumentieren.

Für den Verlauf des Gesamtprojektes wichtiger als die 1-1-Kommunikation zwischen den Teilnehmern ist die administrative 1-N-Kommunikation, bei der relevante Informationen allen Projektpartnern zugänglich gemacht werden. Dies erfolgt durch oder auf Verlangen des mit der Projektadministration betrauten Projektpartners. Einfache Kommunikationsmittel hierfür sind z.B. E-Mail-Listen, mittels derer E-Mails automatisch an alle in dieser Liste eingetragenen Empfänger versendet werden können. Vor allem für die Koordination und Planung von Ereignissen, welche dem internen 1-N-Austausch von Ergebnissen der Einzelprojekte dienen, ist dies essentiell. Hierzu gehören regelmäßige interne Meetings, aber auch Publikationen und Tagungsbeiträge, welche das Gesamtprojekt betreffen oder an denen mehrere Teilprojekte beteiligt sind.

Im Folgenden wird das Verbundprojekt AIDA näher vorgestellt. Im Abschnitt 2.2.3 wird die Koordination der internen und öffentlichen Kommunikation in diesem Projekt erläutert. Dafür wurde unter anderem auf die Mittel des "Web 2.0" in Form des "AIDA-Projekt-Wiki" zurück gegriffen.

2.2 Das Verbundprojekt AIDA - From Airborne Data Inversion to In-Depth Analysis

Der erste Teil dieser Dissertation erfolgte im Verbundprojekt AIDA als Teil der Projektleitung an der CAU Kiel. Der Projektpartner an der CAU Kiel war zudem aktiv an den beiden Teilprojekten 4 und 5 direkt beteiligt.

2.2.1 Die Projektteilnehmer und Projektziele

Das Ziel dieses Projektes war die interdisziplinäre Interpretation aero-geophysikalischer Daten (AIDA, 2016; Götze et al., 2011; Götze et al., 2014). Das Verbundprojekt gliedert sich in 5 Teilprojekte (TP) und 8 Projektpartner (siehe Abb. 4). Dazu gehören 6 Universitäten und Forschungseinrichtungen (*Universität zu Köln, BGR, TU Bergakademie Freiberg, TU Dresden, CAU Kiel und LU Hannover*) und zwei Industriepartner (*Mobile Geophysical Technologies, Celle und Transinsight GmbH, Dresden*). Die allgemeinen Fragestellungen und Ziele des Projektverbundes "AIDA" werden hier kurz zusammengefasst.

Die Hauptzielstellung des Projektes bestand darin, basierend auf der geophysikalischen

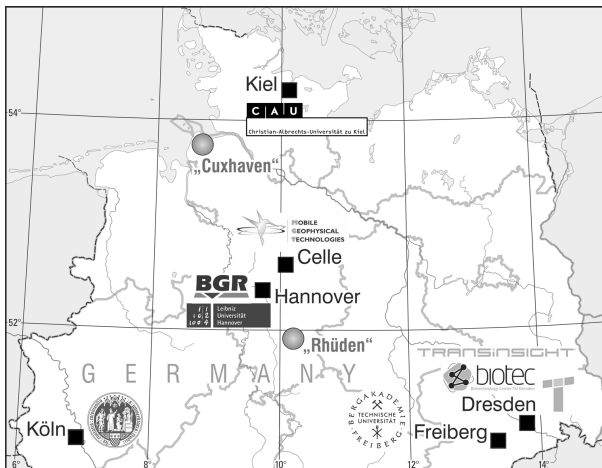


Abbildung 4: Karte der Projektpartner des Verbundprojektes AIDA und der Untersuchungsgebiete: die Cuxhaven-Bremerhavener Rinne in Norddeutschland und die Lutter-Antikline in der Nähe von Rhüden (Harz) in Mitteldeutschland (Abbildung nach Götze et al., 2014).

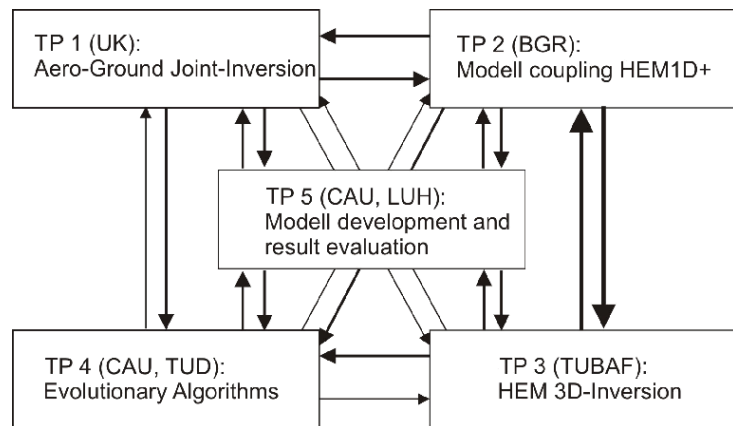
Erkundung des oberflächennahen Untergrunds dessen Charakteristika für eine praktische Nutzung durch Nicht-Fachleute abzuleiten, in dem zum Beispiel aus der Verteilung von messbaren Untergrundparametern wie Leitfähigkeit, Dichte usw. räumliche Strukturen und anwender-spezifische Informationen abgeleitet werden. Dafür sollten unter anderem verschiedene automatisierte numerische Verfahren und eine aussagekräftige 3D Visualisierung verwendet oder gegebenen Falls neu entwickelt werden. Es galt für die 5 Teilprojekte, folgende Schlüsselfragen zu beantworten:

1. Welche Algorithmen können die Struktur des nutzbaren Untergrundes beschreiben?
2. Welche Zusammenhänge existieren zwischen den verschiedenen messbaren geophysikalischen Parametern und dem geologischen Aufbau des Untergrundes?
3. Wie können verschiedene Charakteristiken der geologischen Systeme, wie z.B. Grundwasserleiter, welche für die Nutzung dieser Systeme von Bedeutung sind, aus den gemessenen Parametern abgeleitet werden?
4. Wie plausibel sind die auf den gemessenen Daten basierenden numerischen Ergebnisse?

2.2.2 Projektinteraktion, Kommunikations- und Datenströme

Der projektinterne Informationsaustausch erfolgte in erster Linie durch eine Direktkommunikation zwischen den einzelnen Projektbeteiligten, sowie Treffen der verschiedenen Projektpartner. Des Weiteren wurde eine interne Projekt-Wiki-Seite www.aida.uni-kiel.de (siehe Abb. 1; Menzel und Götze, 2014) implementiert, um die Kommunikation und den Datenaustausch innerhalb des Projektes zu erleichtern und zu dokumentieren. Über dieses Interface sollte für jeden Projekt-Mitarbeiter die Möglichkeit geschaffen werden, mit allen anderen Mitarbeitern Informationen und Daten austauschen

Abbildung 5: Vernetzung zwischen den Teilprojekten (TP) des Verbundprojektes AIDA. Alle Teilprojekte tauschen sowohl direkt mit einem anderen Teilprojekt, als auch über das "AIDA-Projekt-Wiki" (Abb. 1) indirekt mit allen anderen Teilprojekten Daten und Informationen aus (Abbildung nach Götze et al., 2011).



zu können. Die Kommunikation der Projektarbeiten und -ergebnisse nach "Außen" erfolgte durch die Bereitstellung verschiedener Tagungsbeiträge, Publikationen, Projektberichte (z.B. Zwischen- und Endbericht für das BMBF) sowie die offizielle Projekt-Website www.geotechnologie-aida.de (AIDA, 2016). In Abb. 5 wird die Zusammenarbeit und Vernetzung der Teilprojekte im Verbundverfahren dargestellt:

- TP1 war sehr eng mit 2 vernetzt, die jeweiligen 1D-Inversionsergebnisse wurden ausgetauscht und abgeglichen (Götze et al., 2011). Die Inversionsergebnisse von TP1 flossen darüber hinaus in die Arbeiten von TP3 sowie TP5 ein .
- TP2 bildete die Schnittstelle zu TP1, TP3 und TP5 und verwaltete über die Benutzeroberfläche HEM1D+ den Datenimport und Modellexport (Götze et al., 2011). TP2 selektierte aus den Ergebnissen der 1D-Inversion die Teilbereiche, auf die TP3 eine 3D-Inversion anwenden sollte (Ullmann et al., 2016) und lieferte die Widerstandsmodelle (Siemon et al., 2009), die in TP5 zur Verfeinerung des geologischen Strukturmodells (Steinmetz et al., 2015) und für die Visualisierung, Bewertung und Plausibilitätsrecherchen verwendet wurden. Nach der Kombination der 1D mit den 3D Leitfähigkeitsmodellen sollten diese an TP5 weitergegeben werden.
- TP3 erhielt Teile der HEM-Daten sowie die 1D Hintergrundmodelle aus TP2 (Ullmann et al., 2016), um auf den selektierten Bereichen eine 3D Inversion (Scheuerner et al., 2016) anzuwenden. Die resultierenden Leitfähigkeitsmodelle wurden einerseits TP2 zur Integration in die 1D Modelle übergeben, andererseits an TP5 für die geologische 3D Modellierung (Steinmetz et al., 2015), Visualisierung und Modellbewertung. Zudem wurden die Ergebnisse mit den Inversionsergebnissen der evolutionären Strategien in TP4 verglichen.

- TP4 erhielt Teile der die Daten des TP2, die Strukturmodelle der 1D- und 3D-HEM-Inversion (TP3, Scheunert et al., 2016 und TP2, Siemon et al., 2009) sollten als Nebenbedingungen in die Inversion eingehen. Die neuen Algorithmen wurden in die Arbeiten von TP5 für die Visualisierung in der „graphic cave“ eingebettet (Alvers et al., 2014).
- TP5 integrierte und assimilierte die Ergebnisse der Verbundpartner in seine Plausibilitätsbetrachtungen und visualisiert die Ergebnisse von TP1, TP2, TP3 und TP4. Die Startmodellkonstruktion (synthetische Modelle) erfolgte aufgrund der geologischen und hydrogeologischen Modelle (Steinmetz et al., 2015).

Neben der Entwicklung der geologischen Modelle durch die Projektpartner an der LU Hannover (Steinmetz et al., 2015) und der Validierung der Modelle, sowie der Datenpräsentation durch die Projektleitung an der CAU Kiel, kommt dem TP 5 eine Schlüsselrolle bei der Projektkommunikation und dem internen Datenaustausch zu.

2.2.3 Aufgaben, Ziele und Ergebnisse

Die mit der Projektstätigkeit verbundenen und vom Autor dieser Dissertation bearbeiteten Aufgaben, sowie die noch während der Laufzeit des AIDA Projekts erreichten Ziele, werden im Folgenden zusammengefasst.

Datenaustausch, -aufbereitung und Präsentation. Im Projektverlauf wurde eine heterogene Interface-Struktur entwickelt (siehe Abb. 6). Dabei war das Ziel, die einzelnen Teilprojekte und Projektteilnehmer beim Datenaustausch untereinander zu unterstützen. Heterogen bedeutet in diesem Fall, dass für jeden Datentyp/ -transfer neue Schnittstellen auf unterschiedlichen Grundlagen unabhängig von einander entwickelt wurden, abhängig von den technischen Voraussetzungen der beteiligten Teilvorhaben. Dadurch konnten die technische Möglichkeiten bereitgestellt werden, um die Daten und Ergebnisse aller Teilpartner zu verarbeiten und zu visualisieren. Die Schaffung einer Struktur basierend auf einer homogenen Grundlage (einheitliche Datentypen, -formate und Software) war geplant, konnte aber in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht umgesetzt werden. Für die Visualisierung wurde die in Damm und Götze (2009) beschriebene „Low-Cost-Cave“ (und deren Nachfolgestallation) zur interaktiven Stereo-Visualisierung verwendet. Als Softwareplattformen kamen sowohl proprietäre Software (GOCAD[®] und IGMAS+), Open-Source-Software (ParaView) sowie eigens entwickelte Software auf Basis von C/C++ und OpenSceneGraph sowie Matlab zum Einsatz. Zusätzlich kamen neben der interaktiven 3D Computergrafik noch weitere Präsentationsmethoden für Daten und Modelle in Betracht. Aus diesen Überlegungen resultiert die vierte Schlüsselfrage für diese Arbeit (siehe Abschnitt 2.3).

Bei den hauptsächlich im Projekt AIDA verwendeten Daten handelt es sich entweder

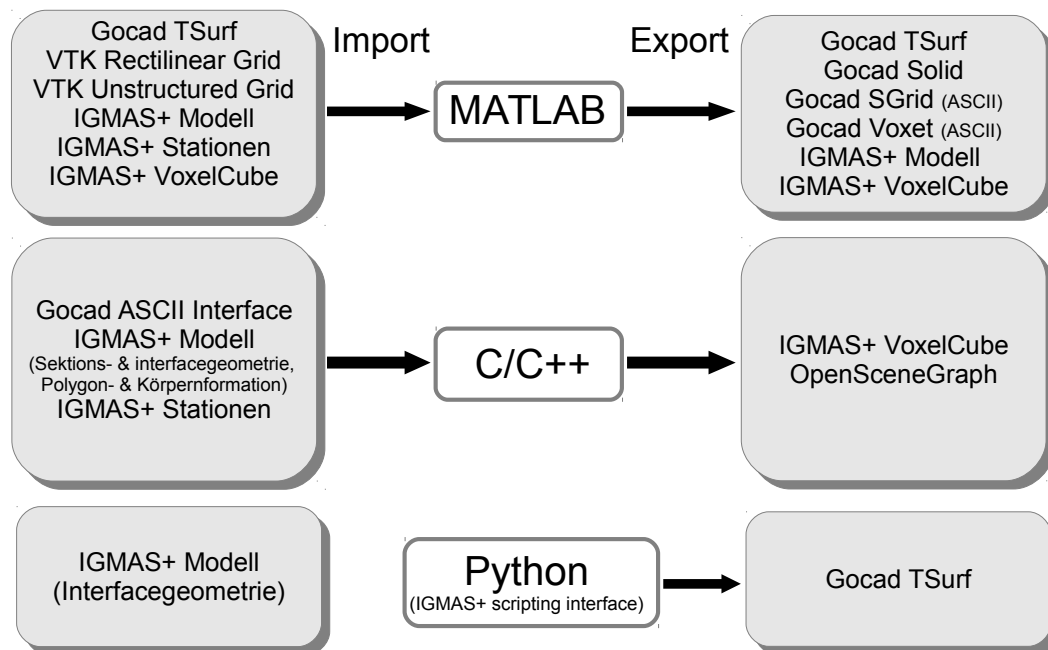


Abbildung 6: Im Rahmen dieser Arbeit bereitgestellte Schnittstellen für den Datenaustausch im Verbundprojekt AIDA.

um im Raum verteilte Punkte mit gemessenen / berechneten Werten oder um triangulierte 3D Geometriemodelle. Diese Daten waren zum Teil sehr hoch aufgelöst, was ihre numerische Verarbeitung und Präsentation massiv erschwerte. Aus dieser Beobachtung ergibt sich die zweite Schlüsselfrage für diese Arbeit.

Bereitstellung und Administration des "AIDA-Projekt-Wiki". Zu Beginn des Verbundprojektes wurde beschlossen, bei der internen Projektkommunikation verstärkt die Mittel der sozialen Medien zu nutzen. Dafür wurde an der CAU Kiel das "AIDA-Projekt-Wiki" (www.aida.uni-kiel.de) ins Leben gerufen. Dabei handelt es sich um eine Internet-Seite auf Basis der "Media-Wiki"-Struktur (<http://meta.wikimedia.org>). Diese ermöglicht die einfache Bearbeitung der Internetseite durch die Benutzer. Jeder Projektteilnehmer hatte Zugang zu dieser Seite und war zu weitreichenden Änderungen des Seiteninhalts berechtigt. Das "AIDA-Projekt-Wiki" hatte folgende Hauptaufgaben zu übernehmen:

- projektinterne 1-N-Kommunikation, Bekanntmachung von Neuigkeiten und Terminen, projektinterne Informationen über die Arbeiten der Teilprojekte und Projektteilnehmer,

Tabelle 1: Identifizierbare Nutzer des "AIDA-Projekt-Wiki" und die Anzahl ihrer aktiven Beiträge. Der Administrator-Benutzer stand allen Projektteilnehmer zur Verfügung, war aber nur für sehr wenige Aktionen innerhalb des Wiki notwendig.

Benutzername	Anzahl der Beiträge (insgesamt 1001)					
	2010	2011	2012	2013	2014	gesamt
Hajo	21	22	0	0	0	26
CHaase	0	0	0	0	0	0
LBritschin	0	1	21	0	0	22
Menzelp	0	157	237	208	9	611
lalvers	0	5	8	0	0	13
Martin Afanasjew	3	6	12	1	0	22
Meyer	0	1	0	0	0	1
Ralph	0	0	0	1	0	1
Rub	0	0	0	0	0	0
Rudi	0	2	0	0	0	2
Scheunert	0	0	0	10	0	10
Ullmann	0	5	11	8	0	24
Geotechnologien (Administrator)	18	12	7	0	0	37
nicht zuzuordnen			-			232

- gemeinschaftliche Diskussion zu Terminplanungen, Problemen, Publikationen,
- Dokumentation des Projektverlaufs, der veranstalteten Meetings, Tagungsbeiträge und Publikationen,
- gesicherter Datenaustausch und projektinterne Verbreitung nicht öffentlicher Daten, Sicherung projektrelevanter Unterlagen (Zwischen- und Endberichte, Tagungsbeiträge, Publikationen).

Mit dieser Wiki-Seite sollte die technische Basis der in Abb. 5 dargestellte Projektkommunikation bereitgestellt werden. Nach dem offiziellen Ende des Projekts AIDA im September 2013 und der letzten Aktualisierung der Webseite (Mitte 2014) wurde leider festgestellt, dass das "AIDA-Projekt-Wiki" von einem Großteil der Projektteilnehmer vorrangig passiv und in unregelmäßigen Zeitabschnitten genutzt wurde. Neben den das Wiki betreuenden Personen waren nur wenige andere Projektteilnehmer offiziell aktiv an der Gestaltung und Weiterentwicklung des Wiki beteiligt, wie aus Tab. 1 entnommen werden kann. Aufgrund dieser eingeschränkten Beteiligung waren viele Aktionen ineffizient. So war es notwendig, wichtige Bekanntmachungen im Wiki zusätzlich über eine E-Mail-Liste zu verteilen, um sicher zu stellen, dass alle Projektteilnehmer davon Kenntnis erhalten. Dies widerspricht dem eigentlichen Sinn und Zweck der Wiki-Seite. Andererseits hat das "AIDA-Projekt-Wiki" administrative Aufgaben, wie z.B. die Planung von Terminen, Treffen, Berichten und deren Dokumentation, seitens des Projektpartners an der CAU Kiel vereinfacht. Absprachen, Manuskripte von Berichten und Protokollen, Daten sowie alle relevanten Tagungsbeiträge (Vorträge und

Poster) konnten einfach für alle intern zugänglich hinterlegt, gesichert und dokumentiert werden. Eine Möglichkeit, um ein solches Projekt-Wiki innerhalb eines Projektverbundes in Zukunft effektiver zu nutzen, wäre es, jeden Projektpartner zu beauftragen, aktiv an der Web-Seite mitzuarbeiten und diese regelmäßig zu frequentieren. Eine zusätzliche Informationskette (z.B. über E-Mail oder Telefon) wäre dann nicht mehr notwendig.

Validierung geologischer Modelle mittels Potentialverfahren. Die Ergebnisse der geologischen Modellierung des Projektpartners an der LUH unter Verwendung der von den Projektpartnern der BGR bereitgestellten HEM (helicopter-borne electromagnetics)-Ergebnisse und -Expertise werden in Steinmetz et al. (2015) beschrieben. Das geologische 3D-Modell wurden in enger Zusammenarbeit der Verbundpartner an der LUH und der CAU so bearbeitet, dass der Schwereeffekt der erzeugten Dichtemodelle berechnet und mit vorhandenen Schweredaten im Modellgebietes validiert werden konnte. Die zur Verfügung stehenden Schweremessungen wurden analysiert und vorhandene Dichtemodellierungen (Rumpel et al., 2009 und Gabriel et al., 2003) für das Untersuchungsgebiet ausgewertet. Bis zum Ende des Projekts AIDA konnten diese Arbeiten nicht zufriedenstellend angeschlossen werden und führen zur ersten und dritten Schlüsselfrage für die weiteren Arbeiten in dieser Dissertation.

2.3 Schlüsselfragen für die weiteren Arbeiten

Aus den in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen und durch den Autor dieser Dissertation durchgeführten Arbeiten, sowie weiteren Arbeiten aus dem sich an das AIDA Projekt anschließenden DGMK-Projekt TiPOT3D, resultieren vier Schlüsselfragen. Diese werden in den folgenden Kapiteln 3 bis 6 dieser Dissertation beantwortet und am Beispiel verschiedener Anwendungen aus diesen beiden Projekten demonstriert.

1) Wie lassen sich externe Geometrien und Modelle als Basis für die Vorwärtsmodellierung in der Gravimetrie verwenden?

Das im Projekt AIDA erstellte geologische Strukturmodell (Steinmetz et al., 2015) der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne soll über eine 3D Vorwärtsmodellierung des Schwerefeldeffekts des Modells validiert werden. Dafür muss die Modellgeometrie zwischen den verschiedenen Modellierprogrammen und Modellphilosophien portiert und anschließend mit Dichtewerten parametrisiert werden. Die berechnete Modellschwere wird anschließend mit existierenden Schweremessungen im Modellgebiet verglichen. In Kapitel 3 wird näher beschrieben, wie der gravimetrische Effekt von komplizierten Untergrundmodellen berechnet werden kann. Es wird des Weiteren eine Möglichkeit für die Erstellung von Untergrundmodellen zur Interpretation von Potentialfeldern

und ihren Gradienten mit der Software IGMAS+ vorgestellt. Zusätzlich wird erläutert, wie geologische Untergrundgeometrien für die Modellierung in IGMAS+ verwendet und zum Beispiel über den Schwereeffekt der mit Dichtewerten parametrisierten Geometrie validiert werden können.

2) Wie lässt sich der Datenumfang hoch aufgelöster verteilter Punktdatensätze und dicht triangulierter Modellgeometrien möglichst informationserhaltend reduzieren?

Sowohl der im AIDA Projekt verwendete Punktdatensätze für die Verteilung des scheinbaren Widerstands (Siemon et al., 2004; Siemon et al., 2009) als auch die Geometrie des erstellen 3D Untergrundmodells der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne (Steinmetz et al., 2015) waren sehr hoch aufgelöst. Die Datenmenge hat die numerische Bearbeitung und Präsentation dieser Daten massiv erschwert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht, wie sich sowohl verteilte Punktdatensätze als auch triangulierte Geometriemodelle möglichst informationserhaltend optimieren lassen. Die dafür entwickelten Verfahren und deren Anwendung werden in Kapitel 4 beschrieben.

3) Lassen sich anhand bekannter geophysikalischer Parameterverteilungen Aussagen über eine unbekannte und unabhängige Parameterverteilung treffen?

Die Geometrie des 3D Untergrundmodells der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne von Steinmetz et al. (2015) erweist sich zwar als plausibel, lässt aber kaum Rückschlüsse auf die reale Dichteverteilung innerhalb der lithologischen Einheiten zu. In Kapitel 5 wird ein vom Autor dieser Arbeit entwickelter statistischer Ansatz vorgestellt, mit dem eine mögliche Verteilung eines unbekanntes Datenparameters anhand der bekannten Verteilung eines anderen Parameters abgeschätzt werden kann. Dieser Ansatz wird auf die bekannte Widerstandsverteilung der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne (Siemon et al., 2004; Siemon et al., 2009) angewendet, um Rückschlüsse über mögliche Dichteverteilungen im Modellgebiet zu ziehen (siehe Abschnitt 5.3).

4) Wie kann "3D-Druck" als Präsentationsmittel in der Geophysik verwendet werden?

Die Visualisierung und Präsentation geowissenschaftlicher Informationen ist ein Hauptanliegen der Geoinformatik. Neben der weit verbreiteten Visualisierung über interaktive und stereografisch 3D Computergrafik steht inzwischen die Möglichkeit zur analogen Repräsentation von digitalen Inhalten über einen 3D-Drucker zur Verfügung. Die verfügbaren Geräte sind leicht zu handhaben und mittlerweile auch für Privatanwender zu finanzieren. In Kapitel 6 werden anhand von mit dem 3D-Drucker "Ultimaker 2" durchgeführten Arbeiten der Nutzen und die Limitationen von 3D-Druck für geophysikalische Anwendungen, Daten und Modelle beschrieben.

3 Evaluierung und Bearbeitung von Geometrieinformationen als Basis für Vorwärtsmodellierungen von Potentialfeldern und ihren Gradienten

Wichtiger Hinweis zur Verwendung von Dezimaltrennzeichen: In diesem und allen folgenden Kapiteln wird als Dezimaltrennzeichen immer der **Dezimalpunkt** verwendet.

In den geophysikalischen Disziplinen *Gravimetrie* und *Magnetik* wird das Schwere- und Magnetfeld der Erde gemessen und interpretiert, um Aussagen über die zugrunde liegenden Untergrundstrukturen zu treffen. Dies kann sowohl durch Inversion als auch durch Vorwärtsmodellierung erfolgen. In dieser Arbeit wird sich auf die Betrachtung der Vorwärtsmodellierung von Potentialfeldern beschränkt. Bei der Potentialfeldvorwärtsmodellierung wird die Geometrie und Parameterverteilung im Untergrund vorgegeben und der davon bewirkte Potentialfeldeffekt berechnet und mit vorhandenen Messungen verglichen. Kann der berechnete Effekt die Messungen nicht erklären, werden Geometrie und/oder Parametrisierung angepasst und der Effekt erneut berechnet und wieder mit den Messungen verglichen. Dieses Verfahren ist allerdings mehrdeutig, da mehrere Kombinationen aus Untergrundgeometrie und Untergrundparametrisierungen das gleiche Signal in den Potentialfeldern erklären können (Äquivalenzprinzip). Aus diesem Grund sind zusätzliche Randbedingungen notwendig, um den Lösungsraum für diese Problemstellungen einzugrenzen. Zu diesen Zusatzinformationen gehören unter anderem Geometrieinformationen aus anderen geophysikalischen Verfahren (2D und 3D Seismik, Georadar usw.) oder geologischen Untergrundmodellen. In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie die Geoinformatik durch die Anwendung von Verfahren aus der Computergrafik die Evaluation und Verwendung extern erzeugter Geometrieinformationen für die Vorwärtsmodellierung von Schwerefeldern sowie der zugehörigen Gradienten unterstützt. Es wird definiert, welche Anforderungen externe Geometriedaten erfüllen müssen, um für diese Anwendung korrekt verwendet werden zu können. Sollten diese Anforderungen nicht direkt erfüllt sein, werden verschiedene Vorgehensweisen beschrieben, mit denen die Geometrien gemäß den gestellten Anforderungen automatisiert oder manuell angepasst werden können. In den Abschnitten 3.2 und 3.3 werden zwei in dieser Dissertation bearbeitete Anwendungen aus dem Verbundprojekt AIDA (siehe Abschnitt 2.2; Götze et al., 2014) und dem Projekt TiPOT3D beschrieben. In beiden Fällen handelt es sich nicht um eine klassische Modellierung von Untergrunddichteverteilungen zur Interpretation von gemessenen Schwerefelddaten, wie sie unter anderem in Casten et al. (1997), Heyde (1999), Tassara et al. (2006), Prezzi et al. (2009) oder Schaller et al. (2015) beschrieben und durchgeführt wurden. Es wer-

den vielmehr extern vorhandene Modellgeometrien verwendet, um damit entweder eine anschließende klassische Modellierung durchzuführen (Abschnitt 3.2) oder um ein gegebenes Geometriemodell über den theoretischen Schwereeffekt zu validieren (Abschnitt 3.3). Dafür müssen die Geometrieinformationen in die passenden Modellformate konvertiert, anschließend evaluiert und gegebenenfalls überarbeitet werden.

3.1 Berechnung des Schwereeffekts komplizierter 3D Untergrundmodelle

In der modernen 3D Modellierung von komplexen geologischen oder geophysikalischen Strukturen werden im Allgemeinen verschiedene Geometrietypen verwendet (Mallet, 2002a). Dazu zählen, neben regelmäßigen und unstrukturierten 3D Gittern, auch aus triangulierten Flächen aufgebaute Modellgeometrien. Diese sind vielseitig einsetzbar und können auch sehr komplizierte Strukturen abbilden. Aus diesem Grund werden sie auch bevorzugt in der Computergrafik verwendet.

Für Körper, deren Hülle über eine triangulierte Fläche beschrieben wird, lässt sich der Potentialfeldeffekt sehr effizient nach einem in Götze (1976) und Götze (1984) beschriebenen Verfahren berechnen, wenn für diesen Körper eine konstante Parametrisierung bekannt ist. Die zugrunde liegende Methodik wird im Folgenden für das in der Gravimetrie verwendete Attraktionspotential V eines beliebigen Körpers an einem Berechnungspunkt \vec{P} kurz zusammengefasst.

3.1.1 Grundsätzliche Methodik zur Berechnung des Schwerefeldeffekts von triangulierten Polyedern

Das Schwerefeld eines beliebigen Körpers lässt sich durch ein konservatives Kraftfeld (Attraktionspotential) wie folgt beschreiben:

$$V(\vec{P}) = G \iiint_{\text{Volumen}} \frac{\rho(\vec{r})}{|\vec{P} - \vec{r}|} dx dy dz.$$

$\vec{P} = P(x_P, y_P, z_P)$ ist dabei der Punkt im Raum, an dem das Potential berechnet wird, $\vec{r} = r(x, y, z)$ die Position eines beliebigen Volumenelements $dx dy dz$ innerhalb eines Körpers, der an diesem Punkt die Dichte $\rho(\vec{r})$ aufweist. G ist die Gravitationskonstante und $|\vec{P} - \vec{r}| = R$ der Abstand des Berechnungspunktes vom Volumenelement. Wenn man für den Körper vorgibt, dass er eine konstante Dichte ρ aufweisen soll, kann diese vor das Integral gezogen werden:

$$V(\vec{P}) = \rho G \iiint_{\text{Volumen}} \frac{1}{R} dx dy dz.$$

Die Komponenten des Vektors der Schwerebeschleunigung \vec{g} werden über die partiellen Ableitungen des Potentials in den drei Raumrichtungen e_x , e_y und e_z mit

$$\vec{g} = \left(\frac{\partial V}{\partial x_P}, \frac{\partial V}{\partial y_P}, \frac{\partial V}{\partial z_P} \right)$$

bestimmt. Die Vertikalkomponente der Schwere ergibt sich demnach durch

$$g_z(\vec{P}) = \frac{\partial V}{\partial z_P}(\vec{P}) = V_z(\vec{P}) = \rho G \iiint_{\text{Volumen}} \frac{\partial}{\partial z_P} \frac{1}{R} dx dy dz = \rho G \iiint_{\text{Volumen}} \frac{(z - z_P)}{R^3} dx dy dz.$$

Dieses Integral kann über eine Koordinatentransformation in die Ebene eines aktuell betrachteten Polygons und durch Anwendung des *Gaußschen Integralsatzes* (auch als *Divergenzsatz* bezeichnet) und des *Satzes von Green* gelöst werden.

Über den *Gaußschen Integralsatz* kann das obenstehende Volumenintegral des Körpers als ein Integral über seine geschlossene Oberfläche ausgedrückt werden. Dafür wird zusätzlich vorausgesetzt, dass die Oberfläche des Körpers über eine Vermaschung aus ebenen Polygonen repräsentiert wird. In der praktischen Anwendung sind diese Polygone idealer Weise Dreiecke, da diese immer eben sind und somit eine konstante Normale \vec{n} über ihrer Fläche aufweisen. Das Oberflächenintegral kann danach mittels des *Satzes von Green* in ein geschlossenes Linienintegral überführt werden. An einem Punkt \vec{P} ergibt sich die vertikale Komponente der Schwerebeschleunigung eines Polyederkörpers mit einer triangulierten Hüllfläche dann wie folgt:

$$\frac{\partial V}{\partial z_P}(\vec{P}) = \sum_{i=1}^k G\rho \cos(\vec{n}_i, \vec{e}_z) \left[\sum_{s=1}^l \delta_1 d_{is} LN_{is} \sum_{s=1}^l \delta_1 ARC_{is} \right].$$

Dabei gilt für die i -te Seitenfläche und deren j -te Kante :

$$LN_{is} = \ln \left(\frac{a_{is} + R_{is_a}}{b_{is} + R_{is_b}} \right) \quad \text{und}$$

$$ARC_{is} = \arctan \left(\underbrace{\frac{r_{is_a}^2 + a_{is} R_{is_a}}{d_{is} D_i}}_A \right) - \arctan \left(\underbrace{\frac{r_{is_b}^2 + b_{is} R_{is_b}}{d_{is} D_i}}_B \right) = \arctan \left(\frac{A - B}{1 + AB} \right) + \delta_2 \pi$$

mit

$$R_{is_a} = \sqrt{D_i^2 + d_{is}^2 + a_{is}^2} \quad ,$$

$$R_{is_b} = \sqrt{D_i^2 + d_{is}^2 + b_{is}^2} \quad ,$$

$$r_{is_a}^2 = d_{is}^2 + a_{is}^2 \quad \text{und}$$

$$r_{is_b}^2 = d_{is}^2 + b_{is}^2 \quad .$$

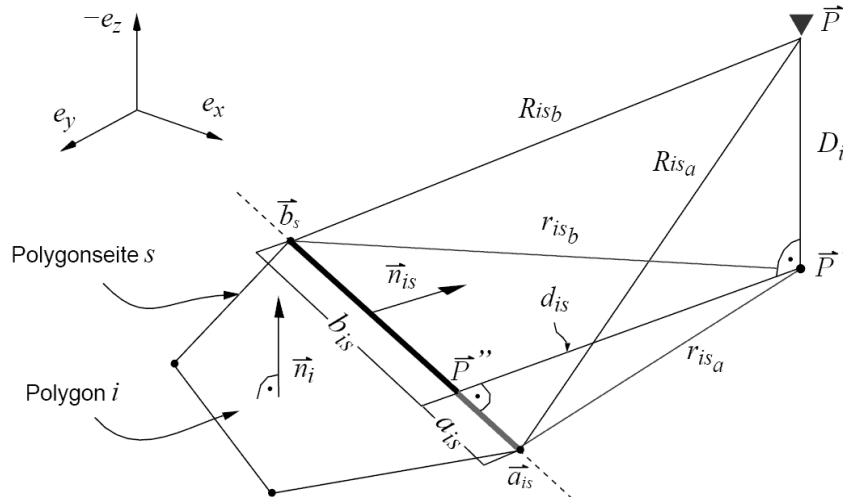


Abbildung 7: Geometrische Größen für die Berechnung des Potentialfeldeffekts eines Polyeders. \vec{P}' entsteht durch die orthogonale Projektion des Aufpunkts \vec{P} in die Ebene der polygonalen Seitenfläche i des Polyeders. \vec{P}'' entsteht durch die orthogonale Projektion von \vec{P}' auf die betrachtete Polygonseite s . a_{is} wird immer mit einem positiven und b_{is} immer mit einem negativen Vorzeichen verwendet. (Abbildung nach Alvers, 1998)

Des Weiteren gilt $\delta_1 = +1$, wenn die nach außen gerichtete Kantennormale \vec{n}_{is} in der Flächenebene mit $\vec{n}_i \cdot \vec{n}_{is} = 0$ in den Halbraum gerichtet ist, der die Projektion von \vec{P} auf die Flächenebene (\vec{P}' , Abb. 7) enthält. Andernfalls gilt $\delta_1 = -1$. Für $AB > -1$ gilt $\delta_2 = 0$, für $AB < -1$ und $B < 0$ gilt $\delta_2 = +1$ und für $AB < -1$ und $B > 0$ gilt $\delta_2 = -1$. In Abb. 7 sind die Beziehungen zwischen den oben beschriebenen geometrischen Parametern skizziert. Eine ausführliche Herleitung des gravimetrischen Effektes eines Polyeders wird in Götze (1976) und Götze (1984) beschrieben. Über dieses Verfahren kann nicht nur das Attraktionspotential V und dessen Ableitung in vertikaler Richtung $\frac{\partial V}{\partial z_P} = V_z$ (Vertikalkomponente der Schwere), sondern auch die beiden horizontalen Schwerefeldkomponenten V_x und V_y sowie die räumliche Ableitung der Schwerefeldkomponenten (2. Ableitungen des Potentials, $V_{xx}, V_{xy}, V_{xz}, V_{yy}, V_{yz}, V_{zz}$) für einen geschlossen triangulierten Körper bestimmt werden. Die Berechnung der gravimetrischen Größen nach dem hier beschriebenen Verfahren wurde in dieser Arbeit basierend auf älteren Implementierungen in FORTRAN, JAVA und Matlab (S. Schmidt, 2013, pers. Komm.; N. Holzrichter, 2015, pers. Komm.) in Matlab reimplementiert. Dafür wurde der existierende Code überarbeitet, vereinheitlicht und für Matlab optimiert (siehe Anhang C, Funktionen `calcGravity.m` und `function_getMeshGravity.m`).

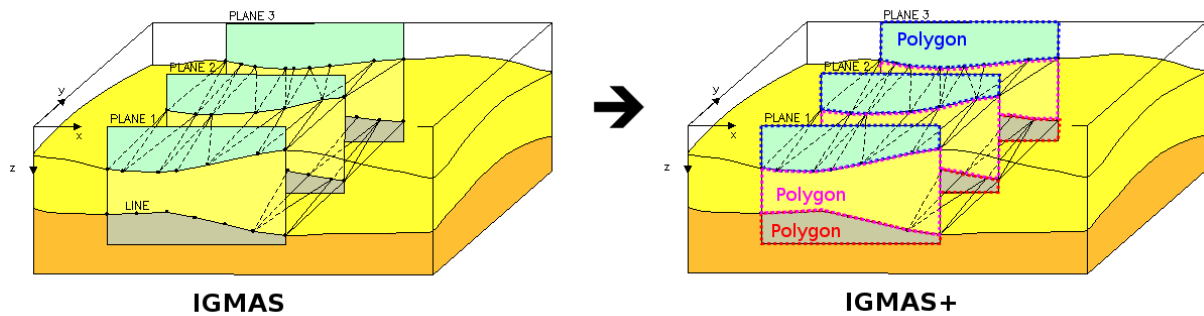


Abbildung 8: IGMAS Geometrie, bestehend aus vertikalen Sektionen (Plane 1-3), Linienzügen (links, schwarze Linien mit schwarzen Knoten) und triangulierten Grenzflächen (gestrichelte schwarze Linien). Anstelle der einzelnen Linienzüge werden in IGMAS+ die aus diesen Linien gebildeten geschlossenen vertikalen Polygone (rechts, gestrichelte Linien rot, blau, magenta) auf den Sektionen als Grundelement für die Repräsentation der Modellgeometrie verwendet. (Abbildung nach Schmidt, 1996)

3.1.2 Die Erstellung von Untergrundmodellen mit der Anwendersoftware IGMAS/IGMAS+

Der oben beschriebene Ansatz zur Berechnung der gravimetrischen (und magnetischen) Feldgrößen benötigt dreidimensionale Untergrundmodelle, in denen die separaten Einheiten konstanter Dichte (oder Suszeptibilität) durch triangulierte Flächenstücke getrennt sind. Alle einem solchen Untergrundkörper zugeordneten Flächenstücke bilden die **geschlossene** triangulierte Hülle dieses Körpers. In Götze (1984) und später in Götze und Lahmeyer (1988) wurde eine Software vorgestellt, in der interaktiv solche Modelle erstellt und berechnet werden können. Aus diesem Programm ging zunächst die Anwendersoftware **IGMAS** (Interaktives **g**ravimetrisches und **m**agnetisches **A**uswerte-System; Schmidt, 1996) hervor, welche später unter der Bezeichnung **IGMAS+** (Interactive **G**eophysical **M**odelling **A**Ssistant; unter anderem Schmidt et al., 2011 und Alvers et al., 2014;) weiterentwickelt und kommerzialisiert wurde. Um sicherzustellen, dass bei der Modellierung immer eine geschlossene Hüllgeometrie entsteht, wird in IGMAS/IGMAS+ die Geometrie über parallele vertikale Ebenen (*Sektionen*) aufgebaut (siehe Abb. 8). Der Anwender definiert für einen Untergrundkörper erst eine Parametrisierung und dann die Geometrie dieses Körpers, indem er auf jeder beteiligten Sektion die Lage des Körpers über einen geschlossenen Linienzug angibt. Dieses Polygon (Abb. 8, links) definiert die äußere Hülle des Körpers auf dieser Sektion. Die Eckpunkte der Polygone in IGMAS/IGMAS+ werden im Folgenden als Geometrie-knoten des Modells bezeichnet. Gleichzeitig wird durch einen Teil des Polygons (Linienzug) (Abb. 8, links) die Grenze zu einem benachbarten Körper auf dieser Sektion angegeben. Basierend auf allen Linienzügen zwischen zwei definierten Nachbarkörpern wird durch die Software ein trianguliertes Flächenstück (*Interface*) aufgebaut, welche die dreidimensionale Grenzfläche zwischen diesen Körpern beschreibt und gleichzei-

tig einen Teil der Hüllgeometrie der beiden Körper repräsentiert. Alle Interfaces, die einen Körper begrenzen, werden für die Berechnung der Potentialfeldgrößen zur geschlossenen triangulierten Hülle dieses Körpers zusammengefasst.

Die Polygone können jederzeit durch den Anwender interaktiv angepasst werden. Die Software adaptiert darauf hin automatisch die zugehörigen Interfaces und aktualisiert die berechneten Feldgrößen. Da sich das verwendete Berechnungsverfahren und die Veränderung der triangulierten Geometrie sehr gut optimieren lassen, ist diese Aktualisierung in Echtzeit möglich, solange die Anzahl der Berechnungspunkte und Interfacedreiecke nicht zu groß wird. Für den Fall, dass die Anzahl der Berechnungspunkte (*Stationen*) und der Dreiecke im Modell zu groß ist, wurden im Zuge dieser Arbeit Verfahren entwickelt, um entweder die Anzahl der Stationen zu verringern oder die Triangulation für die Berechnung zu vereinfachen. Darauf wird in Abschnitt 4 näher eingegangen werden.

Die grundlegende "Modellphilosophie" von Götze (1984) ist über die Zeit unverändert beibehalten worden, auch wenn sich Implementierung und Modellrepräsentation verändert haben. Die veränderte Repräsentation bei der Speicherung der Modellinformationen zwischen IGMAS und IGMAS+ erschwert die Verwendung von in IGMAS erstellten Modellen in IGMAS+. Dies wird in Abschnitt 3.2 anhand einer praktischen Anwendung beschrieben.

Um Modellinformationen aus IGMAS+ auch außerhalb der kommerziellen Software nutzen und bearbeiten zu können, wurde in dieser Arbeit eine Matlab-Schnittstelle für das XML-basierte Exportformat der Software entwickelt. Die Matlab-Klasse `IGMASModel` (siehe Anhang C, `IGMASModel.m`) ermöglicht den Import und Export aller Modellinformationen nach und aus Matlab und erlaubt so den uneingeschränkten algorithmischen Zugriff auf diese Informationen.

3.1.3 Anforderungen an eine externe, triangulierte Geometrie

Neben direkt mit IGMAS/IGMAS+ generierten Modellgeometrien können auch andere, externe Geometriemodelle für eine Berechnung der gravimetrischen (und magnetischen) Feldgrößen verwendet werden. Diese Geometrien müssen bestimmten Anforderungen genügen, um ein korrektes, verlässliches Berechnungsergebnis zu gewährleisten. Diese Anforderungen werden für Geometrien, die in IGMAS/IGMAS+ erstellt wurden, bereits durch die Software sichergestellt, solange der Anwender die Modelle gemäß der verwendeten "Philosophie" erstellt. Für externe Geometrien müssen die Anforderungen durch den Anwender geprüft und deren Entsprechung sichergestellt werden.

Da das Verfahren nach Götze (1976) nur für geschlossene triangulierte Polyeder gilt, müssen zum Beispiel die verwendeten triangulierten Hüllen immer **konsistent** geschlossen sein und dürfen keine Selbstüberschneidungen oder Überschneidungen mit an-

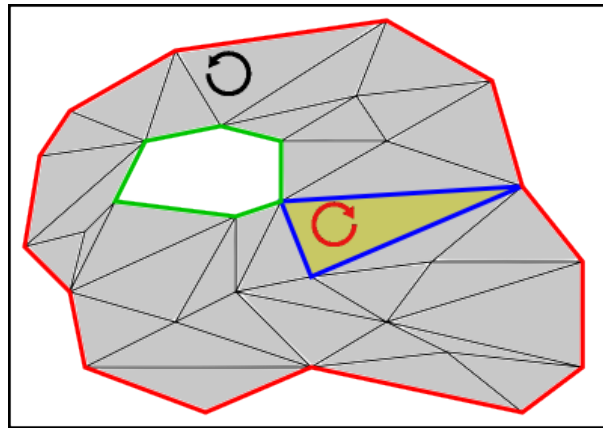


Abbildung 9: Äußere Grenze (rot) und innere Grenze (Grün) einer nicht-konsistent geschlossenen Triangulation. Blau markiert eine topologische Grenze zu Dreiecken mit inverser Drehrichtung (gelbes Dreieck). Die Drehrichtung ist definiert durch den schwarzen (normale) und roten (inverse) Pfeil. Alle grauen Dreiecke weisen eine "normale" Drehrichtung auf.

deren Hüllgeometrien aufweisen. *Konsistent geschlossen* bedeutet, in diesem Fall, dass die Hüllgeometrie keine inneren topologischen Grenzen aufweisen darf. Dazu gehören zum Beispiel fehlende Dreiecke ("Löcher") in der Triangulation. Auch müssen alle Dreiecke im gleichen Drehsinn definiert sein und so alle Dreiecksnormalen konsistent entweder ins Körperinnere oder nach Außen zeigen. Der Drehsinn eines Dreiecks $T(id_i, id_j, id_k)$ ergibt sich durch die in der Definition verwendete Reihenfolge der Indices für die dieses Dreieck aufspannenden Geometrieknoten \vec{P}_i , \vec{P}_j und \vec{P}_k . Ein Geometrieknoten $\vec{P}_i = (id_i, x_i, y_i, z_i)$ wird im Folgenden immer über seinen Index id_i und seine Koordinaten im Raum (x_i, y_i, z_i) beschrieben. In der praktischen Geomodellierung werden komplizierte Geometrien meist nicht initial als eine einzige triangulierte geschlossene Hülle modelliert, sondern diese Hülle wird aus verschiedenen separaten Flächenstücken gebildet. Abhängig von den dabei verwendeten Verfahren werden die oben beschriebenen Anforderungen an die Konsistenz nicht automatisch überprüft und korrigiert. Dies muss meist nachträglich durch den Anwender geleistet werden.

3.1.4 Konsistenzprüfung

Ob eine Dreiecksvermaschung konsistent geschlossen ist, lässt sich leicht überprüfen. Jede Dreieckskante $e(id_i, id_j)$ ist definiert als eine topologische Verbindung zwischen den Geometrieknoten \vec{P}_i und \vec{P}_j und wird über den Knotenindex id_i ihres Anfangsknoten und den Index ihres Endknotens id_j repräsentiert. Für jede Dreieckskante $e(id_i, id_j)$ muss eine Gegenkante $e(id_j, id_i)$ definiert sein. Ist anstelle einer Gegenkante die Kante $e(id_i, id_j)$ doppelt in der Kantendefinition vorhanden, deutet dies auf Dreiecke mit unterschiedlich definierter Drehrichtung und damit nicht konsistenter Normalenrichtung in der Triangulation hin. Ist keine Gegenkante vorhanden und eine Kante

auch nicht verdoppelt, wird diese Kante im Folgenden als *Randkante* bezeichnet. Sie ist damit Teil der äußeren oder inneren Grenze der Triangulation. Äußere Grenzen treten immer dann auf, wenn ein Flächenstück kein Teil einer geschlossenen Hülle ist und repräsentieren die äußere Begrenzung der Triangulation. Innere Grenzen umschließen Löcher in der Vermaschung, also lokale Regionen mit fehlenden Dreiecken. Diese möglichen Grenzen sind in Abb. 9 skizziert. Sind die Randkanten bekannt, können diese zu geschlossenen Linienzügen und damit zu Grenzpolygonen (rotes und grünes Polygon in Abb. 9) sortiert werden. Dies geschieht unter der Annahme, dass jede separate Grenze durch einen geschlossenen Ring von Randkanten repräsentiert wird und dabei zwei aneinandergrenzende Randkanten $e(id_i, id_j)$ und $e(id_j, id_k)$ den selben Geometrieknoten \vec{P}_j als einen der begrenzenden Knoten verwenden.

Weist eine triangulierte Hülle solche topologischen Inkonsistenzen auf, lassen sich diese meist nachträglich korrigieren. Dafür werden zunächst alle Flächenstücke der Hülle separat auf Inkonsistenzen bezüglich der Normalenrichtung und innere Grenzen geprüft. Regionen mit fehlenden Dreiecken können geschlossen werden, indem das zugehörige Grenzpolygon nachträglich trianguliert wird, wie in Abb. 10 (oben) schematisch gezeigt wird. Dafür kann zum Beispiel der in Schroeder et al. (1992) beschriebene "Loop-Split" Ansatz verwendet werden. Dieser erlaubt auch die Triangulation konkaver ebener Polygone und ist in der beiliegenden Matlab-Funktion `function_TriangulateFlatPolygon.m` (Anhang C) zur Verwendung für die hier beschriebenen Arbeiten implementiert. Dreiecke mit unterschiedlichem Drehsinn innerhalb eines Flächenstücks können korrigiert werden, indem ein Drehsinn vorgegeben und alle Dreiecksdefinitionen in diesen überführt werden. Sind alle Interfaces in sich konsistent, muss geprüft werden, ob die äußere Grenze zweier angrenzender Flächenstücke geometrisch identisch ist. Beide Flächenstücke müssen auf ihrer gemeinsamen Grenze die gleichen Randknoten verwenden. Ist dies nicht der Fall, muss diese Grenzlinie manuell oder algorithmisch vereinheitlicht werden, wie in Abb. 10 (Mitte) schematisch gezeigt wird. Ist die Grenze komplett geometrisch verschieden, ist es sinnvoll, die Randknoten und -dreiecke an der Grenze einer der beteiligten Flächen zu löschen und diese durch die Knoten der verbliebenen Grenze des zweiten Flächenstücks zu ersetzen. Danach muss die Triangulation an die neuen Knoten angepasst werden. Wenn auf diese Weise alle Grenzen zwischen angrenzenden Interfaces vereinheitlicht worden sind, muss noch abschließend geprüft werden, ob die Drehrichtungen der Dreiecke in allen beteiligten Teilflächen einer Hülle konsistent sind. Für die Interfaces, in denen die Drehrichtung abweicht, muss die Dreiecksdefinition konsistent invertiert werden (siehe Abb. 10, unten).

Um die Hülle auf Selbstüberschneidungen oder Überschneidungen zwischen verschiedenen Hüllen zu untersuchen, kann der oben beschriebene Test auf topologische Konsistenz nicht verwendet werden, da Überschneidungen sich nicht notwendigerweise

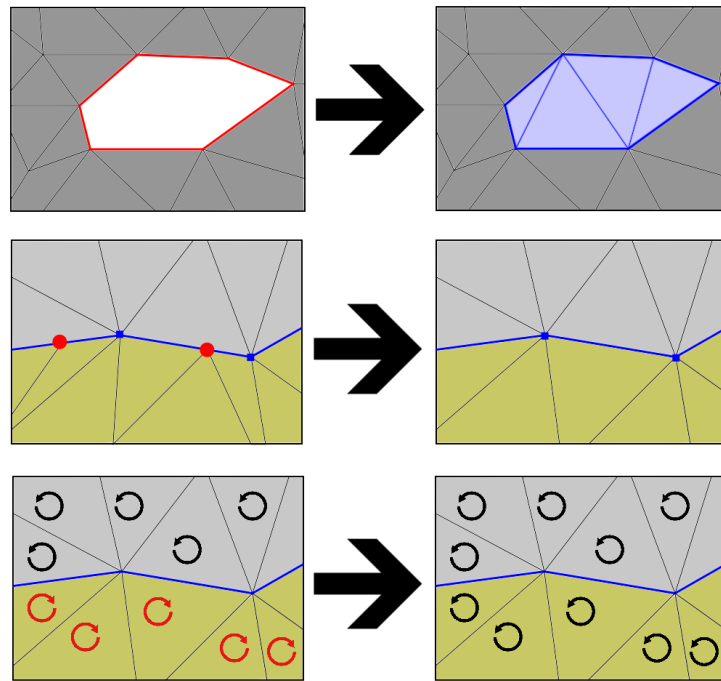


Abbildung 10: Möglichkeiten der Korrektur verschiedener topologischer Inkonsistenzen in einem triangulierten Körper. Oben: Ersetzen fehlender Dreiecke (rot) durch Neutriangulation der "offenen" Region (blau). Mitte: Vereinheitlichung der Grenzkannten zwischen benachbarten Teilflächen (grau und gelb). Randknoten, die nur von einer Teilfläche verwendet werden (rot), müssen entweder aus dieser entfernt oder in die Grenze der zweiten Teilfläche integriert werden. Unten: Vereinheitlichung der Dreiecksorientierung zwischen allen beteiligten Flächenstücken.

als topologische Fehler aus der Definition der Dreiecke und Dreieckskanten ergeben. Es stehen dafür andere, sehr effiziente Verfahren aus der Computergrafik, zum Beispiel Möller (1997) oder Tropp et al. (2006), zur Verfügung. Diese beiden Ansätze wurden zusammen mit einem sehr elementaren Ansatz über den Schnitt zweier Ebenen in dieser Arbeit implementiert (siehe Anhang C, Funktionen `function_TriFaceOverlap.m` und `function_TriFaceOverlapV2.m`). Eine Korrektur von auftretenden Überschneidungen ist, im Gegensatz zu topologischen Inkonsistenzen, nachträglich nur sehr schwer möglich. Dafür muss auf die zur initialen Erstellung der Geometrien verwendeten Verfahren und Modellierungsumgebungen zurückgegriffen werden, um die Geometrien zu überarbeiten.

3.2 Anwendungsbeispiel KTB: Portierung und Überarbeitung des Dichtemodells der Kontinentalen Tiefbohrung

In diesem Abschnitt wird eine Anwendung beschrieben, bei der eine Schnittstelle entwickelt wurde, um Informationen eines Dichtemodells aus der Software IGMAS in die Software IGMAS+ zu portieren. Beide Programme basieren auf der in Götze (1984) beschriebenen Modellphilosophie, verwenden aber wie oben beschrieben unterschiedliche Repräsentationen für Import und Export der erstellten Geometrien und Parametrisierungen. Im Anschluss an die Übertragung in das IGMAS+ Modellformat muss der durch die Portierung auftretende Informationsverlust durch eine manuelle Überarbeitung des Modells ausgeglichen werden, um es in IGMAS+ uneingeschränkt bearbeiten und berechnen zu können.

3.2.1 Einführung und Motivation

Im DGMK-Projekt TiPOT3D (Götze et al., 2015c; Götze et al., 2016) sollte unter anderem eine neue Funktionalität zur Auswertung und Vorwärtsmodellierung von in Bohrlöchern gemessenen Potentialfeldern in die Software IGMAS+ integriert werden. Um die neuen Funktionen testen und demonstrieren zu können, wurde ein Untersuchungsgebiet benötigt, für das neben gemessenen Potentialfeldinformationen (Schwere und/oder Magnetik) auch ebenfalls in einem Bohrloch gemessene Potentialfelddaten und weitere geophysikalische Messungen frei verfügbar vorliegen. Zudem sollte bereits ein Dichte- und/oder Suszeptibilitätsmodell für dieses Gebiet vorhanden sein, da es nicht das Ziel war, ein solches Modell komplett neu aufzubauen. Viel mehr sollte das existierende Modell anhand der aus dem Bohrloch gewonnenen Informationen erweitert und validiert werden.

Das gewählte Testgebiet ist das Areal um die "Kontinentale Tiefbohrung" (KTB) bei Windischeschenbach (Oberpfalz, Bayern, Deutschland). Zwischen 1987 und 1994 wurden hier zwei Bohrungen durchgeführt (Emmermann und Rischmüller, 1990). Die Pilotbohrung mit einer Tiefe von 4000 m entstand zwischen 1987 und 1989 durchgeführt, die Hauptbohrung mit einer Tiefe von 9101 m zwischen 1990 und 1994. Die Hauptbohrung ist damit das zweit tiefste jemals abgetäufte und aktuell das tiefste noch zugängliche Bohrloch der Welt. Das Ziel des Projekts war eine umfassende geowissenschaftliche Erkundung der Suturezone zwischen Saxothuringikum und Moldanubikum. Neben verschiedenen anderen geophysikalischen Messungen führte man während der Projektphase auch hochauflösende 2D und 3D Seismikmessungen sowie Messungen der Schwere und des Magnetfelds sowohl an der Oberfläche als auch in den Bohrlöchern durch. Auf Basis der Oberflächenschwerefeldmessungen sowie zusätzlicher Randbedingungen aus Geologie und 2D Seismik wurde ein Dichtemodell des Areals um die Bohrungen erstellt. Dafür wurde das Softwarepaket IGMAS verwendet. Cas-

ten et al. (1997) publizierte die ersten Ergebnisse dieser Modellierung, während Heyde (1999) diese weiter verfeinert

Im Folgenden wird erläutert, wie das initiale Dichtemodell im Gebiet der KTB in die aktuelle Software IGMAS+ übertragen wurde und welche Überarbeitungen notwendig waren, um das Modell uneingeschränkt in IGMAS+ nutzen zu können. Das Ziel ist es, das ursprüngliche Modell in der aktuellen Softwareversion mit neuen Randbedingungen neu zu interpretieren und gegebenenfalls anzupassen. Für die initiale Modellerstellung konnten die Bohrlochmessungen sowohl direkt über die gemessenen Anomalie, als auch indirekt, über die Bestimmung von vertikalen Dichteänderungen, verwendet werden. In der Software IGMAS+ war dies lange nicht möglich und wurde erst vor kurzem wieder in die Software integriert. Mittels des IGMAS Modells der KTB soll dieses reintegrierte Tool getestet und validiert werden. Die Ergebnisse der 3D seismischen Messungen konnten nicht in die Geometrie des Dichtemodells mit einfließen.

3.2.2 Übertragung der Modellinformationen

Das IGMAS-Modell der KTB wurde mittels einer in dieser Arbeit implementierten Matlab-Klasse (siehe Abschnitt 3.1.2) in das aktuelle IGMAS+-Modellformat übertragen. Eine dafür implementierte separate Funktion erlaubt es, das Modell in der vorliegenden IGMAS-Modellrepräsentation zu laden und die Daten in das aktuell gültige IGMAS+-XML-Format zu übertragen. Beide Modellrepräsentationen verwenden lesbare ASCII-Dateien mit unterschiedlicher Formatierung zur Speicherung der Informationen. Dies erleichtert eine automatische Verarbeitung der Daten. Die Informationen über die Geometrieknoten auf den Modellsektionen liegen in beiden Formaten als indizierte Punktliste vor, die leicht übertragbar ist. Auch die Informationen für die vorhandenen Untergrundkörper (z.B. Name, Parameterart und -wert usw.) konnte problemlos übernommen werden. Die Übertragung der Modelltopologie erwies sich als aufwendiger. Beide Repräsentationen basieren zwar auf einer aus vertikalen Sektionen aufgebauten Geometrie, verwenden aber unterschiedliche Konzepte (siehe Abb. 8) zur Speicherung. In IGMAS liegt die Topologie "Interface-zentriert" vor. Dies bedeutet, dass die Topologieinformationen immer auf der Grenzfläche ("Interface") zwischen zwei Dichtekörpern basieren. Für jedes Interface sind die Linienzüge auf allen beteiligten Sektionen über eine Liste der verwendeten Punktindices angegeben. Zwischen diesen Linienzügen konnte die Software die Triangulation für diese Fläche aufbauen. Für jedes Flächenstück sind zusätzlich die beiden aneinander grenzenden Körper definiert, die an diesem Interface vorliegende Dichtedifferenz ist also explizit bekannt. Die gegebenen Linienzüge konnten auch als geschlossene Ringe definiert sein. Die darüber definierten Hüllflächen der betreffenden inneren Körper haben keinen geometrischen Bezug zu den umgebenden Körpern. Dieser Bezug war nicht unbedingt notwendig, da die Berechnung des Schwerefeldeffekts zusätzlich zu der Dreiecksgeometrie nur auf der

an einem Interface gegebenen Dichtedifferenz basiert.

Im aktuellen IGMAS+-XML-Format ist diese Dichtedifferenz nicht mehr explizit bekannt, da die Topologieinformationen "Körper-zentriert" vorgehalten werden. Für jede Modellsektion wird die Modelltopologie über die vertikalen Schnittpolygone der Untergrundkörper vorgehalten. Jedes Polygon wird dabei als geschlossener Linienzug über die Indices der beteiligten Geometrieknoten definiert. Die Grenzlinie zwischen zwei benachbarten Polygonen auf einer Sektion, welche analog zu einem Linienzug im IGMAS Format ist, wird von der Software automatisch ermittelt, aber nicht gespeichert. Die Dichtedifferenz an diesem Linienzug liegt also nicht mehr explizit vor. Wenn die Software erkennt, dass für einen Linienzug kein Teil der Grenze eines Nachbarpolygons vorliegt, wird automatisch angenommen, dass es sich um eine Grenze zur Modellaußenumgebung handelt.

Für die Übertragung der Modelltopologie mussten aus den bekannten Linienzügen die geschlossenen Polygondefinitionen ermittelt werden. Dafür wurden alle gegebenen Liniensegmente erst nach den zugehörigen Sektionen sortiert. Für eine Sektion wird dann für jeden im Gesamtmodell bekannten Dichtekörper überprüft, ob sich mindestens ein zugehöriges Liniensegment auf dieser Sektion befindet. Wenn ja, werden alle zugehörigen Liniensegmente zu geschlossenen Ringen zusammengefasst. Diese definieren die Polygone für den jeweiligen Körper auf dieser Sektion. Für die im IGMAS-Format als "geschlossen" definierten Linienzüge werden bei der Portierung nur die Polygone für den Körper erzeugt, der sich im Inneren befindet. Der Linienzug für den äußeren Körper stellt kein Polygon an sich dar, sondern eine innere Grenze des umgebenden Polygons. Solche inneren Grenzen werden in IGMAS+ nicht unterstützt und demzufolge ignoriert. Dies führt allerdings dazu, dass die bekannte Dichtedifferenz zur Umgebung eines Körpers in diesem Fall verloren geht, da nur die absolute Dichte für den inneren Körper abgespeichert wird. Das entstandene (innere) Polygon ist weder topologisch noch geometrisch mit dem umgebenden Modell verknüpft und überlagert mindestens ein anderes, mit dem Gesamtmodell verbundenes, Polygon. Solche überlagernden Polygone können innerhalb der Software IGMAS+ nicht vom Anwender selbst erzeugt werden, werden aber als valide Modellbestandteile akzeptiert, wenn sie Teil eines importierten Modells sind. IGMAS+ nimmt jedoch für diese Polygone eine Dichtedifferenz zur äußeren Modellumgebung (Referenzdichte) und nicht zum umgebenden Dichtekörper an. Diese Annahme ist allerdings immer dann nicht korrekt, wenn die Dichte des Polygons, welches überlagert wird, nicht der Referenzdichte entspricht.

Das KTB-Dichtemodell weist nach der Übertragung in das IGMAS+-Modellformat auf allen 37 Sektionen für 32 der 46 vorhandenen Dichtekörper diese Art von überlagernden Polygonen auf. Es kann ohne Fehler von der Software geladen und der Schwerfeldeffekt kann berechnet werden. Der berechnete Effekt der vertikalen Schwerfeldkomponente (g_z) und der Unterschied zur gemessenen Vertikalschwere ist in Abb. 11

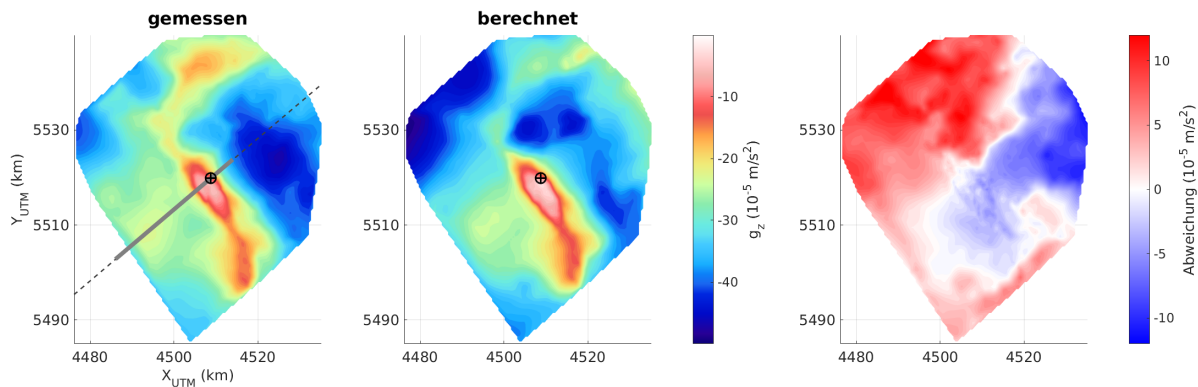


Abbildung 11: Gemessene (links) und berechnete (Mitte) Bouguer-Anomalie im Gebiet der KTB vor der Überarbeitung des Dichtemodells. Das Residualfeld (rechts) weist eine maximale Abweichung von über $10 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ und eine Standardabweichung von mehr als $4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ auf. Die Position der KTB Hauptbohrung ist mit einem schwarzen Symbol auf der linken und mittleren Karte markiert. Die Lage der zentralen, 18. Modellsektion ist über eine gestrichelte Linie in der linken Teilabbildung dargestellt. Die Modellgeometrie auf dieser Sektion vor der Überarbeitung ist in Abb. 12 dargestellt.

dargestellt. Die gemessene Schwereanomalie (dargestellt als Bouguer-Anomalie) weist in der Mitte des dargestellten Feldes ein ausgeprägtes Maximum auf, an dessen nordwestlichen Rand sich die beiden Bohrungen der KTB befinden (schwarzes Symbol in Abb. 11 und Abb. 14). Die gemessenen Schweredaten wurden in Casten et al. (1997) und Heyde (1999) bereits ausführlich beschrieben. In der linken Teilabbildung von Abb. 11 ist die zentrale vertikale Sektion (18. Modellsektion) des ursprünglichen Modells durch eine gestrichelte Linie markiert. Auf dieser Sektion befindet sich auch die KTB Hauptbohrung. Das Residualfeld ist mit einer maximalen Abweichung von über $10 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ und einer Standardabweichung von mehr als $4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ sehr viel ausgeprägter als der in Casten et al. (1997) und Heyde (1999) beschriebene Modellierfehler von bis zu maximal $3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$. Der Einfluss des Informationsverlustes auf das Berechnungsergebnis durch die Übertragung in das IGMAS+ XML-Format ist also erheblich.

3.2.3 Überarbeitung der KTB Modelltopologie

Um wieder ein ähnliches Berechnungsergebnis wie Casten et al. (1997) zu erhalten, musste das Modell nach der erfolgreichen Portierung überarbeitet werden. Dafür gibt es zwei grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten. Diese werden im Folgenden auch anhand eines Ausschnittes der zentralen Modellsektion (durchgezogene graue Linie in der linken Teilabbildung von Abb. 11) exemplarisch dargestellt. Der gezeigte Ausschnitt erstreckt sich immer von der Modelloberkante ($Z = 0 \text{ km}$) bis in eine Tiefe von 12.5 km ($Z = -12.5 \text{ km}$). Dieser Teil der zentralen Sektion wurde gewählt, weil sich im mittleren Teil dieses Ausschnittes mehrere markante Polygone befinden, welche von dem oben beschriebenen Informationsverlusten betroffen sind (siehe Abb. 12) und sich

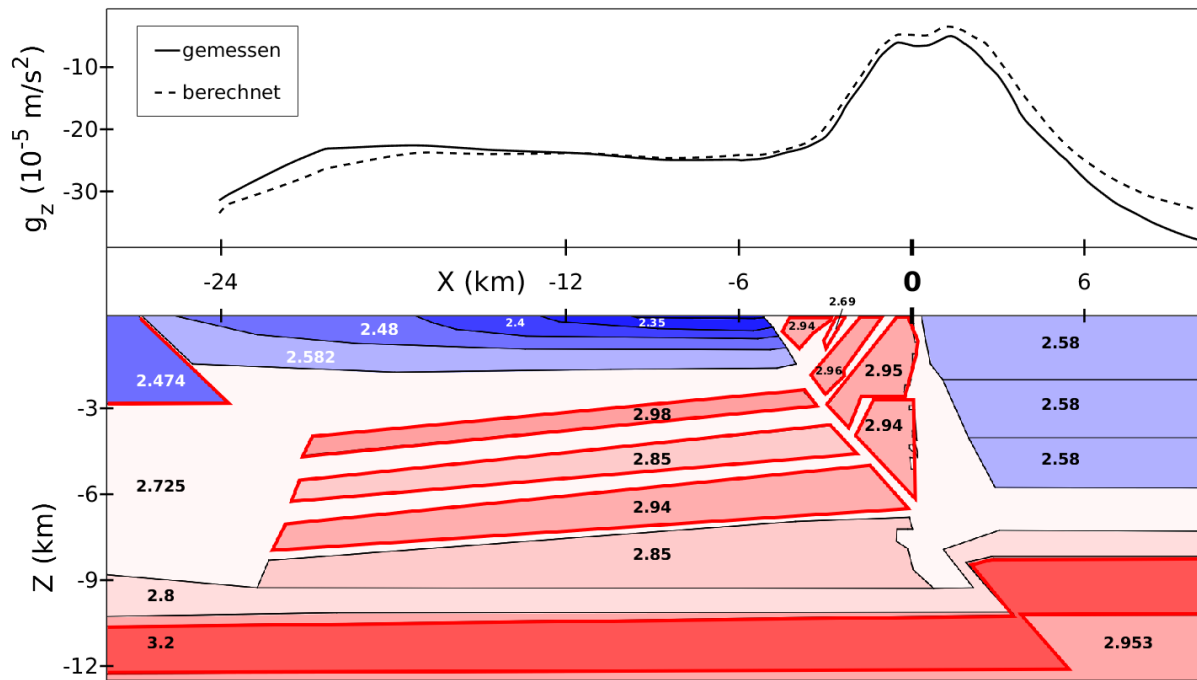


Abbildung 12: Zentrale Modellsektion des initialen KTB Dichtemodells. Alle Körperpolygone mit roter Umrandung müssen aufgrund des Informationsverlustes bei der Konvertierung in das neue Modellformat angepasst werden, um die Abweichung zwischen berechnetem Schwerefeldeffekt und gemessener Schwere auszugleichen. Alle Polygone sind mit den zugewiesenen Dichtewerten beschriftet. Die Dichte ist in (t/m^3) angegeben.

so die notwendigen Änderungen gut demonstrieren lassen.

Die **erste Möglichkeit** der Modellanpassung ist die manuelle Integration der derzeit fehlerhaft berechneten Polygone in die überlagerte Geometrie und Topologie des Gesamtmodells. Dies hat zwei Vorteile. Zum einen müssen die Dichtewerte der Körper nicht angepasst werden und zum anderen ist eine nachträgliche Änderung der Geometrie sehr einfach möglich. Allerdings ist dieses Vorgehen sehr aufwendig, da jedes einzelne überlagernde Polygon separat bearbeitet werden muss. In Abb. 12 ist exemplarisch ein Ausschnitt der zentralen Sektion des Dichtemodells vor und in Abb. 15 nach der Überarbeitung der Polygontopologie dargestellt. Nach der Überarbeitung sind alle vorher freien Polygone (rote Umrandung in Abb. 12) mit der Modellumgebung durch schwarze Linien verbunden.

Die zweite Möglichkeit ist das Abändern der Dichten der überlagernden Polygone, so dass die neue überlagerte Dichte der alten Absolutdichte entspricht mit $\rho_{neu} = \rho_{alt} - \rho_{Hintergrund}$. ρ_{neu} ist dabei die neue relative Dichte des überlagernden Polygons, ρ_{alt} die gegebene Dichte des Polygons und $\rho_{Hintergrund}$ die Dichte des überlagerten Polygons. Der Arbeitsaufwand ist signifikant geringer als beim Vorgehen über die geometrisch-topologische Integration der betreffenden Polygone, da Dichtewerte global (und nicht für jedes Polygon separat) angepasst werden können. Zudem wäre es möglich, die-

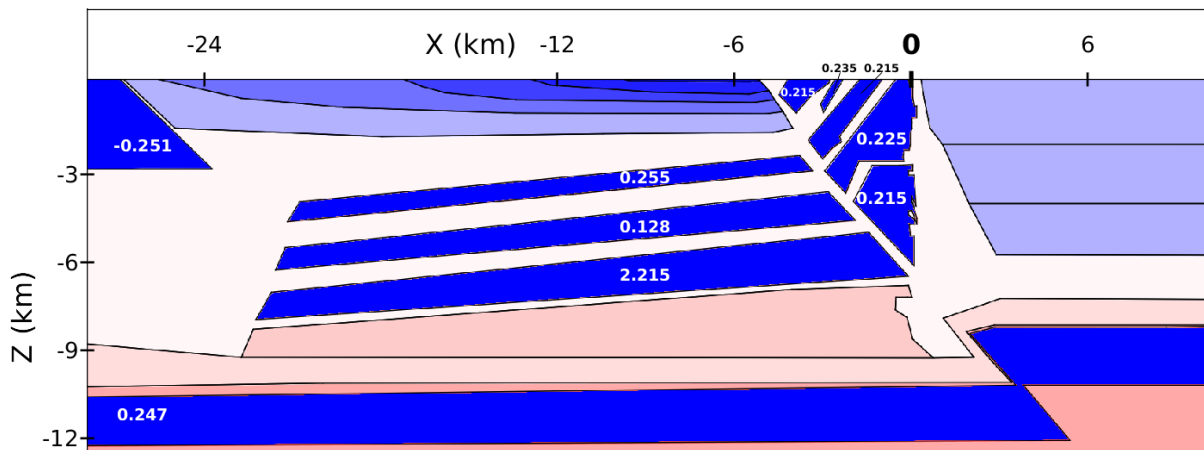


Abbildung 13: Beispiel für die Überarbeitung des initialen KTB Dichtemodells über die Änderung der Dichtewerte für einen Ausschnitt der zentralen Modellsektion. Für alle zu überarbeitenden Polygone (Abb. 12, rote Umrandung) sind die geänderten relativen Dichten angegeben. Alle anderen Dichtewerte bleiben unverändert.

se Änderungen bereits bei der Konversion aus dem alten Modellformat automatisch durchzuführen. Gegebenenfalls müssen dafür neue Dichtekörper mit relativen Dichtewerten ρ_{neu} erzeugt und den überlagernden Polygonen zugewiesen werden. In Abb. 13 ist exemplarisch ein Ausschnitt der zentralen Sektion des Dichtemodells nach der Überarbeitung der Dichtewerte dargestellt. Die geänderten Dichten sind in den betreffenden Polygonen angegeben. Das Modell kann durch diese Anpassung zwar korrekt berechnet werden, allerdings bleibt die entkoppelte Topologie der überlagernden Polygone erhalten und eine spätere Geometrieanpassung ist massiv erschwert. Aus diesem Grund wurden die notwendigen Änderungen nur exemplarisch für die zentrale Modellsektion demonstriert und nicht auf das gesamte Modell angewendet.

Da das konvertierte und überarbeitete Modell in einem nächsten Schritt an neue Randbedingungen angepasst werden soll und dafür nicht unerhebliche Geometrieänderungen notwendig sind, wird das initiale Modell über das aufwendigere Vorgehen über geometrisch-topologische Integration angepasst. Dafür sind folgende Schritte notwendig:

1. Detektion der überlagernden Polygone
2. Export der Polygoneometrie als Punktdaten
3. Entfernen der detektierten Polygone aus dem Modell
4. Import der Polygoneometrie als visueller Randbedingung
5. Remodellierung der entfernten Polygone basierend auf ihrer ursprünglichen Geometrie innerhalb der existierenden Modelltopologie

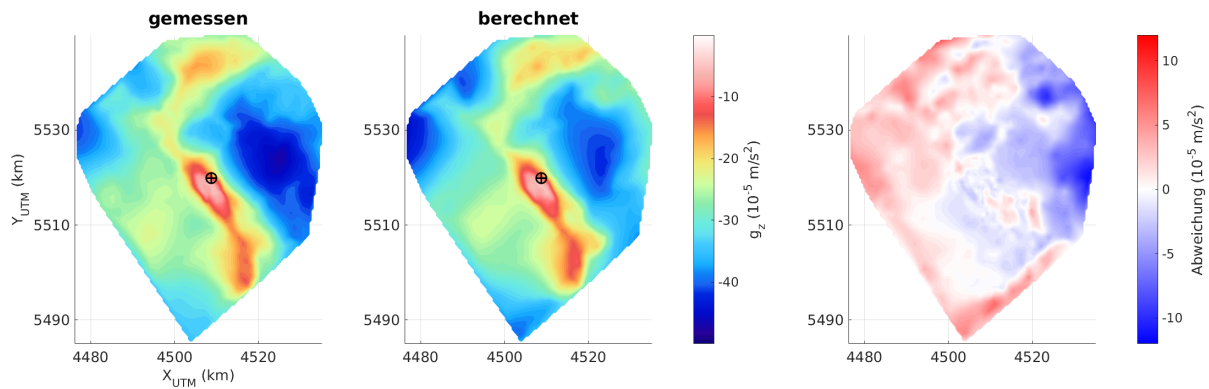


Abbildung 14: Gemessene (links) und berechnete (Mitte) Bouguer-Anomalien nach der Modellüberarbeitung. Das Residualfeld (rechts) weist jetzt eine maximale Abweichung von weniger als $10 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ und eine Standardabweichung kleiner $2.4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ auf. Die Position der KTB Hauptbohrung ist mit einem schwarzen Symbol auf der linken und mittleren Karte markiert.

Die automatische Detektion der problematischen Polygone ist einfach, da sie sich durch spezielle, einzigartige Eigenschaften von den korrekt interpretierten Polygonen unterscheiden. Sie grenzen zum Beispiel nur an den so genannten Referenzkörper, also an die äußere Modellumgebung. Zudem werden die Polygone nur durch einen geschlossenen Ring aus Kanten begrenzt, deren Knoten von keinem anderem Polygon auf dieser Sektion verwendet werden. Klassische IGMAS+ Polygone weisen im Normalfall mindestens zwei verschiedene Polylinien als Grenzen zu Nachbarpolygonen auf. Einmal detektiert, lassen sich diese Polygone leicht aus dem Modell entfernen. Um sie korrekt wieder in das Modell reintegrieren zu können, ist es notwendig, ihre initiale Geometrie auf den Modellsektionen (z.B. als Punktdaten) vorzuhalten. Im letzten Schritt werden sukzessive die Polygone wieder ins Modell eingefügt, angefangen bei ausgedehnten Körpern mit hoher Dichtedifferenz zu ihrem Hintergrund. Auf die Remodellierung von Körpern ohne Dichtedifferenz zum Hintergrund wird verzichtet, da sie keinen Einfluss auf den Schwerefeldeffekt des Modells haben.

3.2.4 Ergebnis und zukünftige Arbeiten

Der berechnete Schwerefeldeffekt und der Unterschied zum gemessenen Schwerefeld des überarbeiteten Modells ist in Abb. 14 dargestellt. Das Residualfeld weist eine maximale Abweichung von weniger als $10 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ und einer Standardabweichung von weniger als $2.4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ auf. Durch die topologische Überarbeitung konnten also die durch die Modellkonversion aufgetreten Fehler in der Berechnung zumindest teilweise ausgeglichen werden. Vor allem im Bereich um die Bohrungen entspricht die Abweichung zwischen gemessener und berechneter Schwerefeldanomalie wieder annähernd dem in Casten et al. (1997) und Heyde (1999) beschriebenen Fehler des initialen Modells. Die höheren Abweichungen an den Modellrändern lassen sich damit begründen,

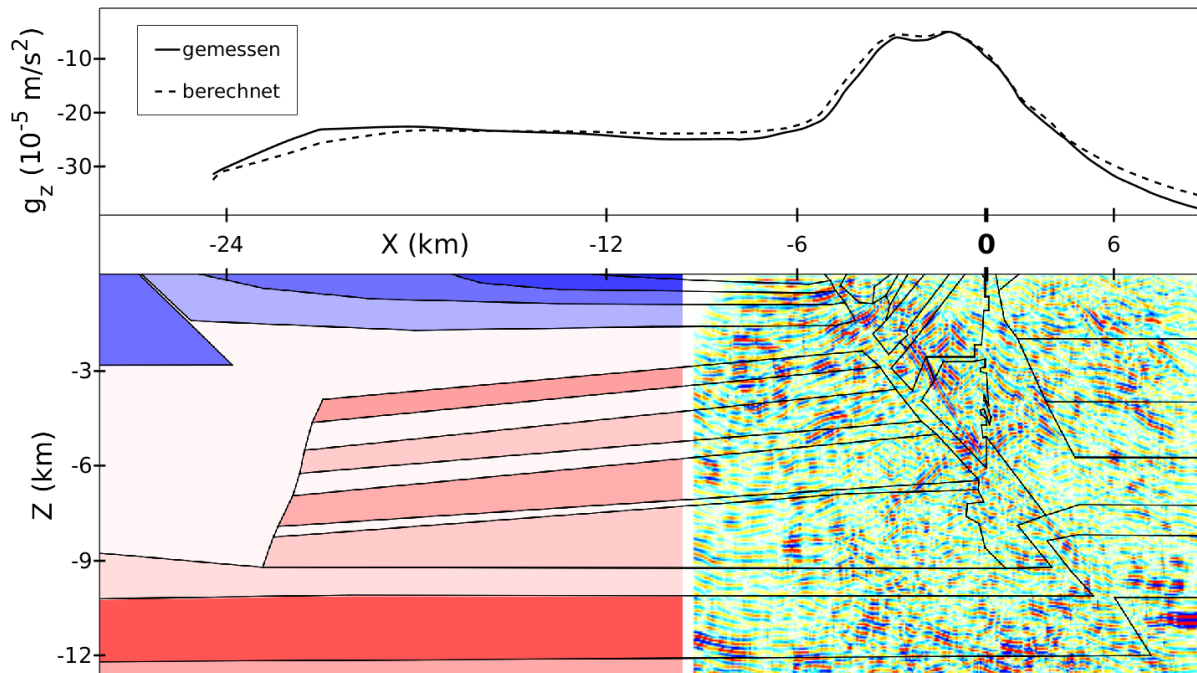


Abbildung 15: Zentrale Modellsektion des überarbeiteten Modells, überlagert mit einer Sektion aus der 3D Seismik (Körbe et al., 1997). Die Seismik erstreckt sich auf diesem Profil von $X = -10$ km bis $X = 10$ km. Die Hauptbohrung befindet sich bei Sektionskilometer $X = 0$ km. Im oberen Bildteil befinden sich die Kurven für die gemessene und berechnete Bouguer-Anomalie über diesem Sektionsausschnitt. Die Dichtewerte entsprechen Abb. 12.

dass die Software IGMAS+ eine andere Methodik zur Entfernung des Modellrandeffekts als IGMAS verwendet. Das initiale (IGMAS-)Modell wurde manuell bis zur zehnfachen Modellausdehnung erweitert. Dies verringert den Randeffekt erheblich, ist aber mit hohem zusätzlichem manuellem Modellier- und Ressourcenaufwand verbunden. In der aktuellen IGMAS+ Version wird eine in Alvers et al. (2014) beschriebene automatische Möglichkeit zur Entfernung des Randeffektes verwendet, welche eine manuelle Ausdehnung des Modells unnötig macht (Schmidt, 2014, pers. Komm.). Beide Ansätze unterscheiden sich abhängig vom Modell zum Teil sehr deutlich in ihrer Wirkung. Die Regionen am Rand des Modells spielen allerdings für die Arbeiten im Projekt TiPOT3D eine untergeordnete Rolle, da hier der Hauptfokus auf dem Nahbereich um die Bohrlöcher und auf den Bohrlöchern selbst liegt.

Durch den Transfer und die Überarbeitung der Modelltopologie kann das Modell jetzt uneingeschränkt in IGMAS+ verwendet und angepasst werden. Für die weiteren Arbeiten im Projekt TiPOT3D ist unter anderem geplant, die aktuell noch vorhandenen Abweichungen der berechneten Schwere von der gemessenen Schwere durch eine weiterführende Modellanpassung auszugleichen und dabei neben den vorhandenen Messungen der Schwere in beiden Bohrlöchern auch einen 3D-Seismik Datensatz als zusätzliche Randbedingungen zu verwenden. Die Software IGMAS+ erlaubt die direkte Integri-

on hoch aufgelöster 2D und 3D Seismik-Daten im SEG-Y Standard (Barry et al., 1975) in die Dichtemodellierung. In IGMAS war die Verwendung dieser Daten nur indirekt möglich. Einzelne georeferenzierte Rasterbilder von seismischen 2D Sektionen konnten importiert und als Randbedingung für die Modellierung auf eine Modelliersektion projiziert werden. In Abb. 15 ist die aktuelle überarbeitete Geometrie des in Abb. 12 und Abb. 13 gezeigten Ausschnitts der zentralen Modellsektion (linke Teilabbildung von Abb. 11, durchgezogene graue Linie) abgebildet. Die den Polygonen zugewiesenen Dichtewerte entsprechen weiterhin der Parametrisierung des initialen Modells (dargestellt in Abb. 12). Der rechte Teil des Sektionsausschnitts in Abb. 15 wurde mit einer Sektion aus der auch in Heyde (1999) beschriebenen 3D Seismik ISO89 (Integrated seismic Oberpfalz 1989; Stiller, 1991) überblendet. Die für die Arbeiten im Projekt TiPOT3D verwendete und in Abb. 15 gezeigte Version ist das Ergebnis der Reprozessierung dieses Datensatzes, beschrieben in Körbe et al. (1997). Ein Vergleich der Seismik mit der vorliegenden Modellgeometrie (Abb. 15) gibt Hinweise darauf, dass die Suturzohne initial nicht korrekt modelliert wurde, sondern sehr viel steiler einfällt als im Modell angenommen. Eine Anpassung der Geometrie an die neuen Randbedingungen ist also sinnvoll, auch wenn die berechnete und gemessene Schwereanomalie in diesem Teil des Modells nicht sehr stark von einander abweichen (siehe Abb. 15).

3.3 Anwendungsbeispiel Bremerhaven-Cuxhavener Rinne: Validierung des geologischen Geometriemodells mittels Gravimetrie

Eine Anwendung der Schwerefeldmodellierung mit IGMAS+ ist, neben der klassischen Erstellung von Untergrunddichteverteilungen, die Validierung von Geometriemodellen mittels ihres berechneten Schwerefeldeffekts. Im Projekt AIDA sollte das geologische Modell einer subglazialen Rinne zwischen Bremerhaven und Cuxhaven in Norddeutschland (siehe Abb. 4 und Abb. 16) erstellt und anschließend validiert werden. Das ursprüngliche Modell basiert auf der Interpretation von Bohrlochdaten und seismischen Sektionen. Dieses Modell wurde in einem zweiten Schnitt an ein Modell der Verteilung des spezifischen Widerstandes ρ_{sr} , welches über 1-D Inversion von Hub-schrauber-basierten elektromagnetischen Messungen (HFEM und HTEM) erstellt wurde, angepasst und verfeinert. Der komplette Arbeitsablauf der Modellerstellung wird in Steinmetz et al. (2015) beschrieben. Das initiale Modell hat eine Ausdehnung von rund $7.5 \text{ km} \times 7.5 \text{ km}$ und besteht aus 20 lithologischen Einheiten, die sowohl den Außenbereich als auch die Füllung der sedimentären Rinnenstruktur und deren quartäre Bedeckung abbilden. Im Anschluss an die Modellierung sollte die Modellgeometrie im Rahmen dieser Dissertation über eine Schwerevorwärtsmodellierung validiert werden. Dabei wurde geprüft, in wie weit der berechnete Schwerefeldeffekt des Modells die vorhandenen Schweremessungen im Modellgebiet erklärt. In Abb. 16 (rechts) ist die Lage

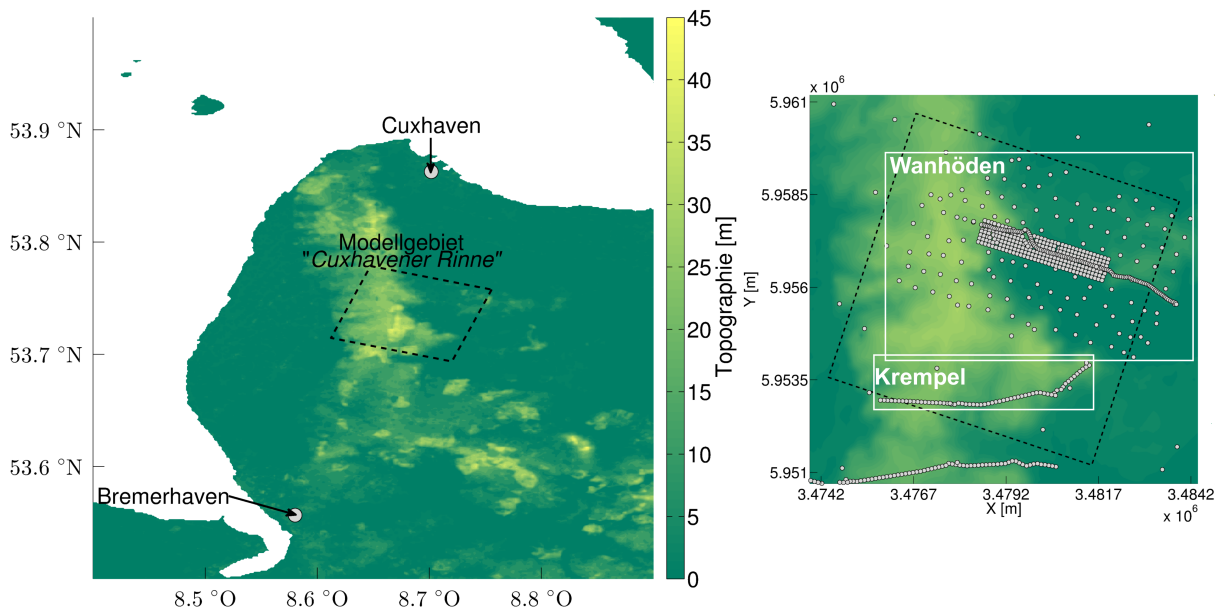


Abbildung 16: Lage des Modellgebiets "Bremerhaven-Cuxhavener Rinne" (links: 8.68° Ost, 53.75° Nord, rechts: kartesische Gauß-Krüger-Koordinaten). Die Lage und Ausdehnung des Untergrundmodells ist jeweils als gestrichelter Kasten dargestellt, die verwendeten Schweremessungen sind rechts durch graue Punkte markiert. Die weißen Kästen in der rechten Teilabbildung zeigen die Lage der in dieser Arbeit verwendeten Schwerfeldmessungen nach Rumpel et al. (2006).

der verwendeten Schweremessungen über dem Modellgebiet dargestellt. Die für die Berechnung des Schwerefeldeffekts notwendige Parametrisierung erfolgte anhand von Dichtewerten für die signifikanten Einheiten, welche aus früheren Arbeiten in diesem Gebiet (Gabriel et al., 2003; Gabriel, 2006; Rumpel et al., 2006; Rumpel et al., 2009) entnommen wurden. Vorläufige Ergebnisse der Validierung wurden bereits in Götze et al. (2014) vorgestellt. Im Folgenden werden die endgültigen Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten beschrieben.

3.3.1 Erstellung eines Dichtemodells aus einem lithologischen Modell

Um das geologische Untergrundmodell über seinen Schwereeffekt validieren zu können, müssen in einem ersten Schritt die Geometrieinformationen vom Modellierprogramm, in diesem Fall GOCAD[®] nach IGMAS+ übertragen werden. Dies wird durch das in Abschnitt 2.2.3 beschriebene und in Abb. 6 dargestellte System von Datenaustauschnittstellen gewährleistet. Die verschiedenen Untergrundkörper werden als triangulierte Hüllen im TSurf-Format aus GOCAD exportiert und in ein IGMAS+ Interfacemodell übertragen. Dazu werden unter anderem die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Matlab-Funktionen `LoadTSurf.m` und `WriteTSurfV2.m` verwendet, die einen unkomplizierten Import und Export von TSurf-Daten im Matlab ermöglichen (Anhang C). Die sonst für eine Modellerstellung in IGMAS+ notwendigen vertikalen Sektionen wer-

den für diese Anwendung nicht benötigt, da die triangulierte Geometrie bereits aufgebaut ist. Die in GOCAD erstellte Geometrie ist nicht notwendiger Weise konsistent geschlossen, da die triangulierten Hüllen der lithologischen Untergrundkörper durch geometrische Verschneidung verschiedener triangulierter Flächen erzeugt werden. Auftretende Inkonsistenzen im initialen Modell wurden, wie in Abschnitt 3.1.3 beschrieben, behoben, um die notwendigen konsistent geschlossenen Geometrien in IGMAS+ zu gewährleisten. Zusätzlich wurde die Modelloberkante vereinheitlicht und auf $Z = 0$ m gesetzt. Dies war notwendig, da der Schwereeffekt des Modells mit vorhandenen gemessenen Daten der Bouguer-Anomalie der Schwere verglichen werden sollte. Die Topografie im Modellgebiet liegt zwischen 0 und 30 m (Abb. 16). Damit ist der Schwereeffekt der topografischen Massen vernachlässigbar. Durch das geometrische Entfernen der Geometrie für $Z > 0$ werden auch lithologische Körper, welche sich ganz in der Topografie ($0 \leq Z \leq Z_{max}$) befinden, aus dem Modell entfernt.

Um Randeffekte zu vermeiden, wurde zusätzlich die horizontale Modellausdehnung um die 15-fache initiale Ausdehnung der Geometrie erweitert. Dafür wurden alle Geometrieknoten und Dreiecke, die die Grenze zur Modellaußenumgebung bilden, entlang der horizontalen Hauptachsen des Modells nach außen verschoben. Dies war notwendig, da zum Zeitpunkt der hier beschriebenen Arbeiten die in Abschnitt 3.2 erwähnte Funktion zur automatischen Berechnung des Randeffektes noch nicht in IGMAS+ integriert war. In Abb. 17 ist das endgültige konsistente Geometriemodell ohne horizontale Erweiterung dargestellt.

3.3.2 Dichten und verwendete Schweredaten

Um den Schwerefeldeffekt des Modells berechnen zu können, mussten die lithologischen Untergrundkörper des Modells mit Dichtewerten versehen werden. Mögliche Dichteverteilungen für dieses Gebiet werden z.B. in Gabriel et al. (2003) und Rumpel et al. (2009) beschrieben. In beiden Studien werden unterschiedliche gravimetrische Messungen über der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne interpretiert und mögliche zugrunde liegende Dichteverteilungen modelliert. Die vorhandenen lithologischen Einheiten lassen sich bezogen auf Gabriel et al. (2003) und Rumpel et al. (2009) zu vier groben Dichteregionen zusammenfassen. Diese sind in Abb. 17 dargestellt. Sowohl Gabriel et al. (2003) als auch Rumpel et al. (2009) beschreiben zusätzlich zu diesen vier Haupteinheiten jeweils eine sehr oberflächennahe Einheit mit geringer Mächtigkeit und sehr niedrigen Dichten. Da diese Körper sich vor der oben beschriebenen Bearbeitung zum größten Teil oberhalb der Nullhöhe der Topografie befunden haben, sind sie nur noch sehr begrenzt im verwendeten IGMAS+ Modell integriert. Die verwendeten Dichten sind in Tab. 2 zusammengefasst. Innerhalb der Regionen werden die Dichtewerte als konstant und die Referenzdichte (Modellaußendichte) mit 2.0 t/m^3 angenommen. Gabriel et al. (2003) und Rumpel et al. (2009) weisen signifikante Unterschiede für die Dichte des

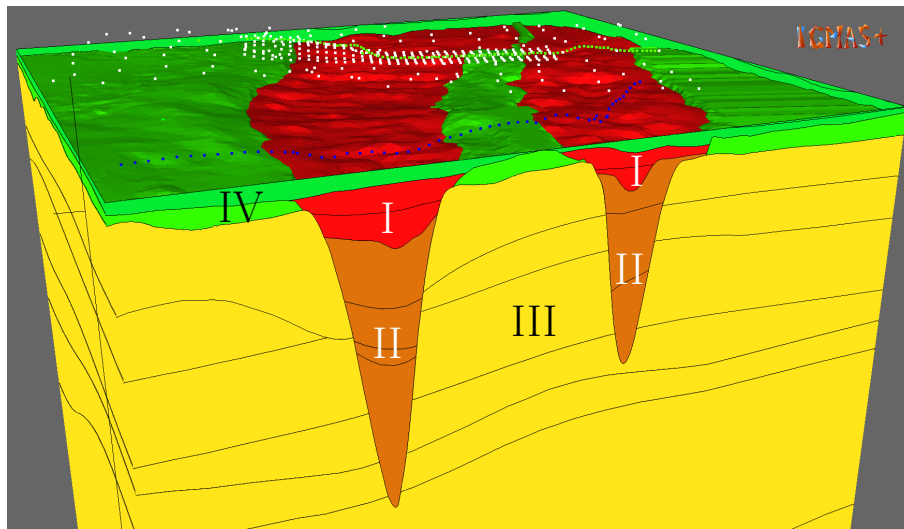


Abbildung 17: Modellgeometrie und Dichteinheiten im IGMAS+ Modell der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne (zehnfach überhöht). Die Modellgeometrie basiert auf den Arbeiten von Steinmetz et al. (2015), die möglichen Dichtewerte für die Einheiten "Lauenburger Ton" (I, rot), "Quartäre Rinnenfüllung" (II, orange), "Tertiär" (III, gelb) und "Quartäre Bedeckung" (IV, grün) sind auch in Tab. 2 aufgeführt. Die farbigen Punkte markieren die Lage der vorhandenen Schweremessungen, anhand derer die Validierung durchgeführt wird. Die "Quartäre Bedeckung" wurde für diese Abbildung teilweise ausgeblendet. Die in Gabriel et al. (2003) und Rumpel et al. (2009) beschriebenen lokalen und oberflächennahen Einheiten mit sehr niedriger Dichte sind im verwendeten Dichtemodell nicht mehr vorhanden.

"Lauenburger Tons" (LCC - "Lauenburg Clay Complex", Steinmetz et al., 2015 und Götze et al., 2014 oder LC - "Lauenburg Clay", Gabriel et al., 2003 und Rumpel et al., 2009; Einheit I in Abb. 17 und Tab. 2) auf. Für den berechneten Schwerefeldeffekt ist die Dichte des LCC jedoch von entscheidender Bedeutung, da er eine hohe Dichtedifferenz zur Umgebung aufweisen kann und sich zudem relativ oberflächennah oberhalb der Rinnestruktur befindet. Für die Interpretation der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die von Gabriel et al. (2003) beschriebene Dichteverteilung nur anhand eines Profils bei Lüdingworth ("Cuxhaven North"), mehrere Kilometer nördlich des Modellgebietes, vorgegeben ist. Für dieses Profil wurde eine 3D Dichtemodellierung in IGMAS durchgeführt. Es ist nicht zwangsläufig anzunehmen, dass diese Dichtewerte auch für das südlicher gelegene Profil "Cuxhaven South" gelten. Dennoch werden diese Werte für ein alternatives Dichtemodell in dieser Arbeit verwendet. Innerhalb des Untersuchungsgebiets stehen Schwerfeldmessungen aus drei verschiedenen Kampagnen zur Verfügung (siehe Tab. 3). Die Lage der Datensätze ist in Abb. 16 (rechts) über weiße Kästen markiert. Aus diesen Kampagnen wurden für diese Arbeit nur die Datenpunkte verwendet, welche sich innerhalb des Untersuchungsgebietes (gestrichelter Kasten in Abb. 16) befinden. Neben den zwei Profilmessungen "Profil Wanhöden" (entspricht Profil "Cuxhaven South" in Gabriel, 2006, grüne Punkte in Abb. 17) und "Profil Krem-

Tabelle 2: Mögliche Dichteverteilung für das Untergrundmodell der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne (siehe Abb. 17).

Dichtekörper	Gabriel et al. (2003) (t/m ³)	Rumpel et al. (2009) (t/m ³)
Lauenburger Ton (I)	1.996	1.813
Quartäre Rinnenfüllung (II)	2.007	2.008
Tertiär (III)	1.978	1.971
Quartäre Bedeckung (IV)	1.980	2.0
“Clay/Silt” (Gabriel et al., 2003)	1.503/1.532	-
“Peat” (Rumpel et al., 2009)	-	1.3

Tabelle 3: Verwendete Schweredaten für die Bremerhaven-Cuxhavener Rinne. Die Daten wurden über das *Fachinformationssystem Geophysik* des LIAG, Hannover, bezogen

Bezeichnung	Kampagnen-Code	Datenbesitzende Institution
“Profil Wanhöden”	GGA-GR-Cuxhavener-Rinne-GGA08	LIAG, Hannover
“Profil Krempele”	GGA-GR-Cuxhaven-GGA08	LIAG, Hannover
“2D Wanhöden”	GGA-GR-Cuxhaven-GGA09	LIAG, Hannover

pel” (entspricht Profil “Krempele” in Rumpel et al., 2006, blaue Punkte in Abb. 17) liegt auch die 2D Messkampagne “2D Wanhöden” im Untersuchungsgebiet (weiße Punkte in Abb. 17). Diese 2D Kampagne und das “Profil Wanhöden” werden in Rumpel et al. (2006) zum Datensatz “Wanhöden” zusammengefasst.

Um das Schweresignal der Rinne in den drei Datensätzen besser abzubilden, wurde jeweils ein einfaches Regionalfeld von den Daten abgezogen. Jedes Regionalfeld wurde über ein an den jeweiligen Datensatz angepasstes Polynom zweiten Grades ermittelt. Dieses Vorgehen ist analog zum in Gabriel (2006) beschriebenen Regionalfeld für das Profil “Cuxhaven South”. Für das Gebiet “Wanhöden” wird das Signal der subglazialen Rinne sowohl in Gabriel (2006) als auch in Rumpel et al. (2006) als positive Anomalie mit $0.2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ über der westlichen Rinnenflanke (Profilmeter 1 200) beschrieben. Über der Rinnenmitte (Profilmeter 2 000) fällt die Anomalie dann auf etwa $0 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ab, um über der östlichen Flanke (Profilmeter 3 000) wieder leicht anzusteigen. Erst nach Profilmeter 3 5000 steigt die Anomalie wieder auf bis zu $0.2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ an. Dies entspricht auch in etwa dem in dieser Arbeit verwendeten Residualfeld für das “Profil Wanhöden” in Abb. 18 (a, rote Kurve) und “2D Wanhöden” (Abb. 19, rechts, oberes Schwerfeld). Das in Rumpel et al. (2006) gezeigte Schwerfeld für das Profil “Krempele” beschreibt einen langsamen Abfall um $-0.2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ über der westlichen Rinnenflanke bis zur Rinnenmitte (zwischen den Profilmeter 1 500 und 2 500) und dann einen

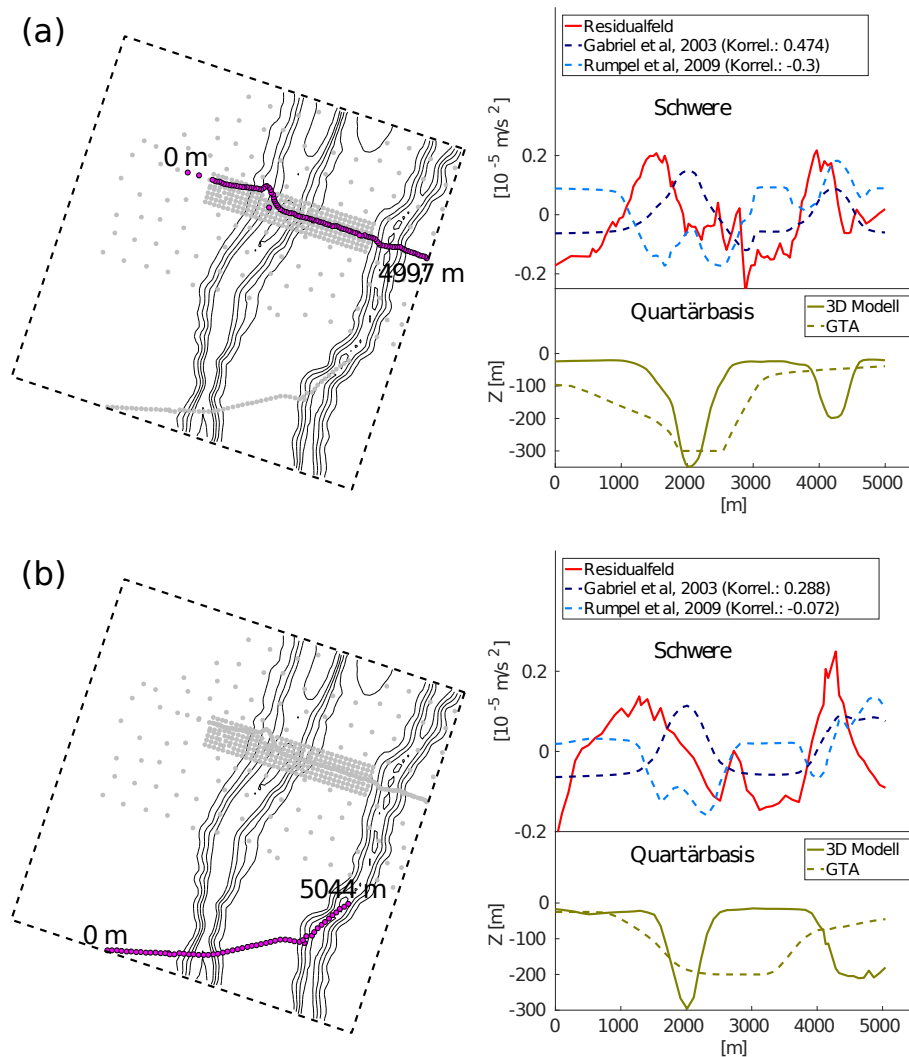


Abbildung 18: Schweredaten und Schwerefeldeffekt des Modells der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne für die Dichteverteilung nach Gabriel et al. (2003) und Rumpel et al. (2009). Auf der linken Seite ist Lage der beiden Profile über dem Modell angegeben. Für beide Profile "Profil Wanhöden" (a) und "Profil Krempel" (b) sind rechts das Residualfeld der Schwere und der Schwerefeldeffekt für die beiden Dichtemodelle entlang der Profile angegeben. Zusätzlich ist die Quartärbasis basierend auf dem Modell von Steinmetz et al. (2015) und dem Geotektonischen Atlas von Nordwestdeutschland (GTA; Baldschuhn et al., 2001) entlang der Profile dargestellt. Die berechneten Schwereeffekte korrelieren nur schwach mit den verwendeten Residualfeldern der Schwere. Die Position und Ausdehnung der berechneten Anomalien entsprechen in etwa den Anomalien im Residualfeld. Zumindest die Position und Ausdehnung der Rinnengeometrie können als plausibel erachtet werden.

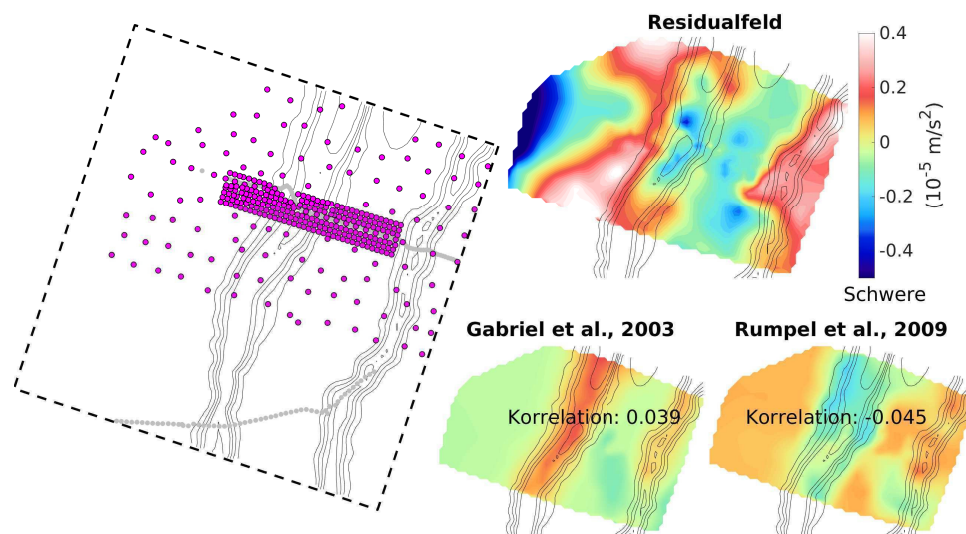


Abbildung 19: Schweredaten und Schwerefeldeffekt des Modells der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne für die Dichteverteilung nach Gabriel et al. (2003) und Rumpel et al. (2009). Auf der linken Seite ist Lage des Schweredatensatzes "2D Wanhöden" über dem Modell angegeben. Das Residualfeld und die berechneten Schwereeffekte sind rechts dargestellt. Die Rinnegeometrie (Quartärbasis) des 3D Modells wird mittels schwarzer Isolinien der Tiefe überblendet. Die berechneten Schwereeffekte korrelieren nur schwach mit den verwendeten Residualfeldern der Schwere. Die Position und Ausdehnung der berechneten Anomalien entsprechen in etwa den Anomalien im Residualfeld. Zumindest die Position und Ausdehnung der Rinnegeometrie können als plausibel erachtet werden.

leichten Anstieg um etwa $0.1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ über der östlichen Rinnenflanke (Profilmeter 3 000). Um Profilmeter 5 000 zeigt sich nochmals ein sehr lokaler starker Anstieg um $0.3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$. Auch für dieses Profil entsprechen die Anomalien des verwendeten Regionalfelds für das "Profil Krempel" in Position und Amplitude dem in der früheren Arbeit beschriebenen Feld. Es kommt zu leichten Abweichungen, da in dieser Arbeit einfachere Regionalfelder verwendet wurden, als in Rumpel et al. (2006) und Rumpel et al. (2009), welche einen Bandpassfilter zur Bestimmung des Residualfelds verwendeten. Die Validierung wird im Folgenden für jeden Datensatz separat durchgeführt, um möglich Fehler durch eine nicht konsistente Kombination der Datensätze zu vermeiden.

3.3.3 Analyse des berechneten Schwereeffekts

Um die Plausibilität der 3D Untergrundgeometrie zu validieren, wurde der Schwereeffekt der erzeugten Dichtemodelle mit der Software IGMAS+ berechnet. Die berechneten Felder sind in Abb. 18 und Abb. 19 im Vergleich zu den verwendeten Residualfeldern (rote Kurven in Abb. 18; Feld oben, rechts in Abb. 19) dargestellt. Die Unterschiede in den berechneten Anomalien beruhen vornehmlich auf dem Dichtekontrast des LCC-Körpers zur Umgebung, da die anderen Dichtewerte sehr ähnlich sind. Die verschiedenen berechneten Schwerefelder weisen im Gegensatz zu den Residualfeldern kaum kurzweilige Anomalien auf. Dies liegt darin begründet, dass diese Anomalien durch lokale, oberflächennahe Einheiten mit niedriger Dichte verursacht werden, die nicht in den Modellen enthalten sind. Kurzweilige Signale im Residualfeld können also mit den verwendeten Modellen nicht erklärt werden. Auf den Profilen korreliert der berechnete Schwereeffekt für beide Dichteverteilungen nur schwach mit den Residualfeldern, für die 2D Messung ist keine klare Korrelation zwischen Residualfeld und den berechneten Feldern festzustellen. Die horizontale Position und Ausdehnung der Rinne im Modell (grüne Linien in Abb. 18 (a) und (b) rechts, schwarze Isolinien in Abb. 19) lassen sich aber mit den beschriebenen Anomalien im Residualfeld assoziieren. Die lokale Ausprägung der Anomalien stimmen allerdings kaum mit den Residualfeldern überein. Die grundsätzliche Ausprägung des Rinnensignals mit einer negativen Anomalie in der Rinnenmitte und leichten Maxima über den Flanken wird am ehesten mit der Dichteverteilung nach Rumpel et al. (2009) erreicht. Dies war zu erwarten, da hier die Dichtewerte direkt für das Gebiet Wanhöden bestimmt wurden, welches etwa 50% des Untersuchungsgebietes abdeckt.

Die verwendete Untergrundgeometrie aus Steinmetz et al. (2015) wurde in erster Linie mit Ergebnissen aus der Seismik, Bohrlochinformationen und Elektromagnetik modelliert. Diese verwendeten Randbedingungen sind unabhängig von der Schwere. Aus diesem Grund ist nicht zu erwarten, dass das Schweresignal des geologischen 3D Modells (Steinmetz et al., 2015) mit den publizierten Anomalien exakt übereinstimmt. Anhand

der erhaltenen Lage und Ausdehnung der berechneten Anomalien kann die Rinnengeometrie aus der Sicht der nachträglichen Berechnung des Schwereeffektes mit IGMAS+ zumindest als plausibel angesehen werden.

Dieses Ergebnis ist jedoch im Hinblick auf die Interpretation der Schwereanomalie der Rinne unbefriedigend, da die Anomalien im Residualfeld durch die Vorwärtsrechnung nicht ausreichend erklärt werden konnten. Wenn man annimmt, dass die verwendete Geometrie plausibel ist, besteht Anlass zur Vermutung, dass der gemessene Schwereeffekt der Rinne zusätzlich durch Dichteveränderungen innerhalb der verwendeten Dichtekörper verursacht wird.

Da in IGMAS+ in erster Linie mit konstanten Gesteinsparametern gerechnet wird, wäre eine massive manuelle Anpassung der Geometrie des Modells notwendig, um die Dichteverteilung innerhalb des Modells anzupassen. Zum Beispiel wäre eine Reintegration der oberflächennahen lokalen Körper mit niedriger Dichte und eine Unterteilung der Körper entlang der Rinne notwendig, um das residuale Schweresignal besser anzupassen. Die Veränderung der Geometrie war in dieser Anwendung jedoch nicht gewünscht, da es sich nicht um ein klassisches Dichtemodell, sondern um ein lithologisches Untergrundmodell handelt. Aktuell ist es in IGMAS+ möglich, das Dichtemodell mit einem 3D Gitter ("Voxelcube"; Schmidt et al., 2011), das lokale Dichteunterschiede enthält, zu überlagern und beides gemeinsam zu berechnen. Diese Verteilung der lokalen Dichteveränderungen war jedoch für das Modellgebiet unbekannt.

In Kapitel 5 wird ein im Rahmen dieser Dissertation entwickeltes, statistisches Abschätzungsverfahren vorgestellt, das es ermöglichen soll, Aussagen über eine unbekannte Parameterverteilung im Untergrund anhand einer anderen bekannten, aber im Allgemeinen unabhängigen Parameterverteilung zu treffen. Dieses Verfahren wird verwendet, um aus der bekannten Verteilung der spezifischen Widerstände im Bereich der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne (Siemon et al., 2004; Rumpel et al., 2006; Siemon et al., 2009) eine mögliche Dichteverteilung innerhalb der Untergrundkörper zu postulieren. Darauf wird in Abschnitt 5.3 näher eingegangen.

3.4 Fazit

Neben Materialinformationen sind externe Geometrieinformationen als Randbedingungen für eine Vorwärtsmodellierung in der Gravimetrie unerlässlich. Wenn diese Geometrien nicht nur als visuelle Randbedingungen für eine interaktive Dichtemodellierung dienen sollen, sondern direkt als Basis für die Berechnungen der gravimetrischen Feldgrößen verwendet werden, müssen sie geometrische Anforderungen erfüllen, um eine korrekte Berechnung gewährleisten zu können. Die zu verwendenden Geometriedaten müssen in jedem Fall die zu berechnenden Untergrundstrukturen als topologisch geschlossene triangulierte Hüllen repräsentieren. Da geometrische Über-

schneidungen innerhalb dieser Hüllflächen oder zwischen verschiedenen Hüllen das Berechnungsergebnis negativ beeinflussen, müssen auch diese zumindest erkannt und bei einer späteren Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Um diese externen Geometriemodelle für eine Schwerevorwärtsmodellierung nutzen zu können, wurden hier Schnittstellen zwischen verschiedenen Geometrierepräsentationen vorgestellt. Anschließend wurde evaluiert, ob die zu nutzenden Geometriedaten die notwendigen Anforderungen an Topologie und Geometrie erfüllen. Für den Fall, dass externe Geometriemodelle diese Anforderungen nicht entsprachen, wurden automatische oder semi-automatische Verfahren entwickelt und angewendet, um dies nachträglich zu gewährleisten. Erwies sich eine automatisierte Anpassungen der externen Geometrien als zu aufwendig oder nicht möglich, wurden diese gegebenenfalls manuell überarbeitet.

An zwei Anwendungen konnte so gezeigt werden, dass durch Kenntnisse bezüglich der Handhabung, Eigenschaften und Schwächen verschiedenster Geometrierepräsentationen und durch die Anwendung von zusätzlichen Verfahren, zum Beispiel aus der Computergrafik, die Verwendung von extern erstellten Geometriemodellen in der Vorwärtsmodellierung unterstützt werden kann.

4 Methoden zur Optimierung von Daten und Modellgeometrie

Für die Modellierung von Untergrundstrukturen und Parameterverteilungen stehen aktuell in den Geowissenschaften sehr hoch aufgelöste Datensätze zur Verfügung. Da die hohe Datendichte die numerische Handhabung, den Austausch und die Präsentation dieser Datensätze erschwert wurden im Rahmen dieser Arbeit Möglichkeiten erarbeitet, um diese Datensätze zu optimieren. In vielen Fällen ist es angebracht, die Datenauflösung zu reduzieren und an die tatsächlichen Anforderungen einer spezifischen Anwendung anzupassen. Im Folgenden werden zwei verschiedenen Methoden zur Optimierung von hoch aufgelösten Datensätzen durch Reduktion des Datenumfangs und ihre Anwendung in der Schwerevorwärtsmodellierung beschrieben.

4.1 Parameter abhängiges Resampling von verteilten Daten

Häufig stehen für gravimetrische Anwendungen Datensätze mit sehr vielen verteilten Datenpunkten bereit. Dabei wird jeder gegebenen Raumposition ein oder mehrere Datenparameter zugeordnet. Es handelt sich dabei meist um Messdaten (z.B. Absolut schwere, Relativschwere) oder auf Messungen beruhende Parameterwerte (z.B. Bouguer-Anomalie). Wenn der Datenumfang dieser Datensätze zu groß ist, wird deren numerische Bearbeitung in geophysikalischen Anwendungen erschwert. Für die Arbeit im Verbundprojekt AIDA stand zum Beispiel ein sehr hoch aufgelöster Hub-schrauber-Elektromagnetik-Datensatz zur Verfügung, dessen initiale Auflösung die direkte Verwendung der Daten unter anderem für eine geologische 3D Modellierung (Steinmetz et al., 2015) massiv erschwert hat.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt, das die Anzahl der Datenpunkte in hoch aufgelösten Datensätze aus verteilten Punkten verringert. Der folgende Abschnitt ist bereits als Menzel (2016) veröffentlicht. Es werden die grundsätzlichen Ideen für das Verfahren "Constrained indicator data resampling" (CIDRe) erläutert. Des Weiteren wird eine erste Validierung sowie eine Anwendung aus der Schwerebasierten Modellierung von Untergrunddichtestrukturen beschrieben. Im Anschluss daran werden Möglichkeiten zur Erweiterung des Verfahrens diskutiert. Darüber hinaus enthält Anhang A die Beschreibung der Anwendungen des Verfahrens auf den oben beschriebenen Elektromagnetik-Datensatz (Anhang A.1) und eine weitere Anwendung (Anhang A.2).

4.1.1 Constrained indicator data resampling - A parameter constrained irregular resampling method for scattered point data ^{1 2}

Introduction

Interactivity and real-time computation are becoming increasingly important for modeling and visualization tasks in the geosciences. Highly resolved data sets are available and widely used. Examples for such data are topographic grids from the Shuttle Radar Topography Mission, gravity/gravity gradient fields from the Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer satellite mission, accurate airborne surveys and highly resolved structural geometries from seismic studies from all over the world.

Interactive applications need real-time calculations for immediate update of the results of user actions. Thus, a large data set can be a challenge. This is especially true for the task of interactive 3D visualization. A visualization system has to ensure an update frequency ≥ 50 frames per second (e.g., Schuhmann und Müller, 2000, chapter 4.2), to provide an acceptable response to the user. This means that the data set has to be evaluated up to 50 times per second. Interactive handling of data sets with a data density unfavorably higher than the application requirements is more computationally expensive than necessary because real-time calculations have to be ensured. The data point density can be reduced if it is much higher than needed to re-present the given parameter distribution for a particular task.

To represent signals with a certain wavelength λ in a data set, the data have to be sampled with a point distance of $\leq 0.5\lambda$ (the Nyquist-Shannon theorem). When the given data set contains a mean point distance of $\ll 0.5\lambda$, no additional information according to the favored signals can be provided by the data while increasing storage requirements and computing time. In this study, such data sets are further called "oversampled". If a band-limited data set is oversampled according to the Nyquist-Shannon theorem, it is advisable to resample the resolution to a point distance close to, but not higher than, 0.5λ to avoid unnecessarily high memory needs and high computation cost. This is particularly important for interactive interpretations. The shortest significant wavelength for an application can be regarded as an application-dependent "band limit" for parameter distributions that are not band-limited generally.

Another real-time task is interactive 3D subsurface modeling of potential field data, which is important for geophysical studies. Interactive potential field modeling and commonly used methods for resampling potential field stations are described in more

¹Menzel, P. (2016): Constrained indicator data resampling - A parameter constrained irregular resampling method for scattered point data. GEOPHYSICS 81(2):F27-F36, DOI 10.1190/geo2015-0220.1, URL <http://dx.doi.org/10.1190/geo2015-0220.1> (peer reviewed)

²Peer-reviewed code related to this article can be found at <http://software.seg.org/2016/0002>. Manuscript received by the Editor 16 April 2015; revised manuscript received 13 October 2015; published online 15 March 2016.

©2016 Society of Exploration Geophysicists. All rights reserved.

detail in the following section. All the resampling approaches described create data sets with homogeneous point distances. These distances have to fulfill the Nyquist-Shannon theorem for signals of the shortest wavelength in terms of the modeling task. Therefore, areas with larger wavelengths in the parameter signal have a point density that is higher than required, and thus the data set is oversampled in these regions. For data sets with strong local changes in the parameter distribution, and thus small areas with the shortest wavelength signals, this may lead to a massive local oversampling in large areas with higher wavelength signals. In many cases, the overall number of points for this kind of data set exceeds the application needs and the computation capacities, even if the data set is resampled by commonly used resampling methods, but a given error limit has to be observed. In interactive 3D potential field modeling (Alvers et al., 2014), this may lead to significant delays in the interactive modeling process. Such delays increase the modeling time significantly and frustrate the modelers.

Based on this background, an irregular method to reduce scattered data sets with respect to the given parameter distribution called constrained indicator data resampling (CIDRe) is presented. The main idea of the CIDRe method is to reduce the number of data points while taking the distribution of given data parameters into account. The algorithm determines parameter gradients of a particular area and resamples accordingly. Because short-wavelength signals correspond to locally high parameter gradients, the algorithm identifies areas in the data set with short-wavelength signals by analyzing the parameter gradients. The resampling ensures shorter point distances in areas with large parameter gradients than in areas with small gradients. Thus, the final scattered data sets have irregular point distributions. The resulting point distribution avoids local oversampling and represents the initial data parameter distribution well. CIDRe results represent the parameter signals with a much smaller number of data points than other resampling methods with homogeneous results. Because a much lower number of points is needed to represent the data accurately, these resampled data sets provide benefits for interactivity and real-time calculations in geophysical applications that are able to deal with irregular distributed input data. Applications that are restricted to regular point grids as data input cannot benefit from the results of an irregular resampling directly. In practice, data are not measured on regular grids, but they have to be transferred to the grid positions subsequently by interpolation. If the raw data are thinned out irregularly before interpolation, this step can be performed more effectively.

The CIDRe algorithm is described in detail in the section “CIDRe”. For validation, the method was applied to a synthetic data set. In the section “Validation by synthetic data”, the CIDRe results for the synthetic data are presented and then compared with the results of other resampling methods. When applying the CIDRe algorithm on gravity station data used for 3D density modeling, the resulting irregular data set still allows accurate modeling of local density structures that cause the local gravity anomalies. For

regions without significant variations in the gravity field, the remaining coarser point density represents the local gravity field accurately, as well. This application is described in detail in the section “Real data application.” In the following section, interactive potential field modeling is presented as an interactive task that benefits from irregularly resampled data.

Potential field 3D forward modeling as a motivation for resampling gravity data

For interactive gravity-based 3D density modeling, software for interactive potential field forward modeling called IGMAS+ (Schmidt et al., 2011; Alvers et al., 2013; Alvers et al., 2014) has been used in many former and recent studies at different scales. In IGMAS+, the potential field effect of triangulated polyhedral bodies is calculated with the method presented by Götze and Lahmeyer (1988). The body geometries are built and adapted interactively. For the 3D modeling process, nearly real-time calculations are essential. The computation time of the model’s potential field effect depends on the number of potential field stations used and the number of triangles defining the borders of the subsurface bodies. A change in the triangulated geometry can be referred to as the interactive, modeler-driven insertion, deletion, or movement of a geometry node. Thereafter, IGMAS+ computes the update for the potential field effect. This update has to be calculated for all potential field stations but is based only on the triangles affected by the geometry change. The overall number of affected triangles is commonly limited and, therefore, negligible for the update cost of a single change. Also, the global number of triangles should not be limited to ensure accurate geometry building. In the following, the time needed to update the potential field for a model geometry change is called the “update time”.

For smooth interactive modeling with IGMAS+, an update time of < 0.5 s has to be ensured. If the update time is larger than 0.5 s, the modeling process is interrupted by significant delays. For interactive geometry building, an extremely large number of single geometry changes is required. Thus, these delays increase the modeling time significantly and are very frustrating for the modeler. According to this, station data sets with a resolution unnecessarily high for the modeling application have to be avoided and should be resampled to a reasonable amount of station points.

The minimum station distance that is required for a specific modeling task is influenced by the wavelength of the given potential field anomalies. If the given station distances are lower than the needed minimum distance, the point count of the station data set can be reduced. Different approaches exist to reduce the amount of potential field data. For example, a selective minimum distance method can be used for reduction of gravity stations (S. Schmidt, personal communication, 2013). This approach creates a subset of the original station set according to a user-defined “minimum distance”. Each pair of points in the subset displays a distance equal to or higher than the defined mini-

imum distance after the reduction process. The minimum-distance criterion was chosen to be small enough to create a station resolution adequate for modeling in the favored scale. This method relies only on the point locations and does not take the assigned parameters into account.

A second possibility is to interpolate the given data set onto a point grid using a coarser grid spacing than the original data set (often called data “gridding”). Sophisticated approaches, such as discrete smooth interpolation (Mallet, 2002b), natural-neighbor interpolation (Ledoux und Gold, 2005), as well as methods using wavelets (Daubechies et al., 1999) or multivariate polynomials (Tafti et al., 2006), are widely used for resampling and interpolation of irregular scattered data. These interpolation methods interpolate the data parameter at the given original locations without errors, and they provide reliable estimations for the data parameters at unknown locations. All of the approaches presented above create data sets with homogeneous point distances, which may have the problem of local oversampling as outlined in section “Introduction”.

Other triangulation-based irregular simplification methods are available for the aid of computer graphics. These mesh simplification approaches (e.g., Schroeder et al., 1992; Ronfard und Rossignac, 1996; Garland und Heckbert, 1997; Franc und Skala, 2002) have been in use for several years to simplify triangulated meshes by reducing the number of triangles. Mesh simplification is widely used in 3D interactive visualization, where it allows a reversible gradual collapse of the geometry nodes. Because such techniques are purely geometry based, data parameters assigned to the geometry nodes are not taken into account for simplification. Therefore, these methods are not sufficient for parameter constrained resampling of scattered data for geophysical modeling and, thus, mesh simplification will not be considered further in this study. In the following section, the new irregular parameter constrained resampling approach for scattered data sets is presented.

CIDRe

A preliminary version of the CIDRe approach was first presented in Götze et al. (2014), where it was applied to reduce the point count of a scattered “apparent resistivity” ρ_a data set near Cuxhaven, Northern Germany (Götze et al., 2014; Steinmetz et al., 2015). The data set was based on 1D inversion of helicopterborne electromagnetic measurements. The workflow of this algorithm is described in detail below.

Here, \mathcal{P} is defined as the set of all data points in the original data set to be resampled. This set contains n_P points with location coordinates and data parameter values that are assigned to these locations. For an arbitrary data point $P \in \mathcal{P}$, the location coordinate vector is defined as \vec{P} and the data parameter value at P is defined as p_P . In the CIDRe process, a subset with $P_R \subset P$ is constructed in three steps (Figure 20):

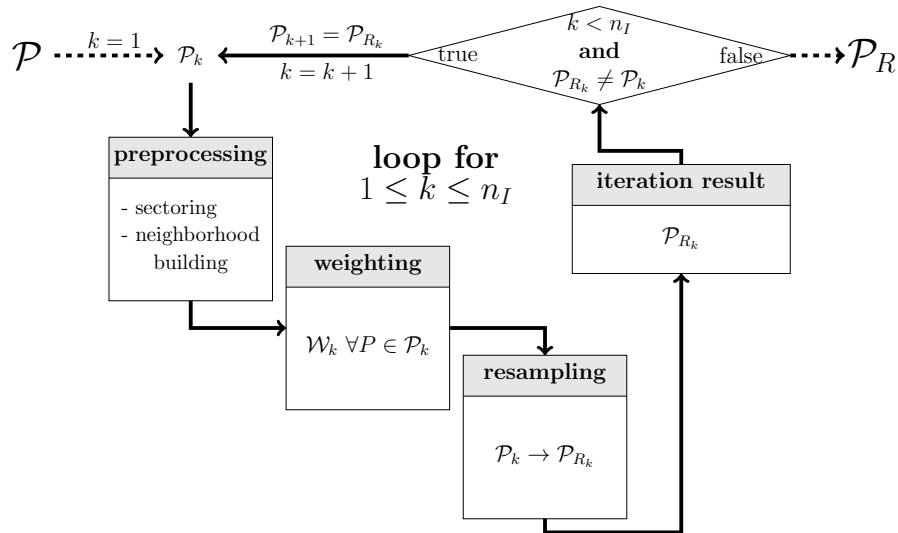


Figure 20: Flowchart of the CIDRe process. An original set \mathcal{P} containing n_P data points is transferred onto a subset $\mathcal{P}_R \subset \mathcal{P}$ with $n_R < n_P$ data points. The three steps “preprocessing”, “weighting” and “resampling” are repeated for n_I iterations or until no further reduction can be achieved. The iteration-index k is defined by $1 \leq k \leq n_I$. (Revised after Menzel, 2016)

1. preprocessing
2. weighting the data points
3. irregular resampling.

These three steps and the iterative approach are discussed separately below. At the end of this section, a short estimation of runtime for the CIDRe algorithm is given.

Preprocessing During the preprocessing step of the CIDRe approach, two actions are performed, sectoring and neighborhood building. For sectoring, the area covered by the points of \mathcal{P} is divided into n_s nonoverlapping sectors S with $1 \leq j \leq n_s$. The sectors are distributed regularly over the data area and a sector size is chosen to ensure that the number of points in one sector is small compared to the overall number of points. Each sector S_j contains a subset $\mathcal{S}_j \subset \mathcal{P}$ of all data points located in S_j .

Additionally, for each P a neighborhood \mathcal{N}_P is defined. A point $P' \in \mathcal{P}$ is defined to be $\in \mathcal{N}_P$ if $|\vec{P}' - \vec{P}| \leq R_{max}$ for a user-defined maximum distance R_{max} . In the following, the subscript N means an arbitrary neighboring point of P . The subscript n with $1 \leq n \leq n_{NP}$ is the index for iterating over all n_{NP} neighbors. The construction of the point neighborhoods is based on the previously made sectoring. Other approaches for neighborhood building like R-trees (Guttman, 1984) or adjacency matrices (Godsil und Royle, 2001) are possible, too. Because the sector structure is additionally used for the irregular resampling step, described below, this method was favored for setting up the point neighborhoods. All calculations for P in the CIDRe process are done, while

taking all neighboring points $P_N \in \mathcal{N}_p$ into account. To avoid extremely large calculation times, the aim is to achieve a number of neighbors that is as small as possible, while being large enough for reliable calculations. In general, R_{max} has to be chosen to be rather small compared the extent of the original data set to prevent large amounts of neighboring points. In practice, R_{max} cannot be defined by the user directly and is determined by the user-driven sector size.

Weighting the data points In the second step of the CIDRe approach, all data points are weighted with respect to variations in the data parameters in their neighborhood. The calculation of the point weight W_P for a data point P relies on the calculation of the difference quotient dp_N with

$$dp_N = \frac{|p_{P_N} - p_P|}{|\vec{P}_N - \vec{P}|} \quad (1)$$

between the point and one of its n_{NP} neighboring points P_N to evaluate the variation of the data parameter in the neighborhood of point P .

In the present version of CIDRe, two different strategies are used to calculate the weight W_P of a point P according to its neighboring points. Strategy I uses the arithmetic mean of all dp_n calculated for P and all of its adjacent points:

$$W_P^I = \frac{1}{n_{NP}} \sum_{n=1}^{n_{NP}} dp_n \quad (2)$$

The weights calculated by strategy I were used for the synthetic data example, presented in the following section. The second strategy (II) makes use of a root mean squared (rms) approach and is used for the real data example in the section “Real data application” :

$$W_P^{II} = \sqrt{\frac{1}{n_{NP}} \sum_{n=1}^{n_{NP}} dp_n^2} \quad (3)$$

To consider the geometry of the neighboring points, additional inverse distance weights can be used to improve the point weighting for large distances between P and its neighboring points. To apply these approaches, Equations 2 (strategy I) and 3 (strategy II) have to be slightly modified to include the additional weights for *inverse distance weighting* of each neighboring point:

$$W_P^{Ia} = \frac{1}{\sum_{n=1}^{n_{NP}} w_n} \sum_{n=1}^{n_{NP}} dp_n w_n \quad , \quad (4)$$

$$W_P^{IIa} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{n=1}^{n_{NP}} w_n^2} \sum_{n=1}^{n_{NP}} (dp_n w_n)^2}. \quad (5)$$

Strategy Ia (Equation 4) is the modified version of I, IIa (Equation 5) the adapted version of strategy II. For each neighboring point P_N an additional weight w_N defined as

$$w_N = \left(\frac{1}{|\vec{P}_N - \vec{P}|} \right)^{power} \quad (6)$$

is calculated. The power value is usually chosen as power = 0 (no additional weighting) and power = 1 for simple and power = 2 for squared inverse distance weighting. Higher integer values are also possible. If the distances between P and all P_N are small compared to the data extensions, the results of the strategies I and II are similar to the results of the strategies Ia and IIa. For large R_{max} the additional geometrical weighting has to be considered. The user has to choose one of the four strategies to be applied. In practice, strategy I is used for simple parameter distributions and for testing. For more complex distributions and real data, strategy II is used. The varied strategies Ia and IIa are used if the sector size is much larger than the minimum significant wavelength.

All weighting strategies (Equations 2 - 5) produce high weights for points with a large parameter difference to their neighborhood. Since the algorithm is not able to distinguish such points as outliers or as points with high information content, it assumes that the data set is outlier-free and treats such points always as highly important.

Irregular resampling \mathcal{W} is the set of all previously calculated and normalized point weights. A group of $n_W = 4$ "indicator weights" $W_I = \{0.3 \cdot W_I^{ref}, 0.5 \cdot W_I^{ref}, W_I^{ref}, 1.2 \cdot W_I^{ref}\}$ is calculated with respect to $W_I^{ref} = (W^{95\%} + W^{offset})$. $W^{95\%}$ is the 95% quantile of \mathcal{W} that can be adjusted by a user-controlled offset value W^{offset} . All points are clustered into groups, defined by these indicator weights. A point $P \in \mathcal{P}$ is assigned to a group \mathcal{W}_{I_i} according to it's weight W_P if $W_{I_{i-1}} \leq W_P < W_{I_i}$ with $1 \leq i \leq n_W$ is fulfilled. The indicator weights are assigned to n_W predefined "indicator reduction factors" $RF_I = \{RF_{I_1}, RF_{I_2}, \dots, RF_{I_{n_W}}\}$ with $RF_I = \{0.01, 0.1, 0.33, 0.8\}$. A subset $\mathcal{W}_{I_i} \mathcal{S}_j$ is formed by the intersection of the subsets \mathcal{W}_{I_i} (all points in a weight group i) and \mathcal{S}_j . As introduced in Subsection "Preprocessing", \mathcal{S}_j contains all points that are located in a Sector j . This intersection is applied for all combinations of weight groups and sectors.

Each subset $\mathcal{W}_{I_i} \mathcal{S}_j$ with originally $n_{P_{ij}}$ data points is decimated separately using a selective resampling approach. The original point distribution and the distribution of point weights are assumed to be irregular and spatially clustered. The k -Means cluster algorithm (see MacQueen 1967; Kanungo et al. 2002; Kanungo et al. 2004), a method that preserves these irregularities was used for selective resampling. For the CIDRe

resampling approach, all $n_{P_{i,j}}$ points $\in \mathcal{W}_{I_i} \mathcal{S}_j$ are separated using the *kMeans* approach in $n_{R_{i,j}}$ groups with $n_{R_{i,j}} = RF_{I_i} \cdot n_{P_{i,j}}$. *kMeans* associates each point location with one specific spatial cluster. The center of a cluster is defined by the arithmetic mean of all associated point locations. According to the location of each cluster center, one point $P \in \mathcal{W}_{I_i} \mathcal{S}_j$ is selected to be used in the resulting point set \mathcal{P}_R by a *minimum distance* criterion. This point P shows the smallest distance to this cluster center location for all points $\in \mathcal{W}_{I_i} \mathcal{S}_j$. In order to prevent a complete collapse of the point density, $n_{R_{i,j}}$ is restricted to $n_{R_{i,j}} \geq 4$. For $n_{R_{i,j}} < 4$, $n_{R_{i,j}} = 4$ is used instead. Thus, a sector can only be reduced to a minimal point count of $4 \cdot n_W$.

An advantage of the sector based resampling is that a minimum point density is conserved even for areas with extremely low point weights. Secondly each sector contains only a limited amount of points. Hence, the processing time is much lower than for resampling one complete group of weights \mathcal{W}_{I_i} for the entire extension of the original data set. For a single application of the CIDRe process the maximum achievable resampling factor is limited. In order to deal with this issue, the method is applied iteratively.

Iterative approach For iterative application of CIDRe, the complete process of all 3 CIDRe steps is repeated as shown in Figure 20. The resulting point set \mathcal{P}_{R_k} of a k -th iteration is used as original point set \mathcal{P}_{k+1} in a $(k + 1)$ -th iteration. Thus, the number of points in \mathcal{P}_{k+1} is lower than in \mathcal{P}_k and the sector size and R_{max} have to be increased to match the new point count. Additionally it is assumed that all data points $\in \mathcal{P}_{k+1}$ are more important for information content than the points $\in \mathcal{P}_k$. Thus, the new point weights \mathcal{W}_{k+1} should be higher than the old point weights \mathcal{W}_k . To increase the weights with increasing iteration, all \mathcal{W} calculated for an iteration $k + 1$ are reweighted with $\mathcal{W}_{k+1} = \mathcal{W}^{\frac{1}{k+1}}$. Additionally the “indicator weights” W_I have to be kept constant or decreasing between two iterations. Hence, the reduction of an iteration $k + 1$ is lower than the reduction of the iteration k and the difference between n_{R_k} and $n_{R_{k+1}}$ converges to zero. The iteration stops if no further points can be removed and, therefore, $\mathcal{P}_{R_k} = \mathcal{P}_k$ or a user-defined iteration limit n_I is exceeded. The final number of points for a k -th iteration n_{R_k} and, thus, the number of points in the resulting data set \mathcal{P}_R can be controlled by the indicator weights W_I . The lower the highest weight $W_{I_{n_W}}$ that is determined, the higher the number of points in \mathcal{P}_R .

Runtime estimation When n_P is the point number in the original data set, n_s the number of sectors and n_{ds} the number of points in each sector, the preprocessing step can be done in $\mathcal{O}(n_d \cdot n_s)$. The number of neighboring points is limited by the number of points in one sector n_{ds} . Therefore, the weighting step as well as the resampling step can be done in $\mathcal{O}(n_s \cdot n_{ds}^2)$. In a worst case scenario, when either $n_s = 1$ and $n_{ds} = n_P$

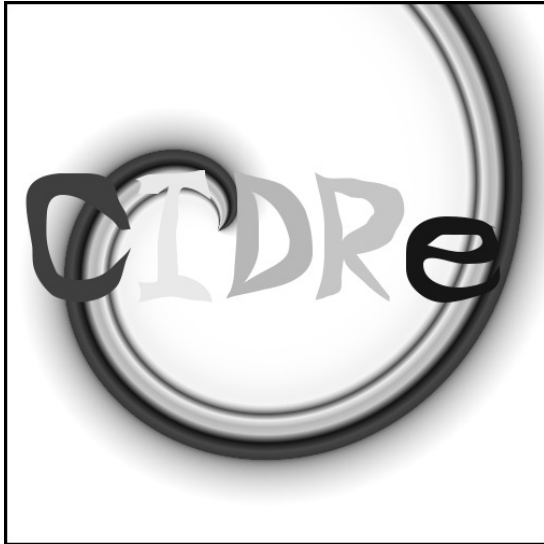


Figure 21: Grayscale raster image (500×500 pixels), used as reference to construct the synthetic data (Figure 22).



Figure 22: Central part of synthetic data set with coordinates in a range of $1 \leq X \leq 500$ and $200 \leq Y \leq 400$. For validation, the complete synthetic data set was used, which contains 500 000 randomly scattered data points. The data parameter is based on the gray levels of the original raster image (Figure 21).

or $n_s = n_P$ and $n_{ds} = 1$, the CIDRe algorithm obtains a runtime of $\mathcal{O}(n_P^2)$. Since the sectoring tries to achieve $1 \ll n_s, n_{ds} \ll n_d$ also for data sets with highly irregular point distribution, this scenario is avoided. The ideal case with $n_s = n_{ds} = \sqrt{n_d}$ achieves a running time of $\mathcal{O}(n_s^3)$. The mean runtime of the CIDRe process for real data sets is always $< \mathcal{O}(n_P^2)$. The running time of the CIDRe algorithm outlined above is estimated for one iteration k . All following iterations always obtain a lower runtime because of $n_{P_{k+1}} \leq n_{P_k}$ and $n_{s_{k+1}} \leq n_{s_k}$. The algorithm tries to achieve an equal n_{ds} for all iterations.

Validation by synthetic data

To validate the CIDRe approach, a test with synthetic data is presented in what follows. The results are compared with the conventional resampling approaches that are also applied to this data set. A code example to reproduce the results of this section is submitted with this manuscript. The algorithm's workflow and functioning can be studied in detail there.

Synthetic data This data set was constructed from a grayscale raster image with a resolution of 500×500 pixels (see Figure 21), using the gray levels as data parameter. The raster image contains highly regular integer-based coordinates and gray levels. To avoid corresponding aliasing effects, the raster data was interpolated onto 500 000 randomly scattered points. The resulting data set has coordinates and parameter values in the same value ranges as the raster image, but with double-precision values instead of integer values (see Figure 22). Furthermore, the point positions in this data set are normalized and scale free.

This data set was chosen for validation due to its highly inhomogeneous parameter distribution. It contains areas with sharp contrasts and high gradients in the data parameter, for example, at the edges of the characters, as well as areas with very smooth parameter variations and, thus, small gradients. The data display parameter signals with locally varying wavelengths, short-wavelength signals in areas with high gradients, and vice versa. Thus, the minimum sampling distance, appropriate to represent the data signal, varies at different locations of the data set.

Comparison with other methods Two interpolating and two selective resampling methods are used to evaluate the CIDRe resampling. As a first interpolating approach a local version of the method based on Mundry (1970) was implemented. This method is based on inverse distance weighting interpolation, but it uses a local regression plane. Originally, this algorithm provides a global interpolation. To be used in this application, it was localized by limiting the maximum distance for point search. The second one utilizes the build-in version of the natural-neighbor interpolation algorithm (see Ledoux und Gold, 2005) integrated in MATLAB[®]. Both methods interpolate the original data set onto point grids with coarser point distances than the original data set. The size of the resulting point set can easily be controlled by user-defined grid spacing.

Two non-interpolative approaches to decimate the initial synthetic data set were also applied. Both select existing points out of the initial data to be used in the decimated data set. The first one is the *kMeans* approach, also used in the irregular resampling step of the CIDRe process. For this application no point weights and no sectoring is used for resampling. All point locations of \mathcal{P} are grouped in n_R clusters and n_R points are selected according to the resulting cluster centers. Since the value n_R is user-defined, this method is able to create subsets $\mathcal{P}_R \subset \mathcal{P}$ containing a desired number of points. The second selective approach makes use of a *minimum distance* criterion (S. Schmidt, pers. comm.) and is introduced in section “Potential field 3D forward modeling as a motivation for resampling gravity data”. This minimum distance method creates a subset $\mathcal{P}_R \subset \mathcal{P}$ according to a user-defined minimum distance R_{min} . Each pair of points $P, P' \in \mathcal{P}_R$ fulfills $|\vec{P}' - \vec{P}| \geq R_{min}$ after the reduction process. It is not possible to dictate the number of points in the resulting subset \mathcal{P}_R directly. The number of remaining points correlates with the user-driven R_{min} used. The higher the R_{min} that is chosen, the fewer points are selected. The exact number of selected points does not depend solely on this value, but also on the distribution of the original data points. The resampling based on the interpolation method described in Mundry (1970) and the two selective approaches come up to a maximum runtime of $\mathcal{O}(n_P^2)$. These methods can be easily optimized in practice, therefore, the real run time is much shorter. Due to the high level optimization the MATLAB[®] natural-neighbor interpolation is the fastest algorithm but requires a triangulation. In MATLAB[®] a Delaunay triangulation is used, which can be

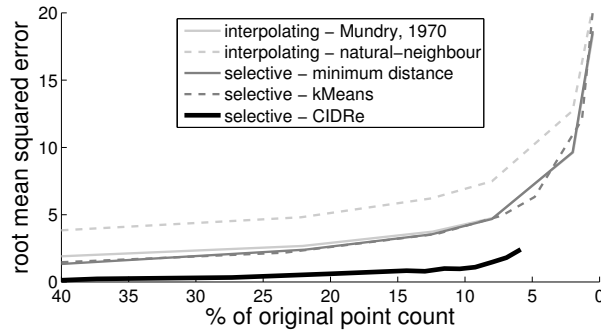


Figure 23: Visualization of rmse for the synthetic data set and different resampling methods. The CIDRe approach (black fat curve) always achieves lower errors than the other approaches used (light gray: interpolating, dark gray: selective) for a given resampling rate but does not reach the smallest sample size.

done in a runtime of $\mathcal{O}(n_P \cdot \log(n_P))$.

For validation, each method described above and the CIDRe approach are used to create resampled point sets of the synthetic data set with different reduction rates between 40% and 0.5% of original point count. The exact reduction rates that are achieved differ from each other due to the characteristics of the algorithms used. To determine how well the original parameter distribution can be reproduced for each resampling result, each result was interpolated back to the original data point positions by using the local interpolation approach after Mundry (1970), described above. After interpolation, the parameter differences between the restored and the original data set, as well as the root mean squared error (rmse) for each resampled data set are calculated. The rmse is defined as

$$rmse = \sqrt{\frac{1}{n_P} \sum_{i=1}^{n_P} (p_{original}^i - p_{restored}^i)^2} \quad , \quad (7)$$

with the original parameter value $p_{original}^i$ and the interpolated parameter value $p_{restored}^i$ at the i -th of the original n_P data points.

Results and interpretation The rmse achieved for different methods and reduction rates is displayed in Figure 23. For each reduction rate, displayed as percentage of original number of data points, the resulting rmse is plotted. The rmse increases for decreasing percentage of original point count. The CIDRe approach always achieves a lower rmse than the other methods for equal resampling rates. With the CIDRe method and the parameterization used, it is not possible to achieve reduction rates lower than approximately 6%. The other approaches are able to reduce the number of points up to 0.5% of the original number of points. The selective methods and the interpolating approach after Mundry (1970) show very similar errors for corresponding reduction rates. The

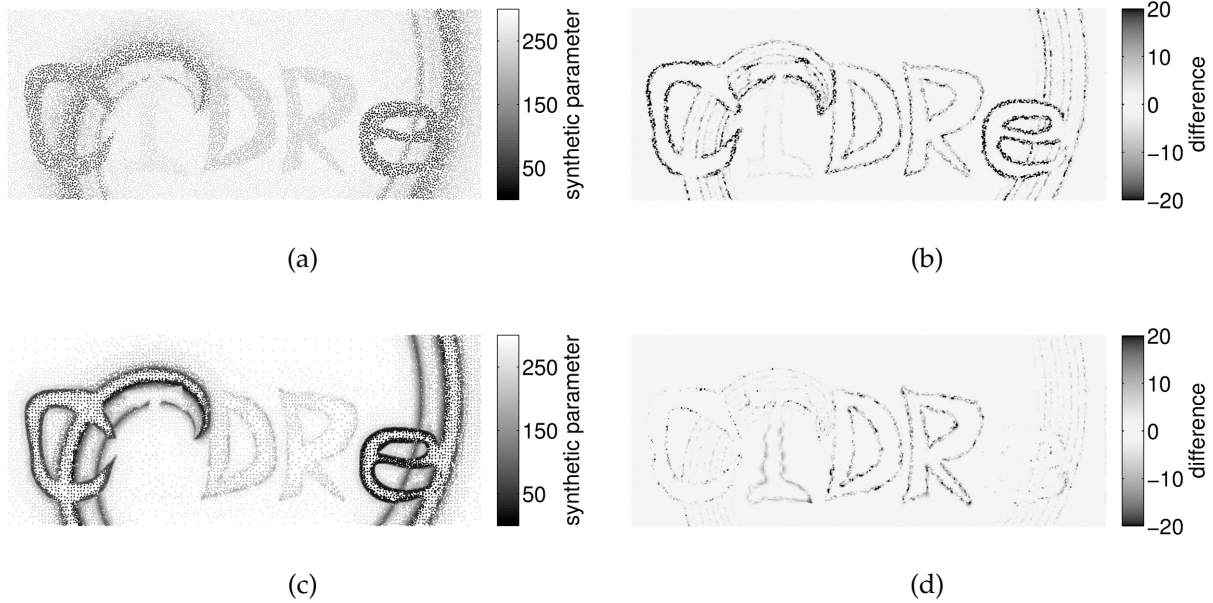


Figure 24: Results for resampling to approximately 7 % of original amount of points for the selective minimum distance approach (a) and CIDRe approach (c). The differences to the original data after reconstruction using interpolation are shown in (b) for minimum distance and (d) for CIDRe. The differences of the tminimum distance approach are higher compared to the CIDRe approach. Especially in areas with strong parameter variation the CIDRe approach differs less from the original data set, while the minimum distance approach shows much higher deviation. In areas with less variation in the data parameter both methods achieve comparable results. In all subfigures the same subregion of the data set as used in Figure 22 is displayed.

natural-neighbor interpolation always produces higher errors compared with the other algorithms.

Figure 24 compares the CIDRe and minimum distance resampling. The resulting point distributions with approximately 7% of the initial number of points for the selective minimum distance method (Subfigure 24a) and for CIDRe (Subfigure 24c) are very different. The resampled data set based on the minimum distance approach displays an irregular distribution with homogeneous point distances, as expected. The CIDRe-based example contains a very irregular point distribution. In areas with high gradients in the data parameter, e.g., at the edges of the characters “C” and “e”, a much higher point density with lower distances is used than in areas with low parameter variations, e.g., at the edges of the character “I”. The difference between the original parameter distribution and the minimum distance result (Figure 24a) is displayed in Figure 24b and the CIDRe result (Figure 24c) is shown in Figure 24d. The difference maximum for the minimum distance approach exceeds the maximum of the CIDRe approach. Especially in areas with strong parameter variation, e.g., at the edges of the characters “C” and “e,” the CIDRe approach hardly differs from the original data set, whereas the minimum distance approach shows a much higher deviation. In areas with less variation

in the data parameter, e.g., at the edges of the character “I” or the trend located in the right part of the data set, both methods achieve comparable differences with the original parameter distribution. Based on the results shown in Figure 24, the CIDRe method should preferably be used to resample the synthetic data set to approximately 7% of the original points. In areas with the shortest wavelength parameter signals, CIDRe achieves a point density that is similar to the point density of the original data set, and, thus, these signals can be represented quite well. In areas with low variations in the parameter and only long-wavelength signals, it provides point distances much larger than in the original data set. These signals can still be reproduced adequately. Because the minimum distance method produces a uniform distribution of the point distances, the result is not able to reproduce the shortest wavelength signals as well as the CIDRe result for a comparable number of points. The achieved error corresponds to the reproducibility of the lowest wavelength parameter signals. The rmse is lower for the CIDRe result (< 2.5) compared with the minimum distance result (approximately 4) for the reduction rate of 7% of the original point count (Figure 23).

The insights gained from the interpretation of the results shown in Figure 24 are representative for all reduction rates. For a given reduction rate, the CIDRe result always represents the original parameter distribution better than the result of the minimum distance approach. In general, for data sets with locally strongly varying parameter distributions CIDRe resampling results are always better than results with homogeneous point distances from other methods. Because the CIDRe method allows irregular point distributions with locally unequal point distances, it achieves point densities that are adequate to represent the parameter signals with the locally shortest wavelengths for the respective part of the data set. Due to the uniform point distribution in their results, the other methods need a much higher number of data points to represent the parameter distribution with similar errors than the CIDRe method. In the following section, a real marine gravity field data set is used for resampling to support interactive 3D density modeling by reducing the computation time for model geometry updates.

Real data application: Reducing Gravity station sampling for interactive gravity-based 3D density modeling

As a real-world application, a marine gravity data set from offshore northern Chile is resampled to support interactive 3D density modeling by reducing the computation time for model geometry updates. Due to the subduction of the Nazca plate underneath the South American continent, this area experiences large and destructive geohazards, such as earthquakes and tsunamis. Therefore, this region is well studied by many geophysical disciplines. Because accurate and highly resolved gravity measurements based on different sources (ground, shipborne, airborne, and satellite measurements) are available, gravity forward modeling is a widely used geophysical technique to de-

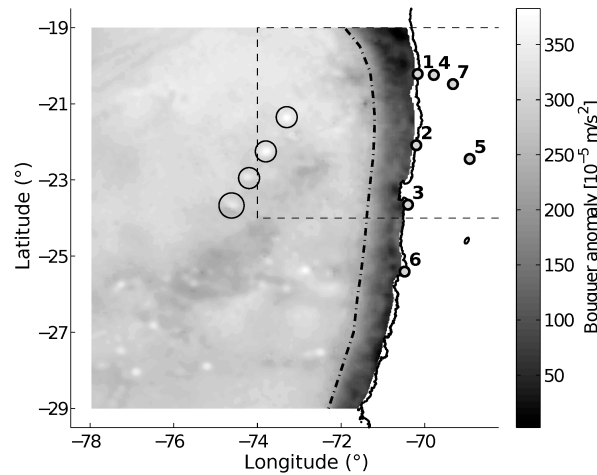


Figure 25: Original marine gravity field by Andersen und Knudsen (1998) in the offshore area of northern Chile. The gravity field is displayed as the Bouguer anomaly. The Chilean coastline is displayed as a black solid line; the trench is displayed as a dashed-dotted line. The cities are marked gray dots with black edges (1, Iquique; 2, Tocopilla; 3, Antofagasta; 4, Pozo Almonte; 5, Calama; 6, Taltal; and 7, Pica). The four prominent anomalies associated to the Iquique Ridge are marked by black circles.

termine the subsurface density structure of this subduction zone. Examples for gravity forward modeling in this area are given in Tassara et al. (2006), Prezzi et al. (2009), Gutknecht et al. (2014) and Schaller et al. (2015).

Marine gravity data set The input data set represents the marine gravity field in the area of 70° to 78° W and 19° to 29° S. This data set is based on satellite altimetry (Andersen und Knudsen, 1998) and contains gridded data with a grid spacing of one over thirty degree (approximately 3.5 km). For the region of this study no particular error estimation is given by Andersen und Knudsen (1998), thus, a minimum error of $5 \cdot 10^{-5}$ m/s² is assumed, which concurs with their error assumption for the complete global data set. The data set used (Figure 25) contains more than 66 000 points. At each point, the Bouguer anomaly is given, which is commonly used for 3D density modeling. The entire amplitude of the Bouguer anomaly is $\approx 400 \cdot 10^{-5}$ m/s².

The prominent gravity anomalies in the given field with an amplitude of $\gg 5 \cdot 10^{-5}$ m/s² reveal a wavelength larger than 10 km. Four examples of such anomalies are marked in Figure 25 with black circles. The marked anomalies are caused by subsurface structures associated with the volcanic Iquique-ridge (see for example Tassara et al., 2006). Other significant anomalies in the gravity field are located along the trench (black dash-dotted line in Figure 25). In order to study the density structure causing the anomalies outlined above through 3D gravity forward modeling, a sampling of the gravity field with a minimum point distance of approximately 5 km is sufficient. This minimum distance is only needed in the areas with these significant gravity anomalies. The di-

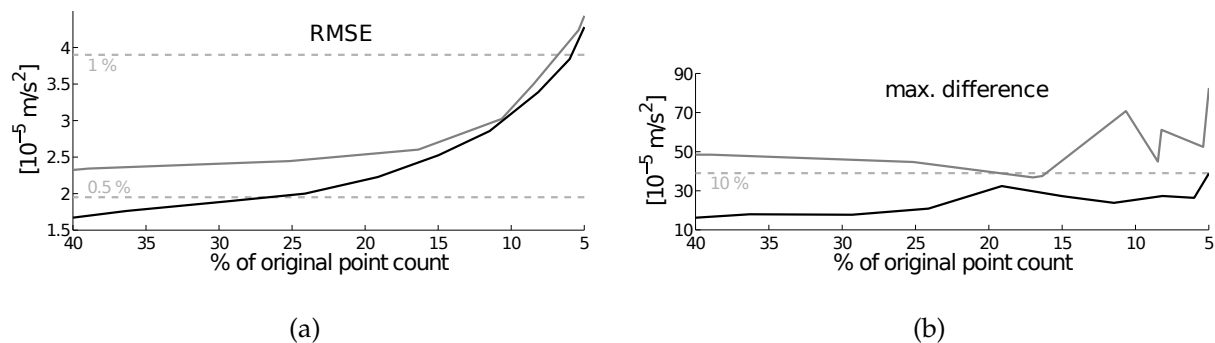


Figure 26: Development of the (a) rmse and (b) maximum difference for the marine gravity field data set. The errors are calculated for the reduction results of the CIDRe approach (black curve) and the minimum distance approach (gray curve). The light-graydashed lines show a percentage of absolute amplitude of the given Bouguer anomaly.

stances between the stations can be larger in areas with no prominent anomalies. Since the overall sampling distance of the original data is 3.5 km, the data set is oversampled and thus can be resampled to a variable point distance that is much larger over wide ranges.

Resampling the gravity station set To evaluate the resampling results, the data set was reduced to different reduction rates, from 40% to 5% of the original point count. Only two reduction approaches are applied here. In addition to the CIDRe approach, the selective minimum distance method was applied as a reference, because it has been routinely used in the past for reducing the amount of gravity stations (S. Schmidt, personal communication, 2013). For each reduction result, the rmse (see equation 7) and the maximum of the differences between the restored data sets and the original data set are calculated as described in the section “Validation by synthetic data” and plotted in Figure 26. The rmse of all reduced data sets created by the minimum distance approach are always higher than the rmse for the CIDRe results for similar reduction rates and are never less than 0.5% of the Bouguer anomaly amplitude. The error of the results created by the CIDRe method undershoots this limit for reduction rates higher than 25% of the original point count. For reduction rates lower than approximately 10% of original point count, the errors for both methods are similar and exceed a limit of 1% of the given parameter amplitude for rates less than approximately 7.5%. The maximum difference depends strongly on the specific locations of the data points used. For the reduced minimum distance data sets, it varies considerably and increases slightly for decreasing reduction rates. It falls below a limit of 10% of the parameter amplitude only for a few reduction rates between 20% and 15%. The maximum error of the CIDRe results never exceed this error limit and is significantly lower than the maximum error of the minimum distance results for most of the reduction rates used. In the left part

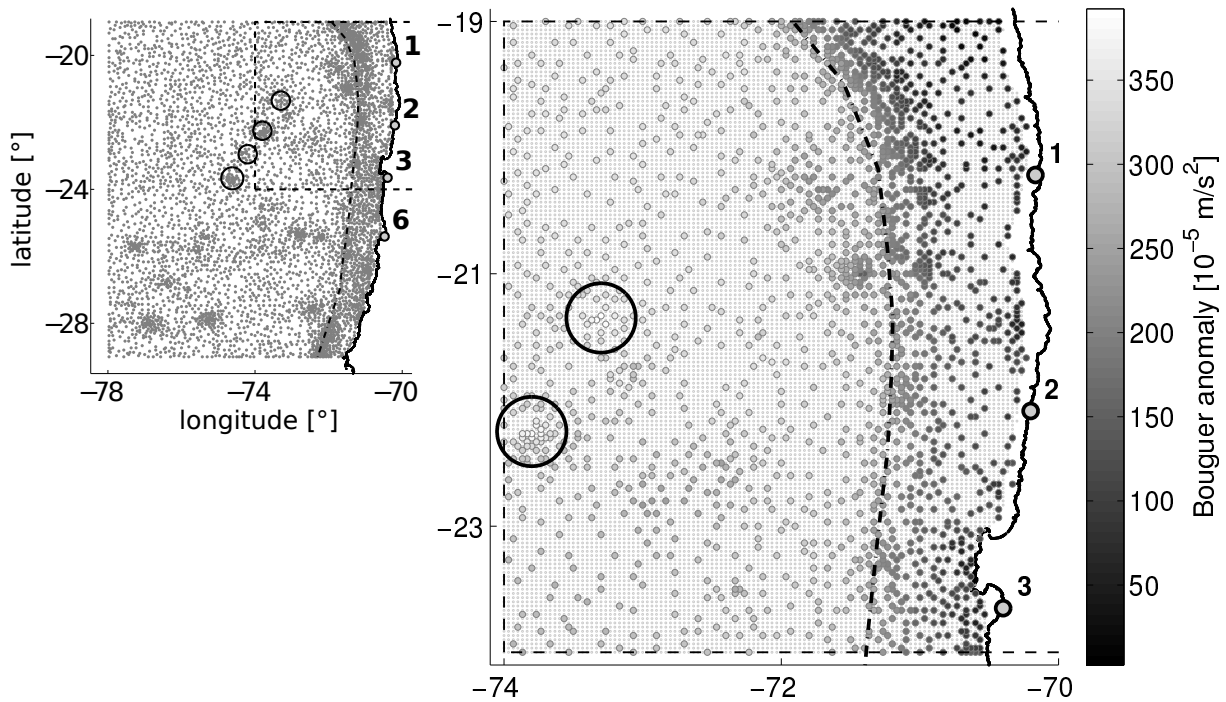


Figure 27: CIDRe-based resampling result for marine gravity field with approximately 8% of the original point count. The point distribution of the complete reduced data set is shown in the left panel displayed as gray dots. The modeling area of Schaller et al. (2015) is marked as the dashed line in both panels. A detail of the data in the bounds of the modeling area is shown in the right with the data points shaded according to the Bouguer anomaly. The gridded original point distribution is displayed by light gray dots in the right panel. The cities, coastline, and trench correspond to Figure 25. The areas of the prominent anomalies are also marked by black circles.

of Figure 8, the CIDRe result with slightly less than 5 500 data points is shown, which corresponds to approximately 8% of the original number of data points. In the right part, the reduced offshore data set for the modeling area of Schaller et al. (2015) is plotted, and the original point distribution is shown as underlying gray dots. This result contains a high point density in the areas with significant anomalies (see Figure 27) and a low data density in areas with less-pronounced anomalies. However, the final point distribution allows a minimum number of data points to model these anomalies accurately.

Integration of the resampled set of stations into the interactive 3D density modeling process A 3D density model described in Schaller et al. (2015) was used to validate the resampling result with only approximately 8% of stations (Figure 27) and to demonstrate benefits of a modeling workflow using a resampled set of gravity stations. The modeling area of Schaller et al. (2015) ($68^{\circ}\text{W} - 74^{\circ}\text{W}$ and $19^{\circ}\text{S} - 24^{\circ}\text{S}$) is marked as dashed lines in Figures 25, 27 and 28. The gravity effect of the density model was calculated in IGMAS+ for both station sets (initial and resampled) for this area. The model's

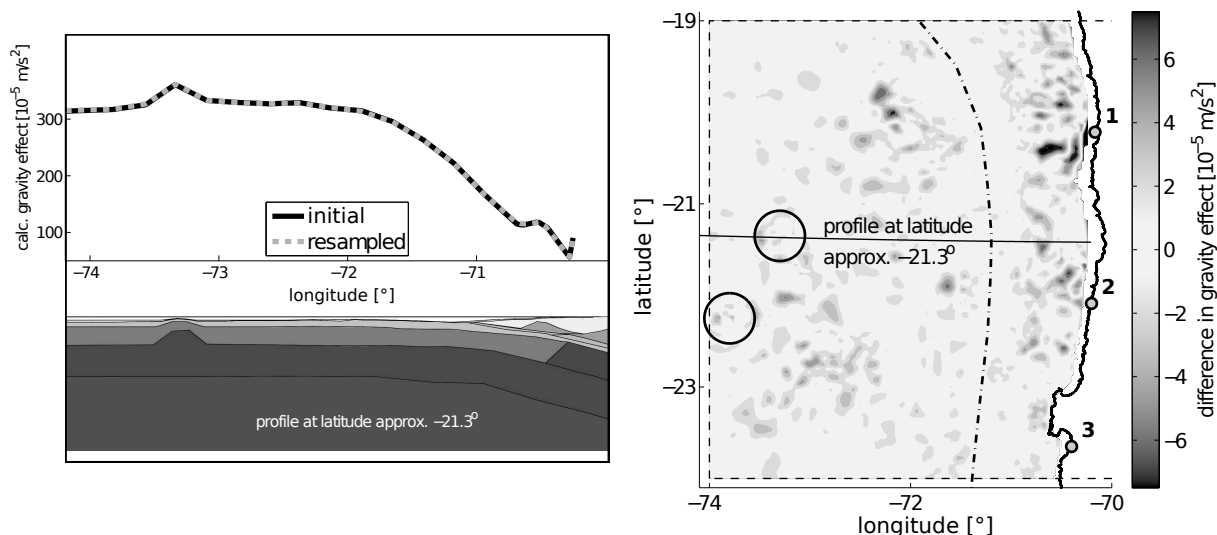


Figure 28: Results of gravity forward modeling with original and resampled station set for the 3D density model of Schaller et al. (2015). Left: The calculated gravity effect for the original (solid black) and resampled (dotted gray) station set along profile at latitude of approximately -21° . Right: Difference between the effects for original and resampled stations in the modeling area of Schaller et al. (2015).

calculated gravity effect for the resampled station set was interpolated onto the initial positions and is compared with the calculated effect for the initial station locations. Both resulting fields are displayed in Figure 28 (left) along a profile at latitude 21.3°S crossing one of the significant gravity anomalies described in the section “Marine gravity data set”. Figure 28 (right) presents the differences between both calculated fields in the study area of Schaller et al. (2015). The location of the profile displayed in Figure 28 (left) is marked as a solid black line in Figure 28 (right).

The rmse of this difference is approximately $0.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ and is far below the modeling accuracy of $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$. At the locations of the gravity anomalies described above there are no significant differences between the two fields. In some other areas (for example offshore the city of Iquique that is marked with ‘1’ in Figure 28) the differences exceed the accuracy limit. For these areas it is recommended to use the original station set for final adjustments of the density model.

The calculations are done on two different computers with different hardware specifications to evaluate the computation time benefits of the resampled data set. These computers are called PC A and PC B (hardware specifications: PC A, Intel Xeon W3530 2.8 GHz [four cores], 12 GB RAM, operating system: Linux, 64 bit; PC B, Intel Xeon W3503 2.4 GHz [two cores], 4 GB RAM, operating system: Windows 7, 64 bit). For both computers, the complete gravity effect of the model was calculated. Thereafter, different geometry nodes were adapted. For both operations, the elapsed calculation times were recorded with internal IGMAS+ capacities and are summarized in Table 4. To compute the gravity update for geometry changes, approximately 0.5 s are needed on

Table 4: Calculation time for the computers PC A and PC B to compute the complete gravity effect and the updates of the gravity effect for the original station set with >66 000 and the resampled set with <5 500 gravity stations.

		PC A	PC B
original	complete	≈ 500 s	≈ 800 s
	update	≈ 0.5 s	> 1.5 s
resampled	complete	≈ 40 s	≈ 65 s
	update	< 0.1 s	< 0.5 s

PC A, which already allows a nearly continuous interactive modeling. PC B needs more than 1.5 s. These delays interrupt the modeling process for each geometric adjustment. With such an update time, continuous interactive modeling is not impossible, but it is very time consuming. The resampled station set enables modeling with no significant delays due to decreasing the update times for both computers below the limit of 0.5 s. For initial geometry building in 3D density modeling using IGMAS+, a CIDRe resampled station set can be used to accelerate the update calculations, as pointed out above. When the geometry building process is nearly complete and the misfit of the gravity effect of the model with respect to the reduced data set is acceptable, the original station set should be used for small final model adjustments and validation.

Conclusion

Accurate resampling of highly resolved data sets to resolutions essential for a specific application is an important problem for interactive applications in geophysics. In this study, the new CIDRe method is introduced and the benefits of CIDRe are demonstrated. As seen from the results obtained for the synthetic data example, this method is able to represent this data set much better than resampling algorithms creating results with a homogeneous point distribution. These methods need a much higher number of data points to represent the parameter distributions with similar errors compared with CIDRe. Resampled gravity station sets from CIDRe are able to support interactive 3D potential field modeling by decreasing the update times significantly while retaining a similar modeling accuracy to using the original set of gravity stations.

The advantage of CIDRe is to reduce the point number of data sets with a strongly inhomogeneous distribution of the data parameter(s). For homogeneous parameter distributions, CIDRe does not achieve better results than regular reduction approaches. The resampling results can be used to increase the efficiency of algorithms that handle large scattered data sets regularly without accepting a significant loss of accuracy. In this study, CIDRe was applied to scattered 2D point data sets with one data parameter. The method is able to process 3D horizontal data (for example, geologic horizons)

and 3D point clouds, such as velocity cubes based on seismic studies, as well. CIDRe is also able to take multiple data parameters into account for point weight calculation. This multiparameter weighting is an objective of recent research and part of further improvements to CIDRe. Additionally, the usability of this method for geoscientific tasks besides interactive modeling and visualization will be evaluated in further studies.

The CIDRe algorithm is encapsulated into a stand-alone application called GUI-CIDRe, which is available for Windows and Linux. GUI-CIDRe includes an extended graphical user interface (GUI) that allows a comfortable parameterization of the algorithm. Additionally, it provides various interfaces for data input and output to the user. A code example for CIDRe to demonstrate the presented resampling and to reproduce the results of the section “Validation by synthetic data” is distributed with this paper. It is available via SEG with a standard license. In a future release of IGMAS+, the CIDRe method will be provided as an internal feature of this software. In addition, GUI-CIDRe software can still be obtained free via personal contact to the author. The CIDRe algorithm was implemented in MathWorks MATLAB. Most of the calculations in this work and all of the figures are done with MATLAB, as well. The GUI-CIDRe application was compiled using the MATLAB Compiler software.

4.1.2 Erweiterungen zum CIDRe-Verfahren

Der oben beschriebenen Grundansatz für das “CIDRe“-Verfahren (Menzel, 2016) verwendet nur Datenpunkte $P = P(x, y, z, p)$ mit einem Datenparameterwert p_P für jeden Punkt P aus der gegebenen Menge \mathcal{P} mit n_P Datenpunkten. Auch die Validierung und die beschriebene Anwendung verwenden nur einen Parameterwert zur Berechnung der Punktgewichte und es werden alle Datenpunkte als grundsätzlich gleichwertig für die Ausdünnung angenommen. Im Folgenden wird beschrieben, wie der CIDRe Ansatz für Möglichkeiten zur Bearbeitung von Datensätzen mit mehreren Datenparametern und auf die Verwendung von externen Punktgewichten erweitert werden kann.

Es ist leicht möglich, die Gewichtsrechnung auf Daten mit n_p Datenparameterwerten $P = P(x, y, z, p_1, p_2, \dots, p_{n_p})$ zu erweitern. Die beiden anderen Teile des Verfahrens (“Preprocessing” und “Irregular resampling”, siehe Abschnitt 4.1) sind davon nicht betroffen, da sie entweder unabhängig von den Datenparametern sind oder nur von den berechneten Gewichten abhängen.

Bei der Gewichtung anhand mehrerer Datenparameter wird für jeden Parameterwert eines Punktes P separat ein Gewicht berechnet. Dabei ist unerheblich, welcher spezielle Gewichtungsansatz (siehe Menzel, 2016, Gl. 2 bis Gl. 5) verwendet wird. Man erhält für jeden Punkt P n_p Einzelgewichte $\{w_1, \dots, w_{n_p}\}$. Das für das Verfahren zu verwendende

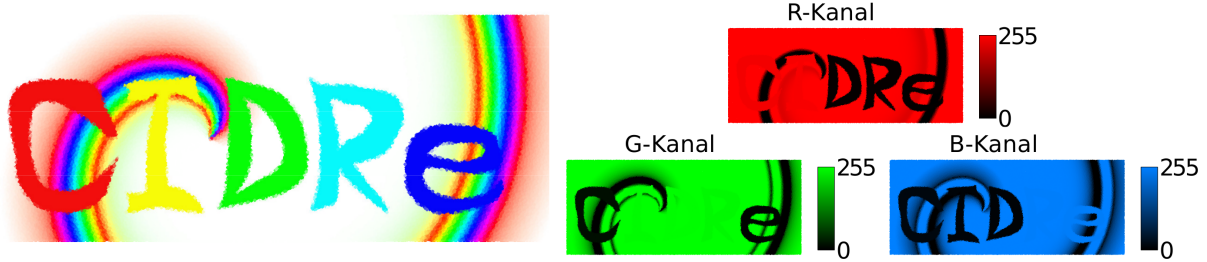


Abbildung 29: Ausschnitt aus einem Datensatz mit 500 000 zufällig verteilten Datenpunkten mit drei Parameterwerten (“R-Kanal”, “G-Kanal”, “B-Kanal”; rechts) pro Datenpunkt. Die Parameter basierend auf den RGB-Werten des Rasterbildes in der linken Teilabbildung (Abbildung nach Menzel (2015)).

Gesamtgewicht W_P kann dann entweder über

$$W_P = \max(w_1, \dots, w_{n_p}) \text{ oder} \quad (8)$$

$$W_P = \frac{1}{n_p} \sum_{j=1}^{n_p} w_j \quad (9)$$

bestimmt werden. Welche der beiden Überlagerungsmöglichkeiten aus Gl. 8 und Gl. 9 für eine spezielle Anwendung zu verwenden ist, hängt unter anderem vom gegebenen Datensatz ab. Zudem empfiehlt es sich, alle Parameterkomponenten zu normieren um zu vermeiden, dass unterschiedliche Amplituden zwischen den Komponenten die Gewichtung ungewollt beeinflussen. Dadurch wird zudem ermöglicht, eine gezielte relative Gewichtung der Parameterkomponenten untereinander anhand der normierten Komponenten durchzuführen.

Liegen sehr viele Datenparameter pro Punkt vor, kann die Dimensionalität des Parameterraums durch “principle component analysis” (PCA; Jolliffe, 2002) verringert werden. Die Punktgewichte werden anhand der in den Raum weniger Hauptkomponenten transformierten Parameterwerte berechnet und anschließend zu einem Gesamtgewicht W_P (Gl. 8 oder Gl. 9) überlagert.

Die Anwendbarkeit von CIDRe für Daten mit mehreren Datenparametern wurde mit dem in Abb. 29 dargestellten synthetischen Datensatz validiert. Es handelt sich um 500 000 verteilte Datenpunkte, deren drei Datenparameter “R-Kanal”, “G-Kanal” und “B-Kanal” auf den RGB-Werten einer farbigen Version des Rasterbildes in Abb. 2 beruhen. Der in Abb. 29 gezeigte Datensatz wurde analog zum synthetischen Datensatz in Menzel (2016) (Abb. 22) erzeugt. Auch die Validierung wurde wie in Menzel (2016) beschrieben durchgeführt, es wurde hier nur das “minimum distance”-Verfahren als Referenz verwendet. Für die Gewichtung wurde für jeden Datenpunkt das Maximum der drei W^1 Gewichte verwendet (Gl. 8). Die erzielten Ergebnisse sind in Abb. 30 (Fehlerentwicklung) und Abb. 31 (Resamplingergebnis mit 7% der Ausgangsdaten) dargestellt. Der absolute RMS-Fehler (entspricht “rmse” aus Gl. 7) des “minimum distance”-

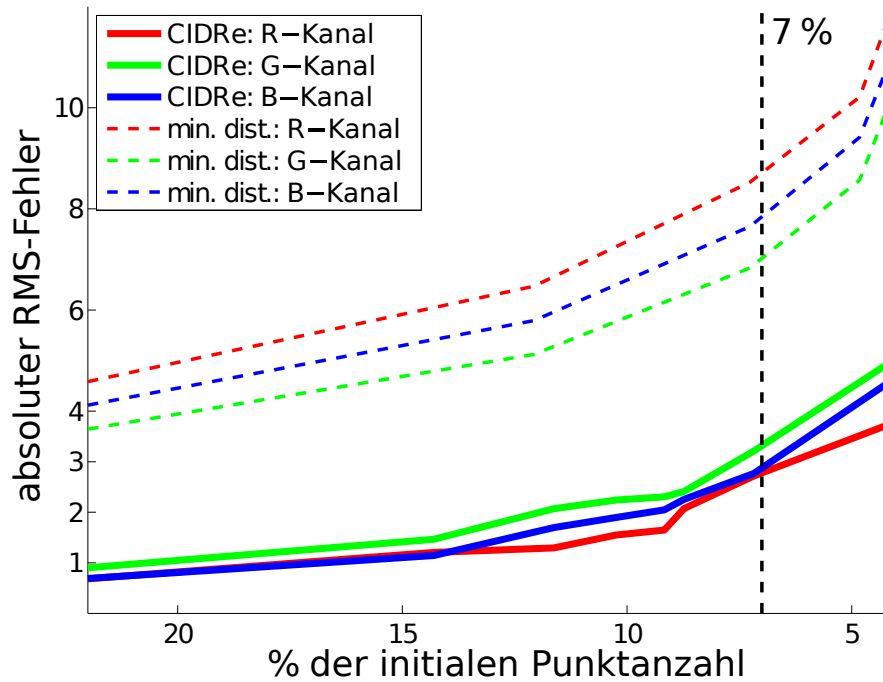


Abbildung 30: Entwicklung des absoluten RMS-Fehlers (entspricht "rmse" aus Gl. 7) für alle drei Parameter. Sowohl mit CIDRe als auch mit dem "minimum distance"-Ansatz (siehe Abschnitt 4.1.1; "min. dist.") wurde mit verschiedenen Reduktionsraten reduziert und die Fehler berechnet. Die Ergebnisse für 7% der initialen Daten sind in Abb. 31 dargestellt (Abbildung nach Menzel, 2015).

Ansatzes ist für diesen Datensatz immer mindestens doppelt so hoch wie der des CIDRe-Verfahrens für vergleichbare Reduktionsraten. Die resultierende Punktverteilung dem Ergebnis für den auf Grauwerten basierenden Datensatz aus Menzel (2016) (Abb. 24) ähnlich. Für den synthetischen Datensatz mit drei Parameterwerten sind die mit CIDRe erzielten Ergebnisse immer besser als die Ergebnisse des Referenzverfahrens. Gerade für Datensätze mit mehreren Datenparametern bietet sich demzufolge das CIDRe-Verfahren zur Reduktion des Datenumfangs an. In Anhang A.1 wird eine Anwendung von CIDRe für einen Datensatz mit mehrere Datenparametern aus dem Verbundprojekt AIDA (siehe Abschnitt 2.2) beschrieben.

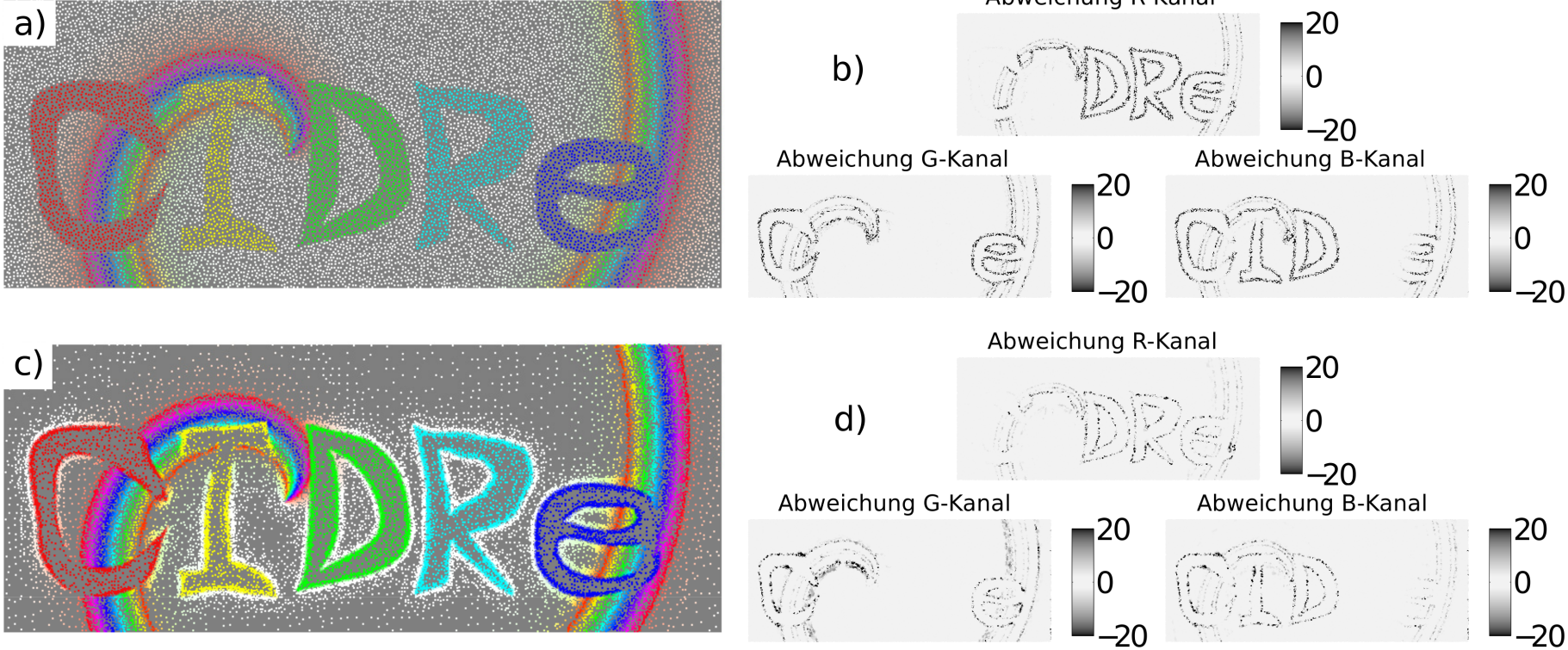


Abbildung 31: Resamplingergebnis mit 7% der initialen Punktzahl für den Datensatz mit drei Datenparametern. a): Ergebnis des "minimum distance"-Verfahrens; b) Abweichung in der drei Datenparameter vom Ausgangsdatsatz für das Ergebnis aus a; c): CIDRe-Ergebnis; d) Abweichung für das Ergebnis aus c (Abbildung nach Menzel, 2015).

In einigen Anwendungen ist es sinnvoll, zusätzlich zur Gewichtung anhand der gegebenen Datenparameter ein externes Gewicht $W_{P(ext.)}$ für jeden Punkt P zu verwenden. Dieses wird vom Anwender extern bestimmt und als zusätzliche Randbedingung dem CIDRe-Verfahren übergeben. Jedes im Gewichtungsschritt berechnete Punktgewichte W_P wird anhand des gegebenen externen Gewichts angepasst mit $\bar{W}_P = W_P \cdot W_{P(ext.)}$. Der "Irregular resampling" Schritt (siehe Abschnitt 4.1.1) wird dann anhand der angepassten Gewichte durchgeführt. Die externen Gewichte werden durch das CIDRe-Verfahren auch bei den folgenden Iterationen nicht verändert. In Anhang A.2 wird eine Anwendung des CIDRe-Verfahrens für einen Datensatz mit vorgegebenen externen Gewichten beschrieben. Es wird ein hoch aufgelöster Topografiedatensatz ausgedünnt, die externen Gewichte werden anhand der Entfernung der Topografiepunkte zu Messpunkten von Schweregradienten ermittelt.

Die Verwendung des CIDRe-Verfahrens ist aufgrund der vielen, in Menzel (2016) beschriebenen und vom Anwender vorzugebenden Kontrollparameter (z.B. Größe der Suchsektoren, Auswahl der Gewichtungsstrategie, Gewichtungsoffset, relative Gewichtung mehrerer Parameter) schwierig und nicht intuitiv. Aus diesem Grund wurde der CIDRe-Ansatz in die Anwendersoftware "GUI_CIDRe" integriert. Diese ermöglicht es dem Benutzer, die Kontrollparameter über eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) zu definieren, die Ergebnisse darzustellen und gegebenenfalls die auftretenden Resamplingfehler abzuschätzen. Es werden zudem verschiedene Eingabe- und Ausgabeschnittstellen bereitgestellt, um die Verwendung von unterschiedlichsten Datensätzen zu erleichtern. Die Anwendung "GUI_CIDRe" wurde in MATLAB implementiert und kann auch als vorkompilierte, allein stehende Anwendung verwendet werden. In der Anwendersoftware "GUI_CIDRe" sind für die Reduktion anhand von mehreren Parameterwerten sowohl die oben beschriebene Normalisierung der Parameterwerte, als auch interaktive Möglichkeiten für die relative Gewichtung integriert. Zusätzlich ist die Möglichkeit zur Integration von externen Punktgewichten vorgesehen. Der Quellcode für das Programm "GUI_CIDRe" liegt dieser Arbeit bei (siehe Anhang C, Anwendungen GUI_CIDRE.m und GUI_CIDREV2.m).

4.2 Optimierung triangulierter Modelle

Neben hoch aufgelösten Datensätzen aus verteilten, unabhängigen Punkten wurden im AIDA Projekt auch hoch aufgelöste triangulierte Geometriemodelle erstellt (Steinmetz et al., 2015, Abb. 17) und verwendet. Es stellt sich die Frage, wie sich triangulierte Modelle möglichst informationserhaltend vereinfachen lassen. Zudem galt es zu klären, ob die so vereinfachten Geometriemodelle weiterhin für eine Potentialfeldmodellierung in der Software IGMAS+ (siehe Abschnitt 3.1.2) geeignet sind.

Es existieren Algorithmen aus der Computergrafik, welche triangulierte Geometrien sehr effizient, konsistent und vor allem reversibel vereinfachen, ohne die Geometrie zu stark zu verändern. Im Folgenden wird das allgemeine Vorgehen für diese so genannte "Mesh-Simplification" erläutert und es werden verschiedenen Ansätze vorgestellt. Für diese Dissertation wurden drei Verfahren für die Anwendung in der Gravimetrie implementiert und evaluiert.

4.2.1 "Mesh-Simplification": Strategien zur hierarchischen Vereinfachung von triangulierten Geometrien

Das allgemeine Vorgehen für die hierarchische Vereinfachung triangulierter Geometrien (auch als "Mesh-Simplification" bezeichnet) basiert darauf, aus einem hoch aufgelösten Dreiecksgitter nacheinander Geometrieelemente (Punkte/Knoten, Kanten oder Dreiecke) zu entfernen, bis die gewünschte Anzahl an Geometrieelementen für eine Anwendung erreicht ist. Die Entfernung eines Geometrieelementes während eines Vereinfachungsschritts wird im Folgenden auch als "elementare Vereinfachung" bezeichnet. Welches Element in einem Schritt entfernt werden soll, wird über eine Kostenberechnung bestimmt. Je höher die Kosten für eine elementare Vereinfachung sind, desto später wird diese Vereinfachung in Betracht gezogen. Die Kosten repräsentieren so die "Wichtigkeit" eines Geometrieelements für eine Dreiecksvermaschung. In jedem Schritt wird immer ein Element hierarchisch basierend auf dem Ergebnis des vorherigen Schrittes entfernt. Dadurch lässt sich "Mesh-Simplification" sehr einfach reversibel anwenden. Es besteht die Möglichkeit, für jedes triangulierte Modell eine Menge an reduzierten Modellen in niedrigerer Auflösung bereitzustellen, welche ohne großen Aufwand ineinander überführt werden können. Es ist nie notwendig, alle reduzierten Modelle abzuspeichern, sondern es reicht aus, für jede Stufe die Änderungen in Geometrie und Topologie vorzuhalten. Die Reihenfolge der elementaren Vereinfachungen basiert je nach Implementierung und Anwendung auf verschiedenen Fehler- oder Kostenabschätzungen.

Es existieren verschiedene Ansätze, um eine Dreiecksvermaschung zu vereinfachen (z.B. Schroeder et al., 1992; Ronfard und Rossignac, 1996; Garland und Heckbert, 1997; Franc und Skala, 2002). Allen gleich ist dabei der grundlegende Ablauf.

Tabelle 5: Vergleich der verschiedenen existierenden und neuimplementierten Ansätze zur "Mesh-Simplification". "LTE": local tessellation error; "LGE": local geometry error; "QEM": quadric error metric; "DtM": distance to meanplane; "EC": edge contraction; "VD": vertex decimation; "✓": wird verwendet; "○": ist möglich, wird aber nicht verwendet; "-": wird nicht angewendet.

	existierende Ansätze			neu
	Ronfard und Rossignac (1996)	Garland und Heckbert (1997)	Schroeder et al. (1992) Franc und Skala (2002)	collapse polyhedron
Kostenberechnung	LTE/LGE	QEM	DtM	Volumen
Elementare Vereinfachung	EC	EC	VD	EC
Geometrieänderung	○	✓	-	-
lokale Neutriangulation	-	-	✓	-

Ausgehend von einem hoch aufgelösten Ausgangsmodell wird wie folgt vorgegangen:

1. Berechnung der initialen Kosten aller möglichen elementaren Vereinfachungen
2. Sortierung nach aufsteigenden Kosten
3. iteratives Entfernen
 - (a) Entfernen des Elements mit den niedrigsten Kosten
 - (b) Aktualisierung der Modellgeometrie
 - (c) Aktualisierung der Kosten für alle veränderten Elemente
 - (d) Neusortierung nach aufsteigenden Kosten
4. Abbruch wenn ...
 - ... weitere Vereinfachung nicht oder nur zu inakzeptablen Kosten möglich sind, oder
 - ... die Zielauflösung erreicht ist.

Die Unterschiede zwischen den Verfahren liegen vor allem in den verwendeten Ansätzen zum Entfernen der Elemente und der Bestimmung der zugehörigen Kosten. In Tab. 5 sind für die in Betracht gezogenen existierenden Verfahren sowie eine darauf basierende Neuimplementierung die verwendeten Strategien zur Vereinfachung und Kostenberechnung aufgeführt. Zudem ist für jedes Verfahren angegeben, ob neben der Topologie (Dreiecksvermaschung) auch die Geometrie der Dreiecksknoten verändert wird und ob in einem Vereinfachungsschritt eine zusätzliche lokale Neutriangulierung

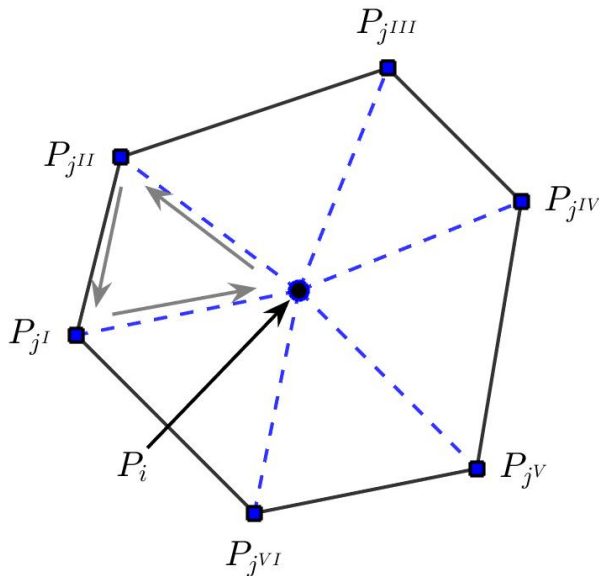


Abbildung 32: Ausgangssituation einer Triangulation vor dem Entfernen eines Punktes P_i . **Krone** (schwarze Kanten und alle Punkte P_j) und **Stern** (blaue gestrichelte Kanten) des zu entfernenden Punktes P_i . Die Drehrichtung der Dreiecke ist durch die grauen Pfeile angegeben.

notwendig wird.

Das von Franc und Skala (2002) vorgestellte Verfahren ist eine optimierte und erweiterte Implementierung des ursprünglich von Schroeder et al. (1992) vorgestellten Verfahrens. Aus diesem Grund verwenden beide Verfahren sehr ähnliche Ansätze. Für die Vereinfachung wird eine so genannte "vertex decimation" (VD) verwendet. Dabei wird ein separater Dreiecksknoten und alle diesen Knoten verwendenden Dreiecke aus der Triangulation entfernt und das entstandene "Loch" durch ein separates Triangulationsverfahren optimal neu trianguliert. Dieses Vorgehen ist allerdings vergleichsweise aufwändig. Die Kosten für eine Vereinfachung werden über ein so genanntes "distance-to-meanplane" (DtM)-Kriterium ermittelt. Um so näher sich ein Punkt P_i an der Ausgleichsebene durch alle seine Nachbarnpunkte (so genannten Kronenvertices, siehe Abb. 32) befindet, desto geringer werden die Kosten für die Vereinfachung dieses Punktes eingeschätzt. Die Geometrie der verbliebenen Dreiecksknoten wird nicht verändert.

Ronfard und Rossignac (1996) und Garland und Heckbert (1997) verzichten auf eine externe Neutriangulation, indem sie eine so genannte "edge contraction" (EC) zur Vereinfachung verwenden. Dabei werden pro Vereinfachungsschritt die beiden Endpunkte einer Dreieckskante entweder in einem neuen Knoten oder einem der beiden existierenden Punkte zusammengefasst. Dies führt im allgemeinen Fall sofort zu einer konsistenten Triangulation mit zwei degenerierten Dreiecken, welche sehr leicht identifiziert und aus der Datenstruktur entfernt werden können. Zur Berechnung der Vereinfachungskosten für die EC einer Kante $e(id_i, id_j)$ von Punkt P_i zu Punkt P_j evaluieren Ronfard und Rossignac (1996) das Maximum zweier Funktionen für die beiden betroffenen Knoten, LTE ("local tessellation error") und LGE ("local geometric error"). Der LTE beruht auf dem Vergleich der Richtung der Dreiecksnormalen vor und nach der EC einer Kante, \vec{n}_{before} und \vec{n}_{after} . Ziel ist es zu erkennen, ob und wie sich die Orientierung eines Dreiecks $T(id_1, id_2, id_3)$ ändert. Die Validierung der Änderung erfolgt über die Berech-

nung des Winkels A_{id_1, id_2, id_3} zwischen beiden Normalen. Dieser sollte möglichst klein sein. Gilt $A_{id_1, id_2, id_3} \approx \pi$, liegt ein so genannter "Flip" vor, das Dreieck ändert seine Orientierung. In diesem Fall darf die betreffende Kante nicht entfernt werden. Der LGE repräsentiert den Abstand des "neuen" Knotens P_j von allen Ebenen am "alten" Knoten P_i , den so genannten Kronendreiecken (Abb. 32). Diese sind alle Dreiecke, welche den Knoten P_i als Eckpunkt verwenden. Über die Optimierung von LTE und LGE kann auch ein neuer Punkt \bar{P}_j erzeugt werden, der einen minimalen Abstand zu den Ebenen an P_i hat. Ronfard und Rossignac (1996) verzichten aber aus Effizienzgründen auf diese Änderung der Geometrie.

Eine dem LGE entsprechende Kostenevaluation wird auch von Garland und Heckbert (1997) verwendet, welche die an einen Punkt P_i angrenzenden Ebenen über eine so genannte "quadric error metric" (QEM) Q_i mit $Q_i = \sum_{\forall \text{Ebenen } p \text{ an } P_i} pp^T$ mit $p = [abcd]^T$ repräsentiert. a , b , c und d entsprechen den Parametern einer Ebenengleichung mit $ax + by + cz + d = 0$ an P_i . Garland und Heckbert (1997) berechnen einen neuen Geometrieknoten \bar{P}_{ij} ausgehend von den bekannten Q_i und Q_j . Dafür wird folgendes Gleichungssystem gelöst:

$$\bar{P}_{ij} * \underbrace{(Q_i + Q_j)}_{\bar{Q}_{ij}} = \begin{bmatrix} \bar{P}_{ijx} \\ \bar{P}_{ijy} \\ \bar{P}_{ijz} \\ 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Basierend auf dem Gleichungssystem aus Gl. 10 wird \bar{P}_{ij} über

$$\begin{bmatrix} \bar{P}_{ijx} \\ \bar{P}_{ijy} \\ \bar{P}_{ijz} \\ 1 \end{bmatrix} = \bar{Q}_{ij}^{-1} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

bestimmt. Die Kosten für die Vereinfachung und die Verwendung des neuen Knotens \bar{P}_{ij} (Gl. 11) werden über $\bar{P}_{ij} \bar{Q}_{ij} \bar{P}_{ij}^T$ ermittelt. Von diesen drei existierenden Verfahren wurde nur Garland und Heckbert (1997) im Rahmen dieser Promotion implementiert und wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit unter der Bezeichnung "quadric error metric" verwendet.

Unter dem Namen "collapse polyhedron" wurde ein weiteres Verfahren implementiert. Dieses basiert auf den Arbeiten von Ronfard und Rossignac (1996) und Franc und Skala (2002). Hier wird während der Vereinfachung wie schon bei Ronfard und Rossignac (1996) kein neuer Geometrieknoten erstellt, sondern der "Endpunkt" P_j als Knoten \bar{P}_{ij} verwendet. Dies ist schematisch in Abb. 33 dargestellt. Um die ideale Kante zwischen P_i und allen Kronenvertices P_j (siehe Abb. 32, blaue Kanten) für die Vereinfachung

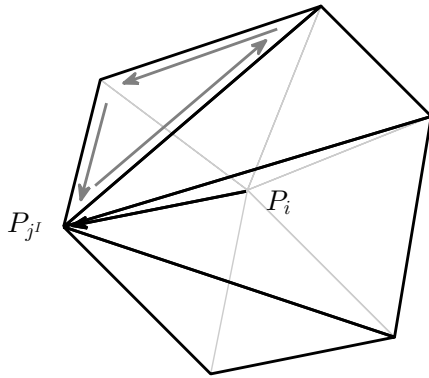


Abbildung 33: "Edge contraction" der Kante von Punkt P_i nach $P_{j'}$. Die Drehrichtung der neu entstandenen Dreiecke ist durch die grauen Peile angegeben.

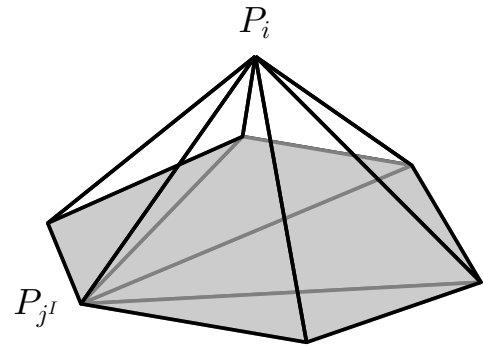


Abbildung 34: Schematische Darstellung eines idealen Vereinfachungs-Polyeders. Die transparenten Dreiecke entsprechen der in Abb. 32 dargestellten Ausgangstriangulation. Die grau eingefärbten Dreiecke entsprechen der in Abb. 33 gezeigten Triangulation nach dem Zusammenfassen der Kante $e(id_i, id_{j'})$ im Punkt $P_{j'}$.

zu finden, wurde das LTE-Kriterium verwendet, um nach der Vereinfachung Dreiecke mit inverser Drehrichtung ("Flip") zu vermeiden. Anstelle des DtM-Kriteriums wird für die Kostenberechnung die Volumenänderung des Modells durch die Vereinfachung evaluiert, da das Verfahren für Modelle in der Potentialfeldvorwärtsmodellierung verwendet werden soll. Umso kleiner die Volumenänderung, umso geringer die Änderung im berechneten Potentialfeldeffekt des Modells und umso geringer die Kosten dieser Vereinfachung. Die Volumenänderung wird über das Volumen des so genannten "Vereinfachungs-Polyeders" (Abb. 34) bestimmt. Dieser Körper wird aus allen von einer Vereinfachung beeinflussten Dreiecken gebildet. Die Dreiecke vor der Vereinfachung (transparent in Abb. 34) und nach der Vereinfachung (grau in Abb. 34) bilden die geschlossene triangulierte Hülle des Vereinfachungs-Polyeders. Alle Dreiecke werden mit einer einheitlichen Orientierung verwendet, die Normalenrichtung zeigt nach "außen". Das Volumen $V_{P_i \rightarrow P_j}$ dieses geschlossenen Körpers kann über

$$V_{P_i \rightarrow P_j} = \sum_{t=1}^{n_{CP}} \frac{A_t}{3} (\vec{n}_t \cdot \sum_{i=1}^3 P_t^i) \quad (12)$$

berechnet werden. n_{CP} ist die Anzahl der Dreiecke in der triangulierten Hülle, \vec{n}_T die Normale und A_T die Fläche eines Dreiecks T aus dieser Dreiecksvermaschung. P_T^1 , P_T^2 und P_T^3 sind die drei Eckpunkte dieses Dreiecks T . Gl. 12 beschreibt im Allgemeinen das analytische Volumen eines geschlossenen triangulierten Körpers (siehe zum Beispiel Goldman, 1991).

Für alle oben beschriebenen Verfahren gilt, dass jeder i -te Vereinfachungsschritt vom Ergebnis der vorhergehenden $(i - 1)$ -ten Vereinfachung des Dreiecksgitters abhängt. Alle n Vereinfachungsschritte bilden eine Hierarchie. Über diese lässt sich eine vereinfachte Version der triangulierten Geometrie mit einer bekannten Stufe s innerhalb der Hierarchie sehr leicht in eine angrenzende Stufe $s - 1$ oder $s + 1$ überführen. Auf diese Weise kann sukzessiv aus einer bekannten Detailstufe der Geometrie jede andere Stufe generiert werden. Ein Zwischenspeichern der gesamten Geometrie und Topologie einer speziellen Stufe ist nicht notwendig. Da benachbarte Stufen voneinander abhängen, ist der direkte Wechsel von einer Stufe s_i zu einer nicht benachbarten Stufe s_j nicht möglich. Es müssen vorher alle dazwischen liegenden Stufen durchlaufen werden. Ein großer Vorteil dieses Vorgehens ist, dass sich die entstandene Vereinfachungshierarchie sehr kompakt speichern und vorhalten lässt, da für jeden einzelnen Vereinfachungsschritt nur sehr wenige Informationen berücksichtigt werden müssen. Welche Informationen dabei gespeichert werden, hängt davon ab, ob Geometrieänderungen auftreten oder ob nur die Dreiecksvermaschung (Topologie) angepasst wird. In jedem Fall wird die lokale Triangulationsänderung benötigt, also die geänderten Dreiecke vor und nach der Vereinfachung. Pro Vereinfachungsschritt wird die Liste der Dreiecksdefinitionen gemäß der bekannten Informationen angepasst. Wenn die Geometrie bei der Vereinfachung angepasst werden soll, müssen zusätzlich die betroffenen Knotengeometrien vor und nach der Änderung gespeichert werden. Bei der Vereinfachung muss in diesem Fall zusätzlich die Liste mit den Knotendefinitionen aktualisiert werden.

Um die Verwendung von mittels "Mesh-Simplification" vereinfachten Geometrien für die Berechnung des Modelleffekts in den Schwerekomponenten und den Schweregradienten für diese Arbeit zu evaluieren, wurde die triangulierte Geometrie einer Kugel mit 8 000 Dreiecken (Abb. 35, links) durch die beiden Verfahren "collapse polyhedron" und "quadric error metric" vereinfacht. Nach jedem Vereinfachungsschritt wurde an den in Abb. 35 (links) rot markierten Positionen der Effekt der vereinfachten Geometrie in den Komponenten der Schwere und in den Schweregradienten mittels des in Abschnitt 3.1 beschriebenen Verfahrens von Götze (1976) und einer Standarddifferenz von $1 \frac{t}{m^3}$ berechnet und mit dem Effekt der Ausgangsgeometrie verglichen. Die Entwicklung des relativen RMSE (auch "rmse"; Gleichung 7) bezüglich des initialen Effektes in den Schwerekomponenten und -gradienten ist in Abb. 35 für beide Verfahren dargestellt. Die Fehler entwickeln sich relativ ähnlich, dabei weist das Verfahren "quadric error metric" grundsätzlich geringere Fehler als das Verfahren "collapse polyhedron" auf. "Quadric error metric" überschreitet einen maximalen Fehler von 1% in einer Komponente (V_z) erst bei einer Vereinfachung auf nur noch 1 000 Dreiecke, "collapse polyhedron" überschreitet diese Schranke in V_z bereits bei einer Vereinfachung auf 2 400 Dreiecke. Der Vorteil des Verfahrens von Garland und Heckbert (1997) besteht darin, dass durch die Adaption der Knotengeometrie die Volumenänderung minimiert

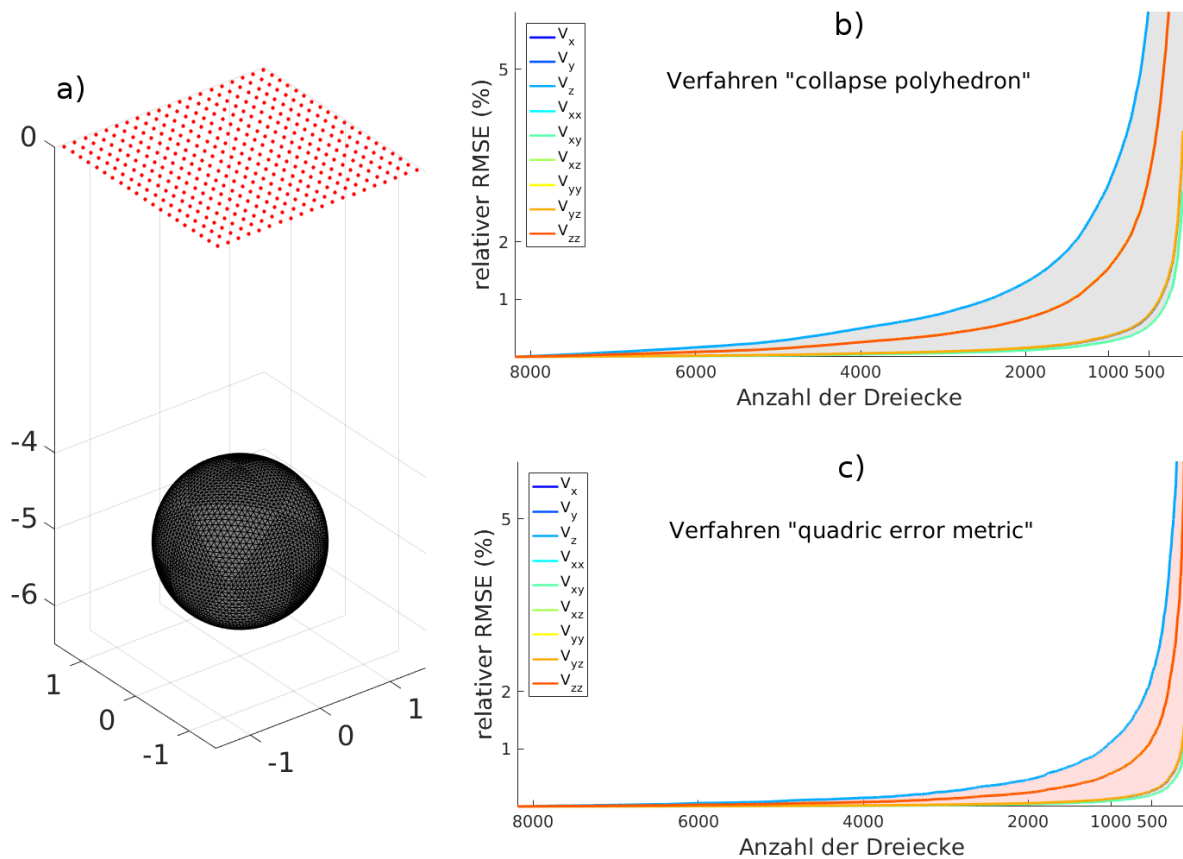


Abbildung 35: Evaluierung der verwendeten Vereinfachungsverfahren “collapse polyhedron” (b) und “quadric error metric” (c) anhand einer triangulierten Kugelgeometrie (a). Der Effekt aller vereinfachten Geometrieversionen in den Schwerekomponenten (V_x, V_y, V_z) und den Schweregradienten ($V_{xx}, V_{xy}, V_{xz}, \dots, V_{zz}$) wird an den in (a) rot markierten Positionen über der Kugelgeometrie berechnet und als relativer RMSE bezüglich des initialen Effektes in allen Komponenten dargestellt (b,c). Die farbigen Flächen markieren die Fehlerbereiche der beiden Verfahren.

werden kann, was geringere Änderungen im Schwereeffekt zur Folge hat. Da sich die Berechnungspositionen symmetrisch, oberhalb der kugelsymmetrischen Geometrie befinden, zeigt sich der Effekt der Vereinfachung hauptsächlich in den Vertikalkomponenten der Schwere V_z und des Schweregradienten V_{zz} , der Effekt in den horizontalen Komponenten ist kleiner. Zudem sind die Auswirkungen auf die verschiedenen Horizontalkomponenten aufgrund der horizontalen Symmetrie dieses synthetischen Beispiels sehr ähnlich. Grundsätzlich können beide Verfahren verwendet werden, “quadric error metric” erreicht zwar etwas bessere Ergebnisse, ist aber aufgrund der Geometrieadaption aufwendiger anzuwenden.

Die Ergebnisse der beiden oben beschriebenen Verfahren basieren allein auf der gegebenen Ausgangsgeometrie und können sehr leicht für verschiedene Anwendungen verwendet werden. Für die Berechnung des Schwerefeldeffekts der Geometrien ist die Vorgabe von Punkten (“Stationen”) notwendig, an denen der durch das Modell erzeugte Potentialfeldeffekt berechnet wird. Dabei ist zu beachten, dass unterschiedliche Felder

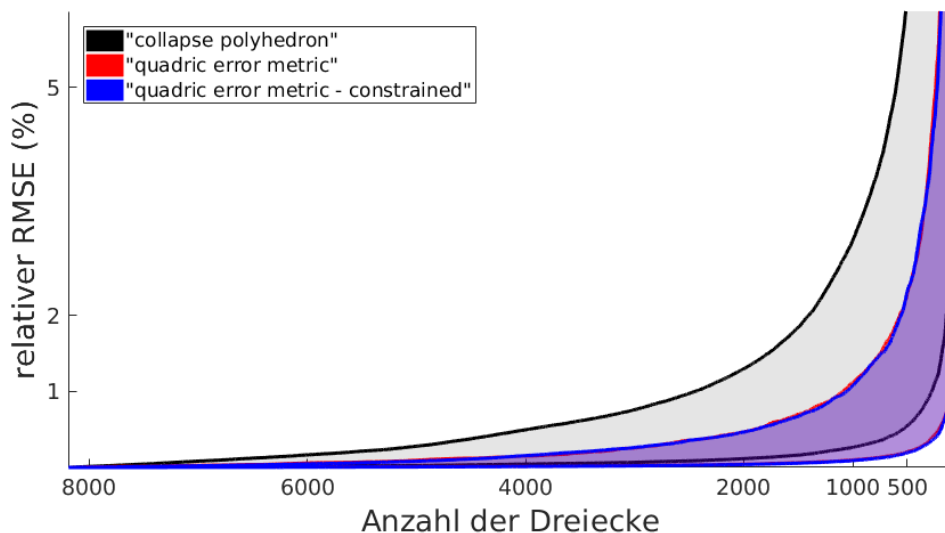


Abbildung 36: Vergleich der Ergebnisse der Vereinfachung unter Berücksichtigung der Stationspositionen mit dem Verfahren “quadric error metric - constrained” zu den Ergebnissen der nicht angepassten Verfahren (Abb. 35, b, c). Für das synthetische Beispiel aus (Abb. 35, a) hat das Miteinbeziehen der Berechnungsstationen in die Vereinfachung keinen Effekt. Für die beiden Verfahren “quadric error metric” und “quadric error metric - constrained” entwickelt sich der relative Fehler nahezu identisch.

unterschiedlich stark mit der Distanz r zwischen Berechnungsstation und Quelle des Feldes abfallen. So fällt zum Beispiel der Effekt der Schwerekomponenten mit $\frac{1}{r^2}$ ab, der Effekt der Schweregradienten mit $\frac{1}{r^3}$. Soll der Modelleffekt in den Schwerekomponenten und Schweregradienten für Geometrien berechnet werden, welche zuvor vereinfacht wurden, stellt sich die Frage, ob es sinnvoll ist, den Abstand zu den bekannten Stationen mit in die Kostenberechnung einzubeziehen. Ist eine Menge von Messstationen \mathcal{P} gegeben, lässt sich die in beiden Ansätzen verwendete Kostenberechnung erweitern, um die Änderung im Potentialfeldeffekt der vereinfachten Geometrie zusätzlich zu minimieren. Dafür muss der inverse Abstand eines zu vereinfachenden Geometrieelements zur am nächsten gelegenen Potentialfeldstation in die Kostenfunktion mit einfließen. Die erweiterten Kosten \bar{w}_n für die Vereinfachung eines Elementes E_n (z.B. einer Kante oder eines Knotens) ergeben sich wie folgt:

$$\bar{w}_n = w_n^{simplification} \left(d^{-p_{power}}(E_n, \mathcal{P}) \right) \quad (13)$$

$w_n^{simplification}$ repräsentiert die initialen Kosten einer Vereinfachung gemäß des verwendeten “Meshsimplification”-Ansatzes. Der Abstand $d(E_n, \mathcal{P}) = \min_{P \in \mathcal{P}} \|E_n - P\|$ ist der minimale euklidische Abstand von E_n zu einem Berechnungspunkt P . Da sich die Signifikanz bezüglich des Abstands für verschiedene Potentialfeldkomponenten unterschiedlich verhält, kann über den Exponenten p_{power} die Entfernungsabhängigkeit des Feldes mit in die Gewichtung einfließen. Dadurch wird erreicht, dass die Vereinfachungen in der Modelltriangulation in möglichst großer Entfernung von den Sta-

tionen erfolgen, da dort der Effekt der Geometrieveränderung auf das Berechnungsergebnis am geringsten ist.

Da das Verfahren “quadric error metric” für das verwendete synthetische Beispiel die besseren Ergebnisse erzielt, wurde es in dieser Arbeit zu einem weiteren Verfahren, “quadric error metric - constrained” erweitert. Dafür wurde die Kostenberechnung gemäß Gl. 13 mit $p_{power} = 2$ angepasst. Anschließend wurde das erweiterte Verfahren analog zu den beiden initialen Verfahren auf den synthetischen Datensatz (Abb. 35) angewendet und evaluiert. Der Vergleich zu den Ergebnissen aus Abb. 35 ist in Abb. 36 dargestellt. Es zeigt sich, dass sich die Ergebnisse von “quadric error metric - constrained” nur marginal von den Ergebnissen des nicht angepassten Verfahrens unterscheiden, die Anpassung hat die Qualität der Vereinfachung nicht verringert. Da in diesem synthetischen Beispiel alle $d(E_n, \mathcal{P})$ für alle Elemente sehr ähnlich sind, ist der Einfluss der Anpassung gering. Für die in Abschnitt 4.2.2 beschriebene Anwendung auf ein trianguliertes Modell einer realen Untergrundstruktur mit realen Berechnungspositionen ist diese Erweiterung der Kostenberechnung aber entscheidend.

Die oben beschriebenen Vereinfachungsstrategien lassen sich leicht auf beliebige triangulierte Modelle anwenden. Um bei einer Vereinfachung der in Abschnitt 3.1.2 beschriebenen konsistenten “Interface”-Modelle in IGMAS+ müssen zwei Bedingungen beachtet werden, um deren geometrische und topologische Konsistenz trotz Vereinfachung zu erhalten:

1. Ausschluss der äußeren Interface-Grenzen aus der Vereinfachung und
2. Vermeidung von Durchdringungen zwischen verschiedenen Interfaces eines Modells.

Da idealerweise jedes Interface separat vereinfacht wird, muss sichergestellt werden, dass die Grenze zu benachbarten Flächenstücken konsistent erhalten bleibt. Alle betroffenen Grenzknoten und -kanten müssen in beiden Interfaces weiterhin identisch sein. Um dies zu gewährleisten, sollten beim Aufbau der Vereinfachungshierarchie alle Grenzknoten und -kanten eines Interfaces von der Vereinfachung ausgenommen werden. Zudem muss sichergestellt werden, dass in einem Vereinfachungsschritt keine Dreiecke mit inverser Orientierung und keine Selbstdurchdringung des Interfaces auftreten. Nach jeder erfolgreichen Änderung der Triangulation muss geprüft werden, ob es zu Durchdringungen mit anderen Flächenstücken des Modells kommt. Wenn die Vereinfachung zu einer Durchdringung führt, wird die Vereinfachung entweder gestoppt oder ein anderes Geometrielement mit den nächst höheren Vereinfachungskosten verwendet. Die Implementierungen der drei beschriebenen “Mesh-Simplification”-Verfahren liegen in Form von zwei Matlab-Funktionen (`function_mesh-SimplificationV2.m` und `function_testLODbyQEM.m`) vor. Zusätzlich demonstriert die Anwendung `Demo_LOD2` die Vereinfachung von Interface-Modellen (siehe Anhang C).

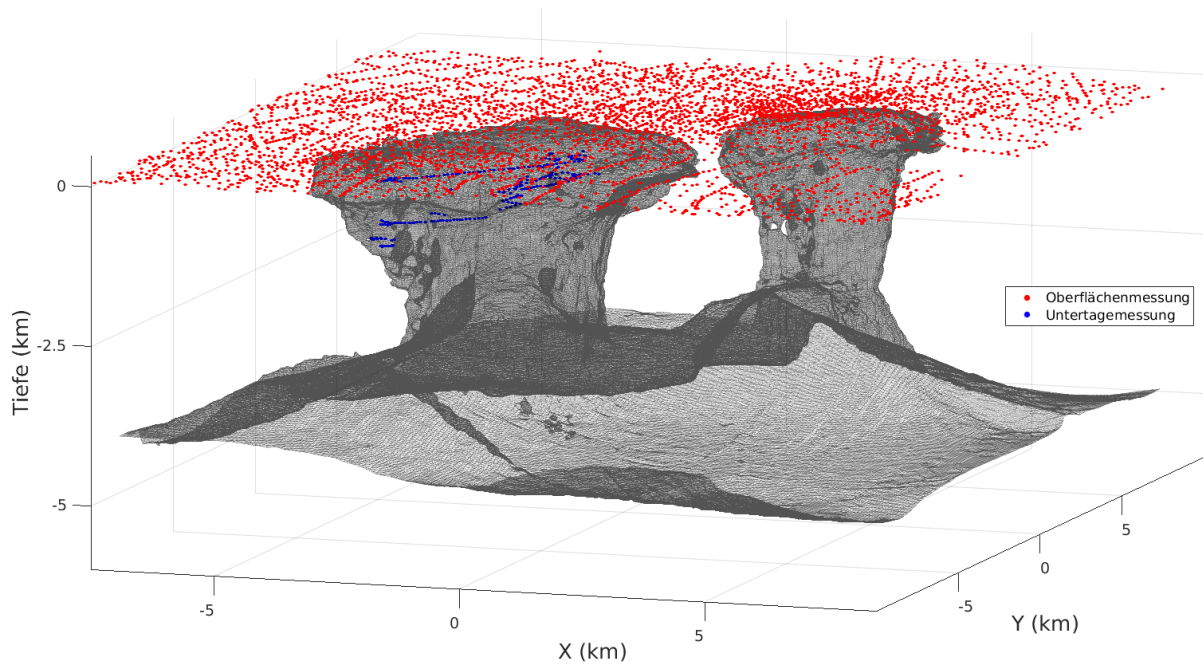


Abbildung 37: Modell zweier Salzstöcke im Gifhorner Trog mit 370 000 Dreiecken. Zusätzlich stehen 6 000 Messstationen an der Oberfläche (rot) und 250 Untertagemessungen (blau) zur Verfügung.

4.2.2 Anwendung: Vereinfachung der hoch aufgelösten Untergrundgeometrie zweier Salzstöcke in Norddeutschland

Im DGMK-Projekt TiPOT3D wurden in Kooperation mit Industriepartnern neue Methoden zur Anwendung und Interpretation von Potentialfeldern und ihrer Gradienten entwickelt. Um diese neuen Methoden realitätsnah testen zu können, stellten die Projektpartner das in Abb. 37 gezeigte hoch aufgelöste Untergrundmodell zweier Salzstöcke im Gifhorner Trog zur Verfügung gestellt. Da es sich um Industriedaten handelt, wird das Modell in Folgenden nur in lokalen Koordinaten verwendet. Die Geometrie besteht aus 370 000 Dreiecken und basiert auf hochauflösender 2D Seismik und Bohrlochdaten. Zusätzlich stehen 6 000 Schwerestationen an der Oberfläche und 250 Untertagemessungen innerhalb des Salzstockes zur Verfügung. Diese Schweremessungen wurden im Auftrag von Industriepartnern durchgeführt und nicht veröffentlicht. Aufgrund der vielen Dreiecke in der Modellgeometrie und der hohen Anzahl an Stationen ist die Berechnung des Modelleffekts in den Komponenten der Schwere und den Schweregradienten sehr aufwändig. Es stellt sich die Frage, wie stark die Geometrie ohne größeren Einfluss auf das Berechnungsergebnis vereinfacht werden kann. Dafür werden die drei im vorherigen Abschnitt beschriebenen Vereinfachungsverfahren auf dieses Modell angewandt und die Geometrie so über drei verschiedene Vereinfachungshierarchien reduziert. Die Validierung der Ergebnisse wird analog zum im vorherigen Abschnitt beschriebenen Vorgehen durchgeführt. Für dieses Modell wird eine maximale Fehlertoleranz von 1% vorgegeben. Dies bedeutet, dass der Fehler (RMSE; Gl. 7) für

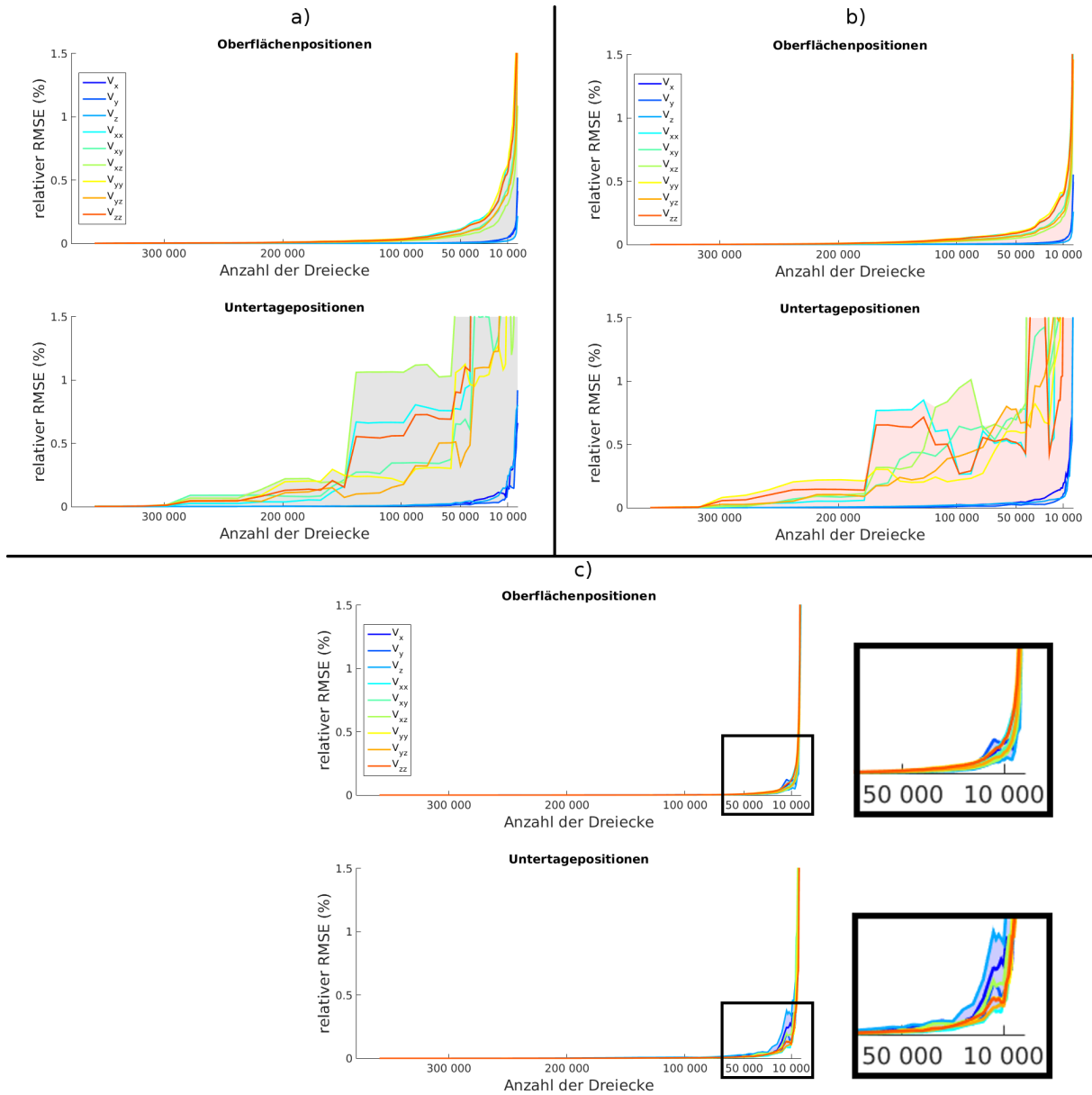


Abbildung 38: Abweichung im Schwereffekt durch die Vereinfachung des Geometriemodells der Salzstöcke im Gifhorner Trog. a) Verfahren "collapse polyhedron", b) Verfahren "quadric error metric", c) Verfahren "quadric error metric - constrained". In Abb. 39 ist ein genauerer Vergleich dieser Ergebnisse dargestellt.

das berechnete Feld in allen Komponenten nicht größer als 1% der Amplitude des Feldes in den berechneten Komponenten für die initiale Auflösung betragen darf. Für 45 Modellversionen mit zwischen 360 000 und 2 000 Dreiecken wird der Modelleffekt mit einer Dichtedifferenz von 1 t/m^3 in den Schwerekomponenten und den Schweregradienten berechnet und mit dem Effekt des initialen Modells verglichen. Die Ergebnisse der Validierung sind für jedes Verfahren einzeln in Abb. 38 dargestellt. Abb. 38 (a) zeigt die Ergebnisse für das Verfahren "collapse polyhedron", Abb. 38 (b) für das Verfahren "quadric error metric" und Abb. 38 (c) für das Verfahren "quadric error metric - constrained". Die Ergebnisse sind getrennt für die Oberflächenpositionen (oben in

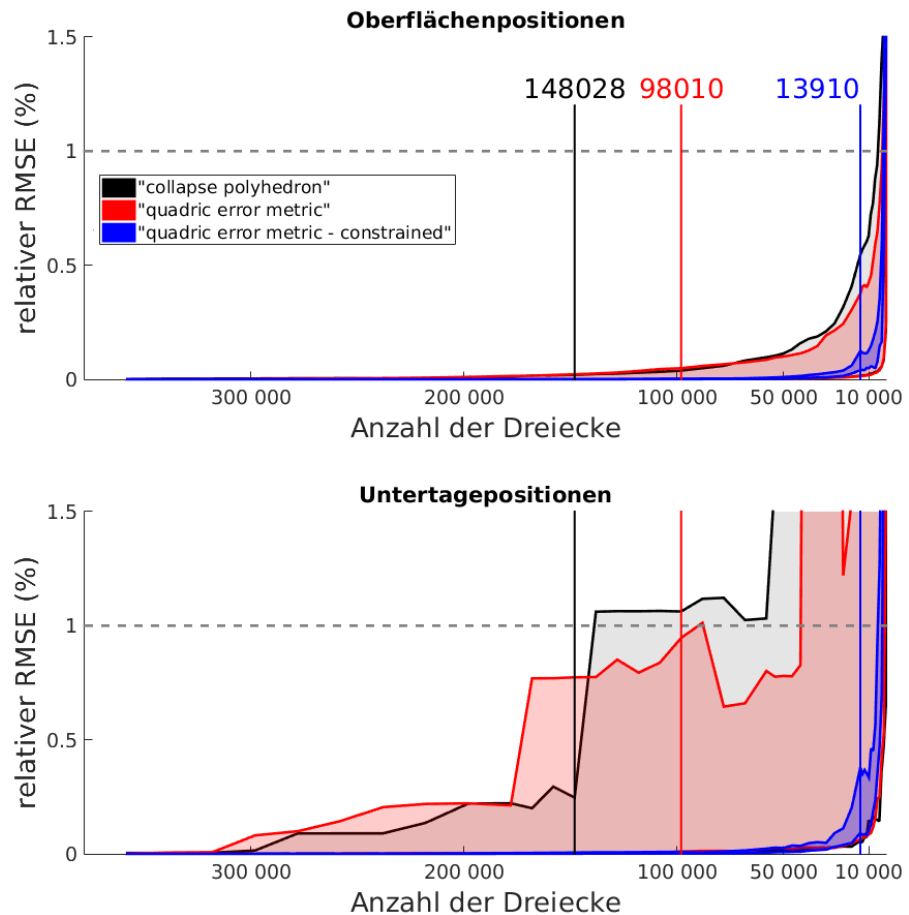


Abbildung 39: Vergleich der durch die Vereinfachung verursachten relativen Fehler im berechneten Schwereeffekt. Zusätzlich ist die minimale Anzahl der Dreiecke in der Modellversion angegeben, für die ein Fehler von unter 1% erreicht wurde.

Abb. 38 a, b, c) und Untertagepositionen (unten in Abb. 38 a, b, c) dargestellt. Für das Verfahren "quadric error metric - constrained" wurden sowohl der Abstand zu den Oberflächenpositionen als auch zu den Untertagepositionen verwendet, um die Gewichtsberechnung anzupassen. In Abb. 39 sind, analog zu Abb. 36, die sich ergebenden Fehlerbereiche zum Vergleich übereinander dargestellt.

Für die Positionen an der Erdoberfläche sind alle Ergebnisse sehr ähnlich. Es genügen für alle drei Verfahren niedrig aufgelöste Geometrieversionen mit etwa 10 000 Dreiecken, um einen Fehler von unter 1% in jeder Komponente zu erreichen. Es zeigt sich jedoch bereits für die Oberflächenpositionen, dass die Fehler für das Verfahren "quadric error metric - constrained" in allen berechneten Komponenten sehr ähnlich und vor allem für Auflösungen mit 150 000 bis 10 000 Dreiecken sehr viel kleiner sind als für die beiden nicht angepassten Verfahren. Sehr viel deutlicher zeigen sich die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Vereinfachungsverfahren an den Untertagepositionen, die sich sehr viel näher an der Geometrie befinden. Für die Verfahren "collapse polyhedron" und "quadric error metric" steigen die Fehler in einigen Komponenten bereits ab einer Vereinfachung auf rund 150 000 Dreiecke stark an und überschreiten das Limit von 1% bereits bei weniger als 148 000 ("collapse polyhedron") oder 98 000 ("quadric error metric") Dreiecken. Dadurch, dass Dreiecke, welche sich nah an den gegebenen Messstationen befinden bei der Vereinfachung mit höheren Kosten herangezogen werden,

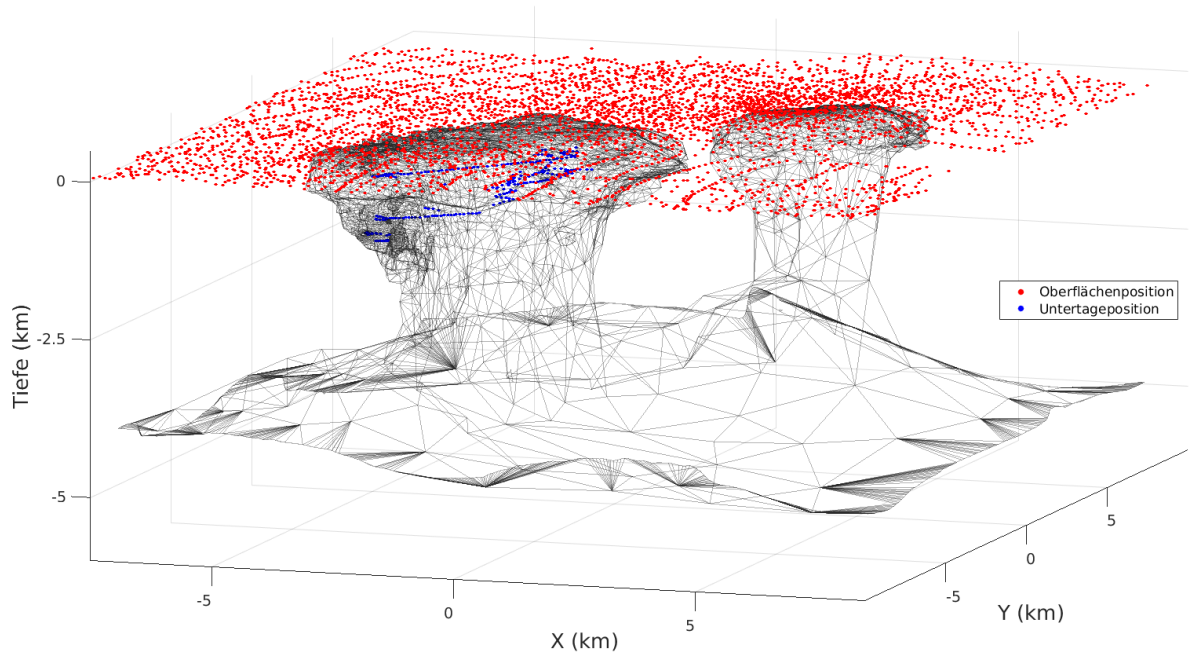


Abbildung 40: Vereinfachtes Modell der Salzstöcke im Gifhorner Trog mit einer Reduktion auf 14 000 Dreiecke. Eine sehr hohe Modellauflösung wird nur in unmittelbarer Nähe zu den Messstationen (rote und blaue Punkte) verwendet.

erreicht das Verfahren “quadric error metric - constrained” für die Untertagepositionen sehr viel bessere Ergebnisse. Erst für eine Version mit weniger als 14 000 Dreiecken wird eine Abweichung von mehr als 1% in mindestens einer Komponente erreicht und damit die gegebene Fehlerschranke überschritten. Diese Version der Modellgeometrie ist in Abb. 40 zusammen mit den verwendeten Berechnungsstationen dargestellt. Die Geometrie weist nur in den Regionen nah an den Stationen, an der Oberseite der Salzstöcke und an der vorderen Flanke des linken Salzstocks, eine sehr hohe Auflösung auf. In weiter entfernten Regionen ist die Auflösung sehr viel gröber. Sie ist aber immer noch ausreichend, da der Einfluss dieser entfernten Dreiecke für die Schwerekomponenten quadratisch zum Abstand und für die Gradienten mit der dritten Potenz des inversen Abstandes abnimmt. Die Ergebnisse der anderen beiden Verfahren weisen global, also auch in den entfernten Regionen, eine homogene Auflösung auf. Für eine effiziente Berechnung des Modelleffektes in den Schwerekomponenten und den Schweregradienten ist das in Abb. 40 dargestellte Ergebnis der “quadric error metric - constrained” Vereinfachung am besten geeignet, da es sehr viel geringere Rechenzeiten bei akzeptablem Fehler erlaubt. Die in diesem Abschnitt beschriebenen Ergebnisse wurden erstmals in Menzel et al. (2016) vorgestellt.

4.3 Zusammenfassung und Fazit

Hoch aufgelöste Punktdatensätze und Modellgeometrien behindern eine effiziente Verarbeitung und Präsentation. Häufig wird angestrebt, die Auflösung dieser Datensätze

zu verringern und an die Erfordernisse der jeweiligen Anwendungen anzupassen. Die in diesem Kapitel vorgestellten Verfahren sind dafür besser geeignet als andere Verfahren mit dem selben Ziel. Das in Abschnitt 4.1 beschriebene CIDRe-Verfahren erlaubt es, Datensätze mit sehr vielen verteilten aber unabhängigen Datenpunkten in 2D und 3D mit einem oder mehreren gegebenen Datenparametern informationserhaltend ausdünnen. Die in Abschnitt 4.1.1 und Anhang A vorgestellten Anwendungen zeigen die vielfältige Nutzbarkeit dieser Downsamplingmethode. Sie ist grundsätzlich nicht an ein spezielles geophysikalisches Verfahren oder spezielle Datenparameter gebunden, sondern kann für beliebige Daten verwendet werden, solange mindestens ein Datenparameter als Randbedingung angegeben werden kann.

Für die Optimierung triangulierter Modellgeometrien kann CIDRe jedoch nicht ohne Einschränkungen verwendet werden. Dafür bietet sich stattdessen die Klasse der "Mesh-Simplification"-Verfahren aus der Computergrafik an, die in Abschnitt 4.2 vorgestellt wird. Auf diese Art vereinfachte Geometriemodelle lassen sich weiterhin sehr gut für die Berechnung der Schwere verwenden, da die verwendeten Verfahren die topologische Konsistenz der initialen Geometrien erhalten und zusätzlich die Berechnungspositionen in die Vereinfachung mit einfließen können.

Neben verteilten, unabhängigen Datenpunkten und triangulierten Geometriemodellen existieren noch weitere Klassen von Datenrepräsentationen, auf welche die beschriebenen Verfahren nicht direkt angewendet werden können. Ein Beispiel sind regelmäßige Rasterdaten in 2D und 3D, welche sich durch ihre sehr kompakte Datenstruktur und feste Topologie auszeichnen. Wird auf diese Art von Datensätzen das CIDRe-Verfahren wie beschrieben angewendet, werden die Vorteile dieser Datenstruktur ignoriert und liegen in den ausgedünnten Ergebnisdatsätzen nicht mehr vor. In diesen Fällen bietet also das beschriebene parameter-abhängige Resampling kaum oder gar keine Vorteile. Das CIDRe-Verfahren kann aber grundsätzlich auf die Klasse der Rasterdatensätze angepasst werden. Die in dieser Arbeit vorgestellten "Mesh-Simplification" Verfahren sind für die Verwendung auf triangulierten Flächen ausgelegt. Eine Erweiterung auf Tetraedergitter oder andere irreguläre Gitter ist möglich, wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht durchgeführt.

Es konnte anhand von verschiedenen Anwendungsbeispielen gezeigt werden, dass eine Optimierung von verteilten Punktdatensätzen und triangulierten Geometrien möglich und angemessen ist. Die optimierten Datensätze lassen sich äquivalent zu den Ausgangsdatsätzen für die jeweiligen numerischen Anwendungen der Geophysik nutzen. Dabei ist ein im Vergleich zu den Ausgangsdatsätzen viel geringerer Ressourcenaufwand bezüglich Rechenzeit und Speicherkapazität notwendig.

5 Statistische Abschätzung von Parametermodellen

In der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Anwendung bezüglich der Validierung des 3D Untergrundmodells der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne konnten keine endgültigen Aussagen über die reale Dichteverteilung innerhalb des für den Schwereeffekt des Modells besonders entscheidenden oberflächennahen lithologischen Einheiten getroffen werden. Für das Gebiet des in Abschnitt 3.3 verwendeten Untergrundmodells (Abb. 16) liegt zusätzlich ein hochauflösender 3D Punktdatensatz mit spezifischen Widerständen vor. Diese basieren auf der 1D Inversion von Elektromagnetik-Messungen in diesem Gebiet (Siemon et al., 2004; Siemon et al., 2009; Steinmetz et al., 2015). Es stellt sich die Frage, ob und in wie weit es möglich ist, aus dieser Widerstandsverteilung Informationen über die Verteilung der Dichten in diesem Gebiet abzuleiten, auch wenn keine direkte Beziehung zwischen elektrischen Widerständen und Dichten existiert.

In diesem Abschnitt wird ein statistischer Ansatz vorgestellt, der es ermöglicht, anhand einer bekannten Verteilung eines Untergrundparameters die Verteilung eines unbekanntes Parameters abzuschätzen. Dabei soll es nicht das Ziel sein, eine endgültige absolute Verteilung zu erhalten, sondern viel mehr Aussagen über die relative Verteilung zu treffen. Diese können dann gegebenenfalls als Startbedingungen für eine spätere Parameterinversion verwendet werden.

5.1 Methodischer Hintergrund

Integrierte Modellierung durch multi-parameter Studien zur Risikoabschätzung, Analyse von Sedimentbecken und Lagerstättenexploration ist eine wichtige Problemstellung sowohl in der angewandten als auch in der klassischen Geophysik. Dabei werden möglichst viele unterschiedliche geophysikalische Parameter gemessen, bearbeitet und gemeinsam ausgewertet. Dies wird dadurch erschwert, dass nur wenige exakte physikalische Zusammenhänge zwischen Gesteinseigenschaften wie z.B. Dichte, Porosität, seismische Geschwindigkeit oder elektrischer Widerstand bekannt sind. Ein Positivbeispiel sind die bekannten Zusammenhänge zwischen seismischen Geschwindigkeiten und Dichten (u. a. Gardner et al., 1974). Im Gegensatz dazu existieren jedoch z.B. keine physikalischen Gleichungen, welche einen exakten Zusammenhang zwischen elektrischem Widerstand und Massendichte beschreiben. Häufig ist es aber möglich, eine empirische Korrelation für eine lokales Gebiet mit einer spezifischen Umgebung aufzustellen.

In diesem Abschnitt sollen solche lokalen Korrelationen zwischen beliebigen Parametern mittels eines statistischen Ansatzes abgeschätzt werden. Dabei wird eine statistische Vorgehensweise getestet, die eine automatisierte Parameterabschätzung erlaubt und auch von unerfahrenen Anwendern für eine interdisziplinäre Modellierung verwendet werden kann. Die grundsätzliche Idee basiert auf einer statistischen Analyse

einer bekannten Parameterverteilung. Diesen bekannten Parameterwerten werden abgeschätzte Werte für einen unbekanntem Untergrundparameter anhand von relativen Häufigkeiten und Auftretswahrscheinlichkeiten zugeordnet.

Präziser formuliert: Das Ziel dieses Verfahrens ist es, eine existierende Parameterverteilung S ("source", Quelle) vorzugeben und daraus unter gegebenen Nebenbedingungen die Zielparameterverteilung T ("target", Ziel) abzuschätzen. Einer bekannten Verteilung S wird dabei eine unbekanntem Verteilung T zugeordnet. Die "schwache" Grundannahme ist, dass wenn sich innerhalb eines Areal ein Gesteinsparameter ändert, sich die anderen physikalische Parameter ebenfalls ändern, da die Entstehungsprozesse im untersuchten Gebiet auf alle Gesteinsparameter eingewirkt haben. Es wird vorausgesetzt, dass eine Korrelation der Form

$$T = C(S) \quad (14)$$

grundsätzlich existiert. C ist meist unbekannt und soll über die Häufigkeits- oder Wahrscheinlichkeitsverteilung von S abgeschätzt werden. Die gegebene Parameterverteilung S kann entweder als die Verteilung innerhalb eines Untergrundmaterials oder als die sich zum Teil überlagernden Verteilungen einer Menge von aneinander grenzenden, definierbaren Stoffklassen interpretiert werden. Eine wichtige Voraussetzung ist, dass sich die Grenzen zwischen diesen Klassen definieren lassen. Eine Mischung mehrerer Stoffe wird für den beschriebenen Ansatz ausgeschlossen, es sei denn, diese Mischung lässt sich wiederum als ein weiteres, separierbares "Material" klassifizieren. Die geschätzte Verteilung des Zielparameters T ist bestenfalls eine mögliche relative Parameterverteilung, die absoluten Werte bedürfen einer weiterer Interpretation.

Im Folgenden wird erläutert, wie sich T unter gegebenen Nebenbedingungen anhand eines bekannten S abschätzen lässt. Diese Nebenbedingungen können sein:

- ein bekannter oder abschätzbarer funktionaler Zusammenhang beider physikalischer Parameter
- die bekannte oder geschätzte Dichtefunktion $\mathcal{S}(S)$ der Wahrscheinlichkeitsverteilung des gegebenen Parameters S oder die Dichtefunktion $\mathcal{T}(T)$ des Zielparameters T
- der bekannte Parameterbereich von T oder deren statistische Eigenschaften (Erwartungswert, Varianz ...)
- die mögliche positive oder negative Korrelation beider Parameter
- eine petro-physikalische Klassifizierung beider Parameterverteilungen

Das Ziel ist eine *surjektive* Abbildung $S \rightarrow T$, sodass einem Wert $s_i \in S$ immer ein eindeutiger Wert $t_i \in T$ zugeordnet werden kann.

5.1.1 Ausgangsannahmen und statistischer Hintergrund

Wenn die gegebene Parameterverteilung nur eine Stoffklasse beschreibt, ist es das Ziel Werte oder Wertebereiche beider Parameterverteilungen mit ähnlichen Eigenschaften, z.B. Zugehörigkeit zu einem definierten Parameterintervall, Auftrittshäufigkeit oder Auftrittswahrscheinlichkeit zu assoziieren. Dabei wird einem gegebenen Wert $s_i \in S$ ein Wert $t_i \in T$ zugeordnet. Bei $n_{sc} > 1$ aneinander grenzenden Stoffklassen wird diese Zuordnung für jede Klasse separat getroffen. Dadurch erhält man für jeden gegebenen Wert s_i aus S eine Menge von Werten $t_i^1 \dots t_i^n$ ($0 \leq n \leq n_{SC}$) aus T . Um daraus eine Aussage über einen eindeutigen Wert t_i ableiten zu können, müssen zusätzliche Annahmen getroffen werden. Auf diese klassifizierte Abschätzung wird in Abschnitt 5.1.3 näher eingegangen.

Wenn eine Abhängigkeit $S \rightarrow T$ der Form $T = C(S)$ existiert und diese bekannt ist, ist die Zuordnung eines Wertes s_i mit einem Wert t_i trivial und T kann leicht aus S abgeleitet werden. Solche Zusammenhänge sind derzeit leider nur in sehr wenigen Fällen vorhanden, weshalb dieser Ansatz nur selten direkt angewendet werden kann. Gleichwohl kann häufig die Existenz einer Relation zwischen S und T angenommen werden, da die Werte $s_{\vec{P}}$ und $t_{\vec{P}}$ am selben Raumpunkt \vec{P} definiert sind und dem selben Material zugeordnet werden. Für ein und das selbe Material kann angenommen werden, dass wenn sich ein physikalischer Parameter ändert, sich alle anderen Parameter ebenfalls in irgendeiner Art und Weise ändern. Dies lässt sich damit begründen, dass bei der Genese des Materials die aufgetretenen physikalischen Prozesse auf **alle** Gesteinsparameter eingewirkt haben.

Konventionelle Zuordnung anhand von Parameterintervallen und Interpretation

Die Ableitung einer unbekanntenen Verteilung eines physikalischen Parameters aus einer bekannten Verteilung eines anderen Parameters bereitet in der praktischen Anwendung oft Schwierigkeiten, wenn keine oder nur eine "schwache" Relationen zwischen beiden Parametern bekannt sind. In diesen Fällen wird meist eine direkte Interpretation anstelle eines funktionalen Zusammenhangs verwendet, um beide Parameter einander zuzuordnen. Dabei wird die bekannte Verteilung S in n_d diskrete Intervalle $S_{min} \leq S_1 < S_2 < \dots < S_{n_d} \leq S_{max} \in S$ unterteilt. S_{min} und S_{max} sind die Extremwerte von S . In einem darauf folgenden Interpretationsschritt wird jedem dieser Intervalle anhand von Labor- oder Feldmessungen ein Material oder eine lithologische Einheit zugeordnet. Diese Zuordnung ist dadurch meist auf das begrenzte Untersuchungsgebiet, für das die Messungen durchgeführt wurde, beschränkt. Dann wird für die zugeordneten Materialien jeweils ein diskreter Wert $t_1, t_2, \dots, t_{n_d} \in T$ passend für dieses Material

gewählt. Ein spezieller Wert t_i wird dann einem Wert s_i wie folgt zugeordnet:

$$t_i = \begin{cases} t_1 & \text{für Material 1 mit } S_{min} \leq s_i < S_1 \\ t_2 & \text{für Material 2 mit } S_1 < s_i < S_2 \\ \vdots & \ddots \\ t_{n_d} & \text{für Material } n_d \text{ mit } S_{n_d-1} < s_i \leq S_{max} \end{cases} \quad (15)$$

Diese Vorgehensweise wird häufig in interdisziplinären Studien, unter anderem auch in Steinmetz et al. (2015), verwendet und erlaubt es, verschiedenste physikalische oder petrologische Parameter über bekannte geologische Einheiten einander zuzuordnen. Ein großer Nachteil dieser Art der Zuordnung ist, dass immer nur ein einzelner spezifischer und konstanter Wert aus T für eine geologische Einheit definiert wird, auch wenn mehrere unterschiedliche Werte aus S dafür gelten können. Es ist darum nicht möglich, interne Variationen innerhalb einer Einheit zu übertragen oder abzuschätzen. Der für eine Einheit definierte Wert aus T muss sorgfältig aus der Menge der möglichen Werte ausgewählt werden. Diese Zuordnung ist komplex und arbeitsintensiv und häufig treten Mehrdeutigkeiten auf, die jeweils manuell aufgelöst werden müssen. Um die oben beschriebene Vorgehensweise zu automatisieren, wurde in dieser Arbeit das im Folgenden beschriebene Verfahren entwickelt. Dieses erlaubt es zusätzlich, mehr als einen Wert aus T für eine geologische Einheit zuzuordnen und damit eine interne Parameterverteilung abzuschätzen. Das Ziel ist die Abschätzung einer möglichst kontinuierlichen Verteilung T für eine nachfolgende Interpretation mit möglichst wenig zusätzlicher Information.

Grundidee des entwickelten Zuordnungsansatzes

Jeder Parameterwert $s_i \in S$ tritt mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit $\phi(s_i)$ in S auf. $S(S)$ ist die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von S . Analog dazu ist $\phi(t_i)$ die Auftrittswahrscheinlichkeit t_i innerhalb von T und $\mathcal{T}(T)$ ist die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von T . Für eine kontinuierliche Zufallsvariable x kann die Wahrscheinlichkeit, dass ein Wert X in einem Intervall $a \leq X \leq b$ der Dichtefunktion $f(x)$ liegt, über

$$\phi(X) = \int_a^b f(x) dx \quad (16)$$

berechnet werden (Papula, 2001).

Die beiden Werte s_i und t_i sind jeweils Realisierungen der beiden kontinuierlichen Zufallsvariablen S und T , die am selben Punkt im Raum für das gleiche Material im Untergrund definiert sind. Aus diesem Grund kann angenommen werden, dass beide die

gleiche Auftrittswahrscheinlichkeit aufweisen:

$$\phi(t_i) = \phi(s_i). \quad (17)$$

Wenn $\bar{\mathcal{T}}(t_i) = \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{T}(t)dt$ mit $t_1 \leq t_i \leq t_2$ und $\bar{\mathcal{S}}(s_i) = \int_{s_1}^{s_2} \mathcal{S}(s)ds$ mit $s_1 \leq s_i \leq s_2$ definiert ist und $\bar{\mathcal{T}}^{-1}$ existiert, kann ein unbekannter Wert t_i wie folgt bestimmt werden:

$$\begin{aligned} \phi(t_i) &= \phi(s_i) \\ \bar{\mathcal{T}}(t_i) &= \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{T}(t)dt = \int_{s_1}^{s_2} \mathcal{S}(s)ds = \bar{\mathcal{S}}(s_i) \\ t_i &= \bar{\mathcal{T}}^{-1}(\bar{\mathcal{S}}(s_i)) \end{aligned} \quad (18)$$

Wenn $\mathcal{S}(S)$ und/oder $\mathcal{T}(T)$ surjektive funktionale Zusammenhänge sind, ist es möglich, dass das mit Gl. 18 erhaltene Ergebnis mehrdeutig ist. In diesem Fall sind für eine eindeutige Zuordnung weitere Annahmen notwendig.

In der Realität sind S noch T keine kontinuierlichen Zufallsvariablen, sondern liegen diskret vor. Aus diesem Grund können die Gl. 16 bis 18 nicht direkt verwendet werden. Die Auftrittswahrscheinlichkeit für einen Wert s_i in einer diskret verteilten Funktion S kann jedoch über seine relative Häufigkeit $h(s_i)$ in S abgeschätzt werden. Daher kann ein Wert t_i einem Wert s_i genau dann zugeordnet werden, wenn beide mit

$$h(t_i) = h(s_i) \quad (19)$$

die gleiche relative Häufigkeit innerhalb ihrer Verteilung aufweisen.

S wird in einer Menge von n_d diskreten Werten $\{s_1, s_2, \dots, s_{n_d}\}$ mit ihren zugehörigen relativen Häufigkeiten $\{h(s_1), h(s_2), \dots, h(s_{n_d})\}$ definiert. Analog dazu besteht T aus ebenfalls n_d diskreten Werten $\{t_1, t_2, \dots, t_{n_d}\}$ mit $\{h(t_1), h(t_2), \dots, h(t_{n_d})\}$. Ausgehend davon können Werte t_i anhand der Werte s_i über

$$t_i = \begin{cases} t_1 & \text{für } h(t_i) = h(t_1) \hat{=} h(s_1) \\ t_2 & \text{für } h(t_i) = h(t_2) \hat{=} h(s_2) \\ \vdots & \ddots \\ t_{n_d} & \text{für } h(t_i) = h(t_{n_d}) \hat{=} h(s_{n_d}) \end{cases} \quad (20)$$

abgeschätzt werden. Im Allgemeinen beinhalten die beiden Mengen $\{h(s_1), h(s_2), \dots, h(s_{n_d})\}$ und $\{h(t_1), h(t_2), \dots, h(t_{n_d})\}$ nicht dieselben Werte für die auftretenden relativen Häufigkeiten. Der Anwender muss darum beide Mengen über zusätzliche Annahmen einander zuordnen.

Der große Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass er unabhängig von den realen physikalischen Einheiten von S und T angewendet werden kann, da sowohl ϕ als auch h einheitenlos sind und sich problemlos mit Wahrscheinlichkeiten oder Häufigkeiten anderer Parameterverteilungen gleichsetzen lassen. Theoretisch kann auf diese Weise jede Parameterverteilung in eine andere Parameterverteilung transferiert werden, wenn angenommen wird, dass eine Relation besteht. In der praktischen Anwendung muss jedes erhaltene Ergebnis dieses Verfahrens für jede Anwendung separat durch den Anwender evaluiert werden.

Spezialfall: S und T weisen die gleiche relative Häufigkeitsverteilung oder Dichtefunktion auf

Wenn angenommen wird, dass S und T identische Mengen an relativen Häufigkeiten $\{h(s_1), h(s_2), \dots, h(s_{n_d})\} = \{h(t_1), h(t_2), \dots, h(t_{n_d})\}$ aufweisen, können Werte t_i sehr einfach über Gl. 20 aus den s_i bestimmt werden:

$$t_i = \begin{cases} t_1 & \text{für } h(t_i) = h(t_1) = h(s_1) \\ t_2 & \text{für } h(t_i) = h(t_2) = h(s_2) \\ \vdots & \ddots \\ t_{n_d} & \text{für } h(t_i) = h(t_{n_d}) = h(s_{n_d}) \end{cases} \quad (21)$$

Gl. 21 führt zu einer sehr einfachen linearen Relation $s_i \rightarrow t_i$ mit

$$t_i = \begin{cases} t_1 & \text{für } s_i = s_1 \\ t_2 & \text{für } s_i = s_2 \\ \vdots & \ddots \\ t_{n_d} & \text{für } s_i = s_{n_d} \end{cases} \quad (22)$$

Wenn angenommen wird, dass S und T kontinuierlich verteilt sind und die gleiche Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion aufweisen, lässt sich ebenfalls eine lineare Relation $s_i \rightarrow t_i$ der Form

$$t_i = \mu_T + c \frac{\sigma_T}{\sigma_S} (s_i - \mu_S) \quad (23)$$

bestimmen. μ_S und σ_S sind hier der Mittelwert μ und die Standardabweichung σ der Verteilung S , μ_T und σ_T entsprechen Mittelwert und Standardabweichung von T . c ist ein vom Anwender gewählter Korrelationsfaktor. Eine ausführliche Herleitung von Gl. 23 befindet sich im Anhang B.1.

Allgemeiner Fall: Übertragung einer realen Verteilung S auf eine unbekannte Verteilung T

Um eine relative Häufigkeit $h(s_i)$ für jeden Wert s_i einer realer Parameterverteilung S zu erhalten, wird der Wertebereich von S in b_n äquidistante Intervalle

$S_{min} < S_1 < S_2 < \dots < S_{b_n-1} < S_{max}$ unterteilt. Ein Intervall hat dabei die Länge $d_S^I = \frac{S_{max}-S_{min}}{b_n}$ und jedes Intervall I mit $1 \leq I \leq b_n$ wird dabei über einen einzelnen Wert $s^I = S_{min} + (I-1)d_S^I + 0.5d_S^I$ repräsentiert, der der Mitte des betreffenden Intervalls entspricht. Für jedes Intervall I wird eine Untermenge $S^I \subset S$ gebildet, die alle Werte beinhaltet, die in diesem Intervall liegen. Ein Wert s_i wird wie folgt einer Teilmenge S^I zugeordnet:

$$s_i \begin{cases} \in S^1 & \text{für } S_{min} \leq s_i < S_1 \\ \vdots & \ddots \\ \in S^I & \text{für } S_{I-1} \leq s_i < S_I \\ \vdots & \ddots \\ \in S^{b_n} & \text{für } S_{b_n-1} \leq s_i \leq S_{max} \end{cases} \quad (24)$$

Nach der Zuordnung aller Werte zu diesen Untermengen beinhaltet jede Menge S^I n_{S^I} Werte. n mit $n = \sum_{I=1}^{b_n} n_{S^I}$ ist damit die Anzahl aller Werte in S und T . Die relative Häufigkeit $h(s_i)$ eines Wertes s_i wird durch

$$h(s_i) = h(S^I) = \frac{n_{S^I}}{n} \quad \text{für } s_i \in S^I \quad (25)$$

bestimmt. Die Auftrittswahrscheinlichkeit $\phi(s_i)$ kann über diese relative Häufigkeit abgeschätzt werden (Papula, 2001).

Für das weitere Vorgehen muss der Anwender entscheiden, wie T abgeschätzt werden soll. Es stehen dafür verschiedene Optionen zur Verfügung:

1. Die Zuordnung aller Teilmengen S^I zu einer vordefinierten Menge $T = \{t^1, t^2, \dots, t^{b_n}\}$ mit $s_i \in S^I \rightarrow t^I$.
2. Die Definition des Wertebereichs mit einer angemessenen Diskretisierung von T mit $T_{min} < T_1 < T_2 < \dots < T_{b_n-1} < T_{max}$, $d_T^I = \frac{T_{max}-T_{min}}{b_n}$ in eine Menge von Werten

$$t^I = T_{min} + (I-1)d_T^I + 0.5d_T^I. \quad (26)$$

Zusätzlich muss festgelegt werden, ob T entweder die selbe Häufigkeitsverteilung wie S aufweisen soll oder, wenn dies nicht der Fall ist, welche Häufigkeitsverteilung T aufweist. Dann werden die relativen Häufigkeiten $h(s_i) = h(S^I) = h(t^I)$ mit $s_i \in S^I$ zugeordnet.

3. Es wird angenommen, dass T kontinuierlich mit einer bekannten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion \mathcal{T} und einer gegebenen Menge an Formparametern FP_T mit z.B. μ_T und σ_T . Im diesem Fall kann t_i mit folgender Gleichung bestimmt werden;

$$t_i = t^I = \mathcal{T}^{-1}\left(\frac{1}{d_S^I} \phi(s_i), FP_T\right), \quad (27)$$

$\phi(s_i) = \phi(S^I) \approx h(S^I)$ und $s_i \in S^I$. Dies ist eine Anwendung vom Gl. 17 bis Gl. 19 mit einer gegebenen Auftrittswahrscheinlichkeit $\phi(s_i)$ von s_i und einer gegebenen Diskretisierung d_S^I von S .

Im Folgenden werden diese Ansätze verwendet, um mögliche Verteilungen für T anhand einer synthetischen Verteilung S zu bestimmen.

5.1.2 Synthetisches Beispiel

Um den in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz zur Abschätzung von Materialparametern zu demonstrieren, wurde er auf drei verschiedene synthetische Datensätze S angewandt. Diese umfassen jeweils 10 000 Werte, die in $b_n = 25$ äquidistanten Intervallen gruppiert sind.

Der erste Datensatz weist nur 25 unterschiedliche, perfekt normal verteilte Werte auf. Der Zweite wurde über normalverteilte Zufallswerte erstellt und ist demzufolge annähernd normalverteilt. Der dritte Datensatz besteht aus gleichverteilten Zufallswerten. Für alle drei Verteilungen S wurden drei Ansätze verwendet, um ein mögliches T abzuschätzen. Für den ersten Ansatz wurde angenommen, dass sowohl S als auch T kontinuierlich normalverteilt sind, aber unterschiedliche Formfaktoren μ_S, σ_S, μ_T und σ_T aufweisen. So konnte die in Gleichung 23 kontinuierliche lineare Beziehung ($c = 1$) angewendet werden. Der zweite Ansatz beruht auf der Zuordnung von diskreten Werten t^I zu Werten s^I (Gl. 24 und Gl. 26). Dafür wurde zusätzlich angenommen, dass S und T eine identische Verteilung der relativen Häufigkeiten aufweisen. Dies führt zu einer diskreten linearen Zuordnung. Die Anwendung von Gl. 27 ist die Grundlage des dritten Abschätzungsansatzes. Die Berechnung der Werte t_i basiert auf den relativen Häufigkeiten $h(s_i)$ (Gl. 25). Da T für jede Auftrittswahrscheinlichkeit initial zwei Werte beinhaltet, ist Gl. 27 mehrdeutig. In der aktuellen Implementierung dieses Verfahrens wird t_i immer mit $t_i \geq \mu_T$ abgeschätzt. Dies ist nicht in allen Fällen angemessen, aber die Mehrdeutigkeit wird durch

$$t_i = \begin{cases} t_i & \text{for } s_i > s_{center} \\ 2\mu_T - t_i & \text{for } s_i \leq s_{center} \end{cases} \quad (28)$$

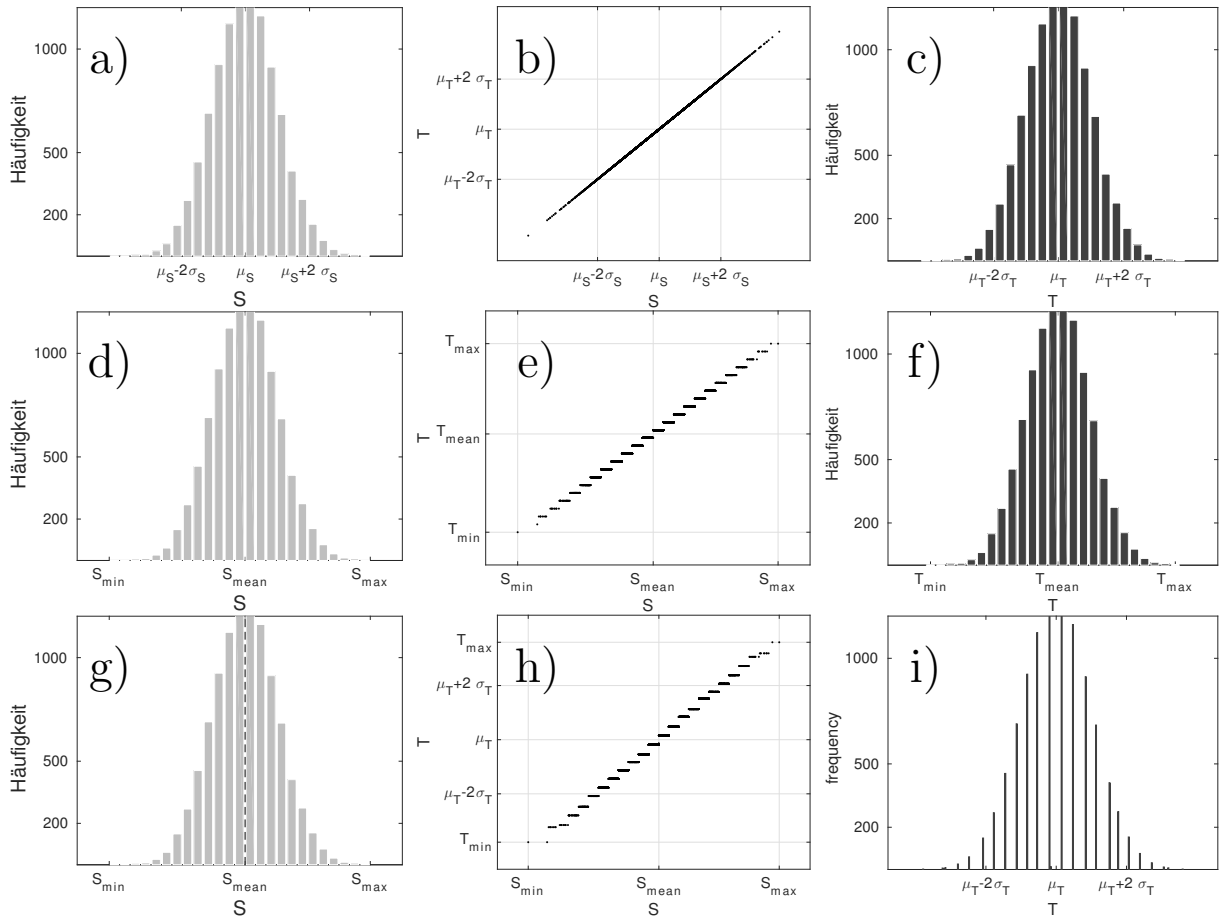


Abbildung 41: Parameterübertragung anhand eines normalverteilten synthetischen Beispiels mit 10 000 Zufallswerten. (a, d, g) zeigen die Häufigkeitsverteilung von S , in (c, f, i) ist die sich ergebende Verteilung für T dargestellt. In (b, e, h) wird die Zuordnung von S nach T dargestellt. (a, b, c) Übertragung über eine kontinuierliche Relation; (d, e, f) Übertragung über diskrete Parameterintervalle; (g, h, i) Übertragung über relative Häufigkeiten. T wird als normalverteilt mit μ_T und σ_T angenommen.

aufgelöst. Der dafür notwendige Wert s_{center} wird vom Anwender vorgegeben.

Für die ersten beiden Datensätze wurde $s_{center} = S_{mean}$ (arithmetisches Mittel von S) gewählt. Für den dritten Datensatz wurde $s_{center} = S_{max(h(S))}^I$ verwendet, was dem Medianwert der Teilmenge s^I mit der höchsten Auftretswahrscheinlichkeit entspricht. Dieser Ansatz führt nur zu einem linearem Zusammenhang, wenn S und T die exakt gleiche Häufigkeitsverteilung aufweisen. Andernfalls ist der Zusammenhang sehr viel komplizierter. Die erzielten Ergebnisse für den zweiten Datensatz sind in Abb. 41 dargestellt und werden im Folgenden kurz vorgestellt und erläutert. Die Ergebnisse für die anderen beiden Datensätze werden im Anhang B beschrieben und sind in Abb. 64 und Abb. 65 dargestellt.

Für das in Abb. 41 gezeigte synthetische Beispiel mit einem annähernd normalverteilten Parameter S führt der kontinuierliche Abschätzungsansatz wie erwartet zu einer einfachen linearen Abhängigkeit (Abb. 41 a, b, c). Der zweite Ansatz über diskrete Pa-

parameterintervalle ordnet mehrere Werte aus S einem Wert aus T zu (Abb. 41 d, e, f). Für den ersten und den zweiten Ansatz wird davon ausgegangen, dass eine lineare Beziehung zwischen beiden Häufigkeitsverteilungen besteht, um Gl. 23 (erster Ansatz) und Gl. 22 (zweiter Ansatz) anwenden zu können. Die Anwendung des dritten Ansatzes über die relativen Häufigkeiten (Gl. 27), erzeugt eine Zielverteilung T , welche keine einfache lineare Beziehung zu S mehr aufweist, da S in diesem Fall nicht perfekt normalverteilt ist (Abb. 41 g, h, i). Der zur Auflösung der Mehrdeutigkeit (Gl. 28) verwendete Wert S_{mean} ist durch die gestrichelte Linie in Abb. 41(g) markiert.

5.1.3 Klassifizierte Abschätzung für mehrere Untergrundmaterialien

Für einen Großteil der gegebenen realen Quellparameterverteilungen kann angenommen werden, dass sie nicht nur aus einem einzigen Stoff gebildet wurden, sondern aus verschiedenen Materialien bestehen, die aneinander grenzen und/oder sich ganz oder teilweise vermischen. S bildet dann die Vereinigungsmenge $\cup\{S^I, S^{II}, \dots, S^M, \dots, S^{N_m}\}$ der N_m Parameterverteilungen der N_m Stoffklassen, deren Parameterwertebereiche sich durchaus überlappen können. Für jede Stoffklasse M müssen Annahmen über die statistischen Eigenschaften von T^M getroffen werden. Mit diesen Annahmen und einer gegebenen realen Quellverteilung S^M kann eine Beziehung der Form $T^M = C^M(S^M)$ über die oben beschriebene Vorgehensweise für jede Stoffklasse separat abgeleitet werden. Der entscheidende Punkt ist die Definition der einzelnen Stoffklassen und die Zuordnung eines speziellen Wertes s_i zu einer dieser Klassen. Eine Möglichkeit, um S in mehrere Teilmengen aufzuteilen, ist die Anwendung eines statistischen Clusterverfahrens, wie zum Beispiel "k-Means" (MacQueen, 1967; Kanungo et al., 2002; Kanungo et al., 2004). Die erhaltenen Teilmengen von S werden dann den verschiedenen Materialklassen zugeordnet. Dadurch kann jeder Wert s_i entweder einer Stoffklasse zugeordnet, oder gegebenenfalls als Ausreißer markiert werden. Danach kann die Abschätzung von T^M aus S^M für jede Stoffklasse separat durchgeführt werden. Eine weitere Möglichkeit ist eine geologische/geophysikalische Unterteilung von S , wie sie in Abschnitt 5.1.1 beschrieben und zum Beispiel in Steinmetz et al. (2015) angewandt wurde. Wenn der Parameterwertebereich für eine Stoffklasse bekannt ist und das Auftreten dieses Materials im betreffenden Untersuchungsgebiet wahrscheinlich ist, werden alle Werte innerhalb dieses Parameterbereichs dieser Stoffklasse zugeordnet. Da sich in der Realität aber die Wertebereiche verschiedener Materialien für einen Parameter oft überschneiden können, führt dies zu Mehrdeutigkeiten. Ein Wert s_i wird durch die Abschätzung dann mehreren Werten $\{t_i^I, t_i^{II}, \dots\}$ für die verschiedenen Materialien zugeordnet. Ein eindeutiger Wert für t_i kann dann zum Beispiel über die folgenden drei Möglichkeiten dargestellt werden:

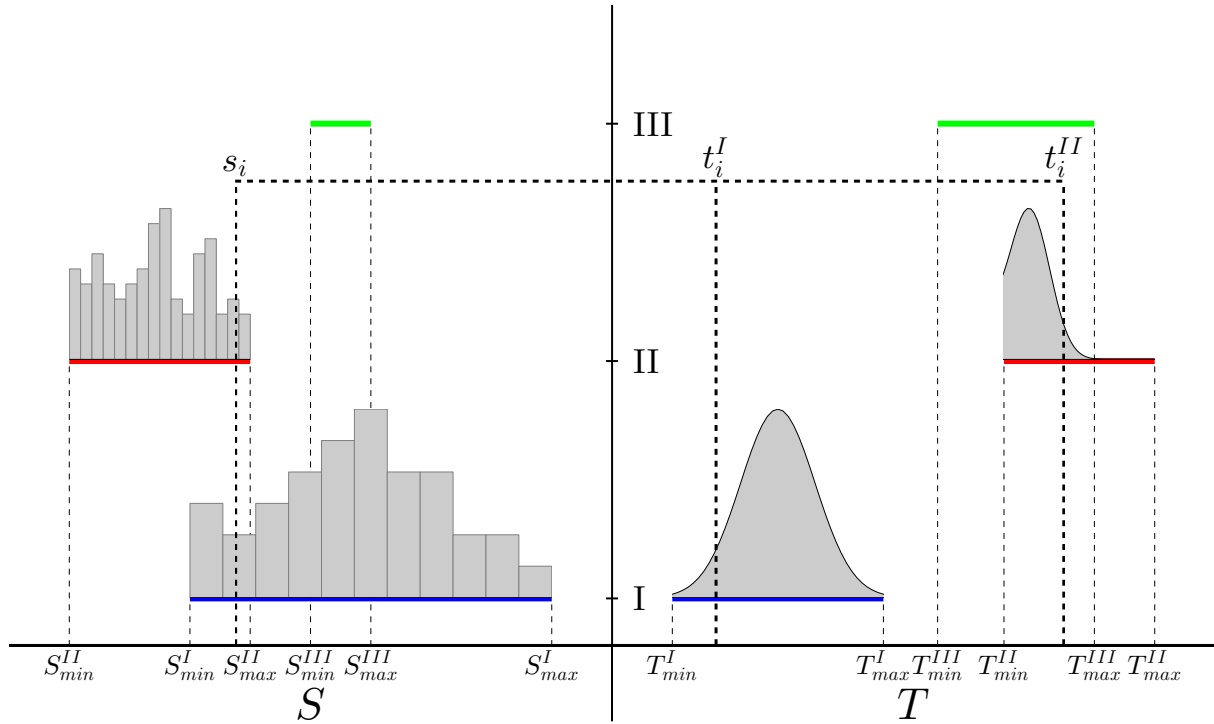


Abbildung 42: Schematische Darstellung einer klassifizierten Parameterübertragung mit mehreren überlappenden Stoffklassen. Im abgebildeten Fall sollen normalverteilte Verteilungen T^I und T^{II} über die Auftretshäufigkeiten innerhalb der Quellverteilungen S^I und S^{II} für die beiden Stoffklassen I (blau) und II (rot) abgeschätzt werden. Für den Wert s_i werden zwei mögliche Werte t_i^I und t_i^{II} ermittelt.

1. das gewichtete Mittel aller möglichen \bar{t}_i mit

$$\bar{t}_i = \frac{\sum_{c=1}^N \phi(t_i^c) t_i^c}{\sum_{c=1}^N \phi(t_i^c)} \quad , \quad (29)$$

2. dem Wert t_i^M mit der höchsten Auftretswahrscheinlichkeit $\phi(t_i^M)$ oder
3. einem Wert t_i^M der am ehesten dem Wert \bar{t}_i entspricht.

Eine Schema für eine solche klassifizierte Abschätzung ist in Abb. 42 dargestellt.

5.2 Validierung des Verfahrens durch Vergleich mit einer Geschwindigkeits-Dichte-Relation

Um den oben beschriebenen Ansatz zu validieren, wird er in diesem Abschnitt verwendet, um anhand einer Geschwindigkeitsverteilung eine Dichteverteilung zu erzeugen. Das Ziel ist es, zu zeigen, dass das Verfahren zum einen eine plausible Verteilungen erzeugt und zum anderen in der Lage ist, die bekannte Relation zwischen seismischen

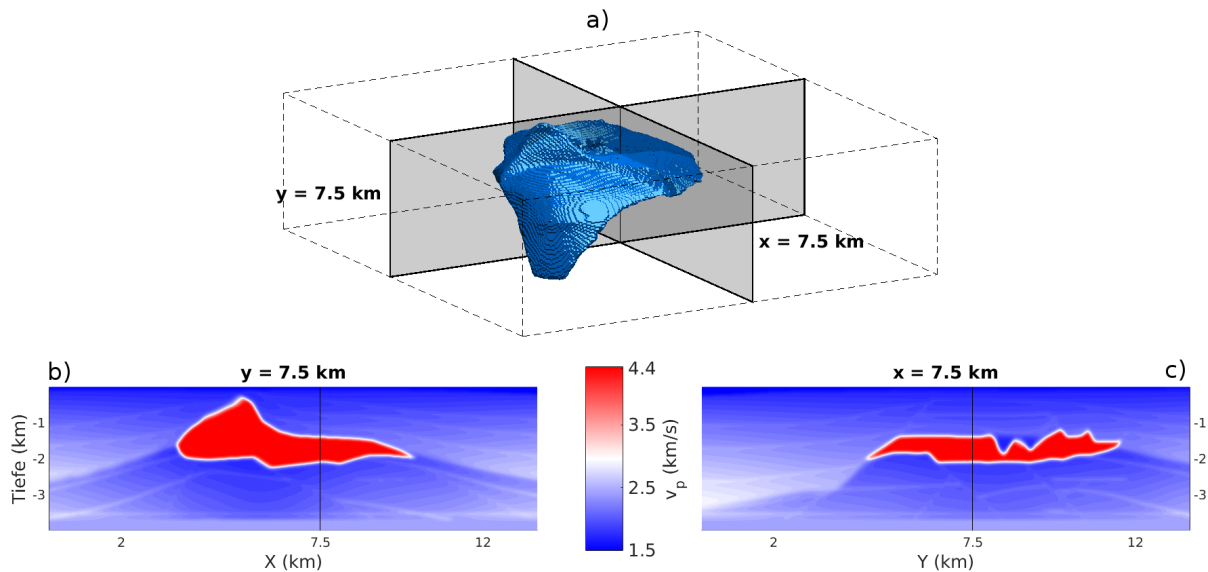


Abbildung 43: Synthetisches Geschwindigkeitsmodell des Salzstocks im *SEG/EAGE Salt Model* (Quelle: SEG/EAGE, 1994), welches als Beispieldatensatz für die Konversion von seismischen Geschwindigkeiten in Dichten verwendet wird. In (a) ist die Geometrie des Salzstocks und die Position zweier Schnitte bei $y = 7.5$ km und bei $x = 7.5$ km durch das Modell dargestellt. Die Geschwindigkeitsverteilung auf den beiden Schnitten ist in (b) und (c) dargestellt.

Geschwindigkeiten und Dichten zu reproduzieren. Im Anschluss daran wird der berechnete Effekt der erzeugten Dichtemodelle in den Schwerefeldkomponenten und den Schwerefeldgradienten verglichen und interpretiert.

Als Referenz wird in diesem Fall die bekannte Relation nach Gardner et al. (1974)

$$\rho = 1.74 v_p^{0.25} \quad v_p \text{ in km/s} \quad (30)$$

zwischen seismischen p-Wellen Geschwindigkeiten (v_p) und Dichten in Sedimentgesteinen verwendet (Gl. 30). In Abb. 43 ist das synthetische 3D Geschwindigkeitsmodell eines Salzstocks und der umgebenden Sedimente dargestellt (*SEG/EAGE Salt Model*; Quelle: SEG/EAGE, 1994). Dieser Datensatz dient für diese Anwendung als Ausgangsmodell. Die Geschwindigkeiten liegen auf einem 3D Gitter mit einer horizontalen Auflösung von $n_x = n_y = 338$ Zellen und einer vertikalen Auflösung von $n_z = 100$ Zellen vor. Jede Zelle besitzt eine quadratische Ausdehnung mit 40 m Kantenlänge. Insgesamt liegen rund 11.4 Millionen Geschwindigkeitswerte vor, welche immer den Mittelpunkten der Zellen zugeordnet sind.

Die Geschwindigkeitsverteilung innerhalb des Modells wird im Folgenden in eine Dichteverteilung übertragen. Da die Gardner-Relation nur für Sedimente und weder für Salz noch Salzwasser gilt, wurden die Geschwindigkeitswerte für Salzwasser ($v_p < 1.52$ km/s) und Salz ($v_p > 3.4$ km/s) nicht für die Dichteabschätzung berücksichtigt. Die betreffenden Geschwindigkeitswerte wurden anhand der bekannten Grenz-

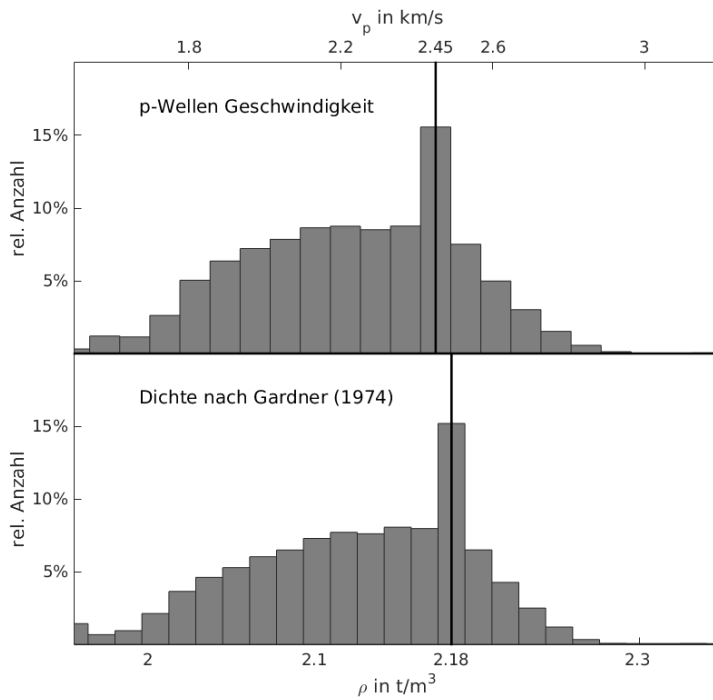


Abbildung 44: Häufigkeitsverteilung der verwendeten Geschwindigkeitswerte (oben) und der aus Gardner et al. (1974) berechneten Dichtewerte (unten). Die Häufigkeit ist als Anzahl relativ zur Gesamtmenge der verwendeten Werte angegeben. Zusätzlich sind die Mittelwerte für die Geschwindigkeit (2.45 km/s) und die Dichte (2.18 t/m^3 markiert.)

werte identifiziert und gängigen konstanten Literaturdichten (Salzwasser: $\rho = 1.03 t/m^3$; Salz: $\rho = 2 t/m^3$) zugeordnet. Nach dieser Klassifizierung wurden die verbleibenden rund 11 Mio. Geschwindigkeitswerte für die Sedimente dazu verwendet, eine mögliche Dichteverteilung abzuschätzen. Dies wurde zunächst nach der bekannten Gardner-Relation (Gl. 30) durchgeführt. In Abb. 44 ist die erhaltene Häufigkeitsverteilung im Vergleich zur initialen Häufigkeitsverteilung der verwendeten Geschwindigkeitswerte dargestellt. Die Geschwindigkeiten sind nicht normalverteilt. Gerade in einem Geschwindigkeitsintervall zwischen 2.1 und 2.3 km/s sind die Häufigkeiten sehr ähnlich und fallen nach dem Maximum bei 2.45 km/s sehr stark ab. Extrem niedrige oder hohe Geschwindigkeiten sind relativ gering vertreten. Aufgrund der quasi-linearen Beziehung innerhalb des für diese Anwendung verwendeten Parameterintervalls aus Gl. 30 (siehe graue Kurve in Abb. 46, links) ähnelt die Häufigkeitsverteilung der erhaltenen Dichtewerte der Verteilung der Geschwindigkeiten stark (siehe Abb. 44). Die resultierende Dichteverteilung ist unter anderem in Abbildung 45 (a) auf den beiden Profilschnitten $y = 7.5$ km und $x = 7.5$ km aus Abb. 43 (b und c) abgebildet. Die Ähnlichkeit der Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeiten und der Gardner-Dichten legt nahe, eine kontinuierliche (Gl. 23) oder diskrete lineare Beziehung (Gl. 26) zur statistischen Abschätzung zu verwenden. Zum Vergleich wurden zusätzlich verschiedene alternative Dichteverteilungen über eine Beziehung anhand der relativen Häufigkeiten $h(S)$ (Gl. 27) berechnet und evaluiert. Die so erhaltenen Verteilungen sind in Abb. 45, Abb. 66 (siehe Anhang B.3) und Abb. 67 (siehe Anhang B.3) dargestellt. Das Ergebnis der Abschätzung über Gardner et al. (1974) ist dabei immer in der oberen Teilabbildung (a) als Referenz abgebildet. In Abb. 46 (links) sind die Zuordnungen S (Geschwindigkeit)

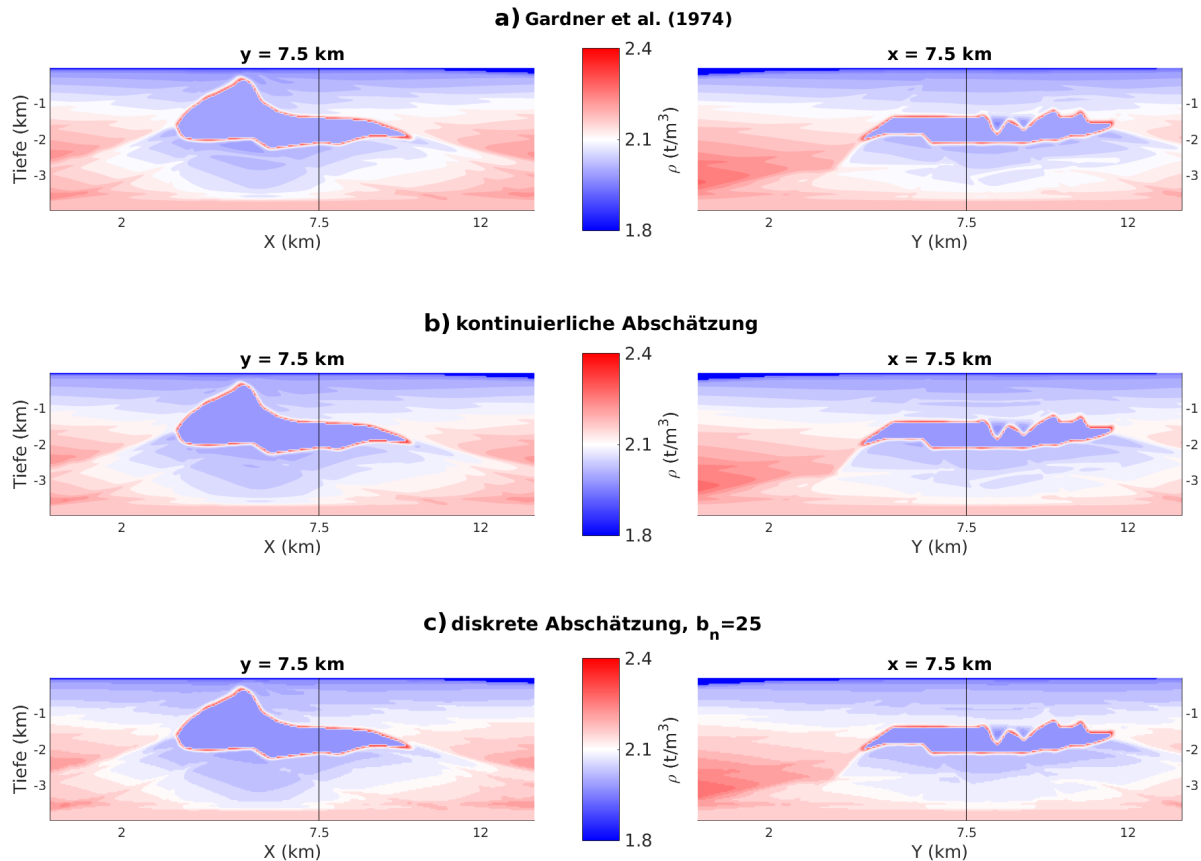


Abbildung 45: Resultierende Dichteverteilung für eine Abschätzung anhand der Relation nach Gardner et al. (1974) (a), einer kontinuierlichen Abschätzung (b) nach Gl. 23 und einer diskreten Abschätzung (c) mit $b_n = 25$ Intervallen nach Gl. 22. (b) und (c) sind plausibel. Die berechneten Dichteverteilungen sind jeweils auf den beiden Profilschnitten $y = 7.5$ km (links) und $x = 7.5$ km (rechts) aus Abb. 43 dargestellt.

nach T (Dichte) für die sieben verwendeten Ansätze abgebildet. Die zugehörigen Histogramme für die erzeugten Dichten ist in Abb. 46 (rechts) gezeigt. Eine Farbe entspricht immer dem gleichen Abschätzungsansatz.

Für die kontinuierliche Abschätzung wurde angenommen, dass die Geschwindigkeiten und Dichten kontinuierlich normalverteilt mit unterschiedlichen Formparametern ($\mu_S = 2.24$ km/s; $\sigma_S = 0.28$ km/s; $\mu_T = 2.12$ t/m³; $\sigma_T = 0.065$ t/m³) sind. Die Formparameter für die Dichten entsprechen annähernd Mittelwert und Standardabweichung der durch Gardner erhaltenen Dichteverteilung. Die Dichten wurden dann mittels der Gl. 23 berechnet. Das Ergebnis ist in Abb. 45 (b) dargestellt. Die zweite Alternativverteilung der Dichten erfolgte über eine diskrete Abschätzung nach Gl. 26 mit $b_n = 25$ und den selben Formparametern wie für die kontinuierliche Abschätzung.

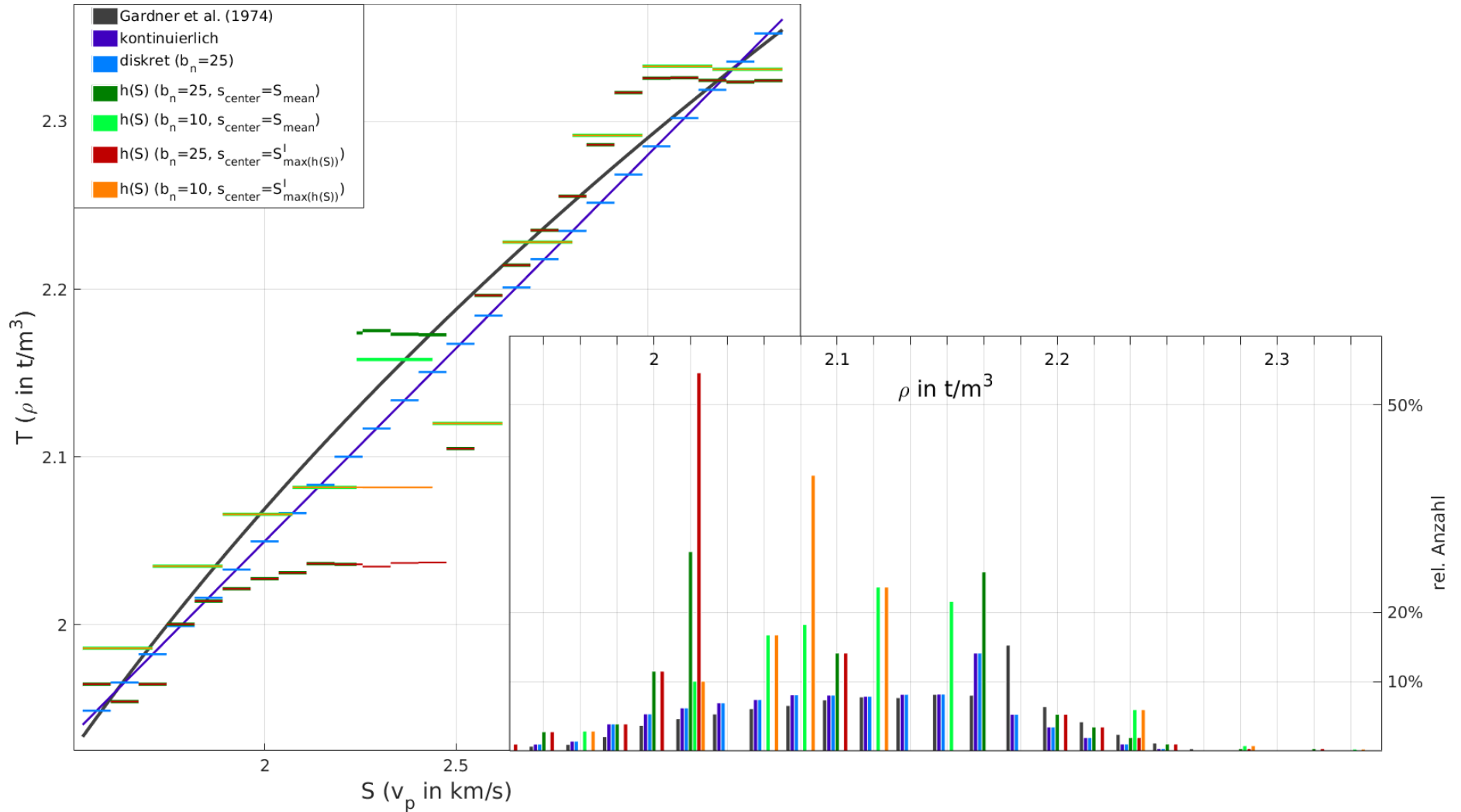


Abbildung 46: Abhängigkeiten zwischen Geschwindigkeiten und Dichten (Kurven/Stufenfunktionen, links) und Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der Dichten (Histogramme, rechts). Jedem verwendeten Verfahren ist eine eindeutige Farbe zugeordnet. Für jeden der im Text beschriebenen sechs Abschätzungsansätze und die Gardner-Relation sind links die Kurven für die Zuordnung $S \rightarrow T$ dargestellt. Rechts sind die Histogramme für die Dichtewerte der sieben verschiedenen Dichteverteilungen abgebildet.

Das Ergebnis ist in Abb. 45 (c) dargestellt. Beide erzeugten Dichteverteilungen in Abb. 45 (b und c) erscheinen im Vergleich zur Verteilung der Gardner-Dichten (Abb. 45 a) plausibel, die linearen Zusammenhänge (hell blaue und dunkel blaue Kurve in Abb. 46, links) repräsentieren annähernd den Zusammenhang nach Gardner (graue Kurve in Abb. 46, links). Mittlere Geschwindigkeitswerte werden im Vergleich zu Gardner durch niedrigere Dichten abgeschätzt. Dies ist auch im Histogramm der erzeugten Dichten (Abb. 46, rechts, hell/dunkel blaue Balken) gut zu erkennen, die maximale Häufigkeit der Dichten liegt niedriger als bei Gardner (Abb. 46, rechts, graue Balken). Ansonsten sind die Histogramme für die drei Dichteverteilungen ähnlich. Zusätzlich wurden vier weitere alternative Dichteverteilungen über die realen relativen Häufigkeiten der Geschwindigkeitswerte (Gl. 27) erzeugt. Die vier Ansätze unterscheiden sich durch die für die Abschätzung verwendeten Parameter b_n und s_{center} , die Dichten wurden wieder als normalverteilt angenommen. In Anhang B.3 sind die Ergebnisse für $s_{center} = S_{mean}$ und $b_n = 25$ in Abb. 66 (b) sowie für $b_n = 10$ in Abb. 66 (c) dargestellt. Abb. 67 (b) zeigt ebenfalls Resultate für $b_n = 25$, allerdings wurde s_{center} über den Wert $S_{max(h(S))}^I$ mit der höchsten relativen Häufigkeit in S bestimmt. Für das analoge Vorgehen mit $b_n = 10$ ist das Ergebnis Abb. 67 (c) dargestellt. Auch hier wurden die gleichen Parameter für μ_T und σ_T verwendet, wie für die kontinuierliche lineare Beziehung. Die beiden Verteilungen, welche mit $b_n = 25$ erzeugt wurden, erscheinen nicht plausibel, da gerade mittlere Dichten im Vergleich zu den Gardner-Dichten stark unterschätzt werden. Ebenso erscheinen die Ergebnisse aus der Verwendung von $s_{center} = S_{mean}$ nicht plausibel, da Wechsellagen zwischen höheren und niedrigen Dichten abgeschätzt werden, die in der Geschwindigkeitsverteilung nicht auftreten (Abb. 43 b und c). Da von einem annähernd quasi-linearen Zusammenhang zwischen Dichten und Geschwindigkeiten ausgegangen wird, sind ähnliche relative Verteilungen zu erwarten (Vergleiche Abb. 43 und Abb. 45). Da diese drei Alternativen für eine mögliche Dichteverteilung als nicht plausibel zurückgewiesen werden müssen, ist in der realen Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeiten (siehe Abb. 44) begründet. Diese ist für $b_n = 25$ nicht normalverteilt. Es treten viele unterschiedliche Geschwindigkeiten zwischen 2.1 und 2.3 km/s mit ähnlichem relativen Anteil an der Gesamtwertemenge ($\approx 10\%$, Abb. 44) auf. Geschwindigkeiten um 2.45 km/s treten dagegen sehr häufig auf ($\approx 15\%$, Abb. 44). Die Annahme, dass ein aus diesem S resultierendes T normalverteilt ist, erscheint nicht plausibel. Geschwindigkeiten mit ähnlicher Häufigkeit werden durch das verwendete Verfahren mit sehr ähnlichen Dichtewerten abgeschätzt, d.h. eine große Menge unterschiedlicher Geschwindigkeiten resultiert in Dichten mit ähnlichem Abstand zur mittleren Dichte. Da die mittlere Dichte der am häufigsten auftretenden Geschwindigkeitsklasse zugeordnet wird, die mittlere Geschwindigkeit mit rund 2.2 km/s aber niedriger ist als die mit Abstand häufigste Geschwindigkeitsklasse, muss zwingend $s_{center} = S_{max(h(S))}^I$ verwendet werden. Andernfalls werden Geschwindigkei-

ten, welche zwar höher als die mittlere Geschwindigkeit aber niedriger als die häufigste Geschwindigkeit sind, mit Dichten assoziiert, die größer als die mittlere Dichte sind. Dies führt zu den in Abb. 66 (b und c, Anhang B.3) zu sehenden Wechsellagen. Diese treten auch für $b_n = 10$ auf, aber die Sprünge zwischen den Dichten sind geringer.

Einzig die Kombination aus $b_n = 10$ und $s_{center} = S_{max(h(S))}^I$ (siehe Abb. 67 c, Anhang B.3) liefert ein plausibles Ergebnis. Auch in diesem Fall werden die sehr häufig auftretenden mittleren Geschwindigkeiten durch etwas zu niedrige Dichten abgeschätzt (orange Kurve in Abb. 46, links). Dies kann durch die geringe Auflösung im Wertebereich der Dichten mit $b_n = 10$ erklärt werden. Es werden überhaupt nur 10 verschiedene Dichtewerte verwendet. damit kann auch erklärt werden, dass das Histogramm für diese Verteilung in Abb. 46 (rechts, orange Balken) von den anderen plausiblen Verteilungen abweicht. Die anderen plausiblen Verteilungen verwenden alle mehr als 10 unterschiedliche Dichtewerte. Dadurch, dass mit $b_n = 10$ nur 10 Geschwindigkeitsklassen für die Ermittlung der realen Auftrittshäufigkeiten verwendet werden, ergibt sich ein Histogramm der Geschwindigkeiten, welches noch annähernd normalverteilt ist. Die Annahme, dass ein sich ergebendes T ebenfalls normalverteilt ist, ist in diesem Fall gerechtfertigt.

Nach der Einschätzung der Plausibilität der Dichteverteilungen wurde der Schwereeffekt der Dichteverteilung nach Gardner und der drei als plausibel eingeschätzten Verteilungen in der vertikalen Schwerekomponente (V_z) und dem vertikalen Schweregradienten (V_{zz}) berechnet. Da in diesem Fall keine gemessenen Schweredaten vorliegen, wird der Schwereeffekt der Gardnerverteilung als Referenz zur Validierung der abgeschätzten Dichteverteilungen verwendet. Zusätzlich wurde auch der Effekt der als nicht plausibel eingeschätzten Verteilung aus der Parameterkombination $s_{center} = S_{max(h(S))}^I$ und $b_n = 25$ berechnet, um die Plausibilitätseinschätzung zu bestätigen.

Der berechnete Effekt in der vertikalen Schwerefeldkomponente ist in Abb. 47 gezeigt. Der als Referenz verwendete Effekt der Dichteverteilung über Gardner et al. (1974) ist in Abb. 47 (a) dargestellt. Die Schwerefelder für die abgeschätzten Verteilungen befinden sich in Abb. 47 (b bis e). Der Unterschied der berechneten Felder für die statistisch abgeschätzten Verteilungen zum Effekt der Gardner-Verteilung wird in Abb. 47 (f bis i) dargestellt. Die als plausibel eingeschätzten Verteilungen (Abb. 47, b bis d) bewirken einen Effekt in der vertikalen Schwerefeldkomponente, der sehr ähnlich zu dem der Gardner-Verteilung ist. Die Anomalien zeigen etwas niedrigere Werte im Vergleich zu Gardner, da vor allem die häufig auftretenden mittleren Geschwindigkeitswerte durch zu niedrige Dichten abgeschätzt werden. Dies führt zu einem Massendefizit und geringeren Werten im resultierenden Schwerefeld. Die Abweichung zeigen lange Wellenlängen, während die lokale Anomalie richtig abgebildet wird. Die absoluten Abweichungen sind mit bis zu $2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ für die kontinuierliche und die diskrete Verteilung und $3.5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ für die Verteilung anhand der realen Häufigkeiten und $b_n = 10$ ver-

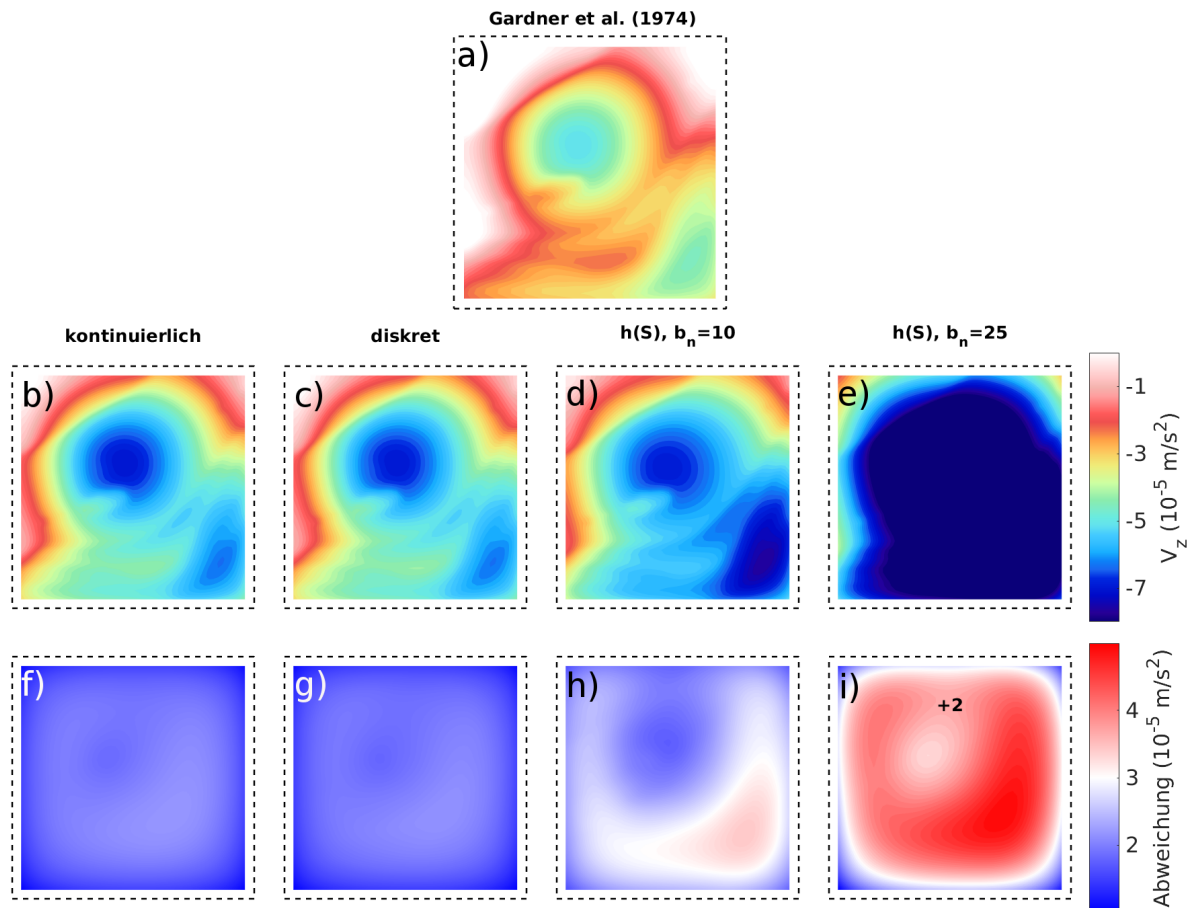


Abbildung 47: Vergleich des berechneten Effekts in der vertikalen Schwerefeldkomponente (V_z) für die Verteilung nach Gardner et al. (1974) (a), für die als plausibel abgeschätzten Dichteverteilungen (b, c, d) und eine nicht plausible Verteilung (e). In (f) bis (i) ist die Abweichung von (b) bis (d) zu (a) dargestellt. Die Abweichungen in (i) sind um $-2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ verschoben dargestellt. Die gestrichelte Linie markiert die äußere Abmessung der Dichtegitter.

treten. Das Massendefizit der als nicht plausibel eingeschätzten Verteilung (Abb.47 i) ist im Vergleich zu Gardner extrem hoch. Die Abweichungen sind zwar ebenfalls eher langwellig, aber unverträglich groß mit bis zu $7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$. Aus diesem Grund sind in Abb. 47 (i) die Abweichungen für dieses Ergebnis konstant um $-2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ verschoben abgebildet.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für den Vertikalgradienten in Abb. 48. Auch hier zeigt sich, dass die Abweichungen für alle vier abgeschätzten Verteilungen (Abb. 48 f - i) meist längere Wellenlängen aufweisen als die entscheidenden Anomalien. Die absoluten Abweichungen für die kontinuierliche und die diskrete Verteilung liegen zwischen 0 und $0.5 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ und für die Verteilung anhand der realen Häufigkeiten und $b_n = 10$ zwischen -0.25 und $1 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-2}$. Für die nicht plausible Verteilung liegen die Abweichungen zwischen -0.5 und $2 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ und sind damit signifikant höher. Aus diesem Grund sind in Abb. 48 (i) die Abweichungen für dieses Ergebnis konstant um

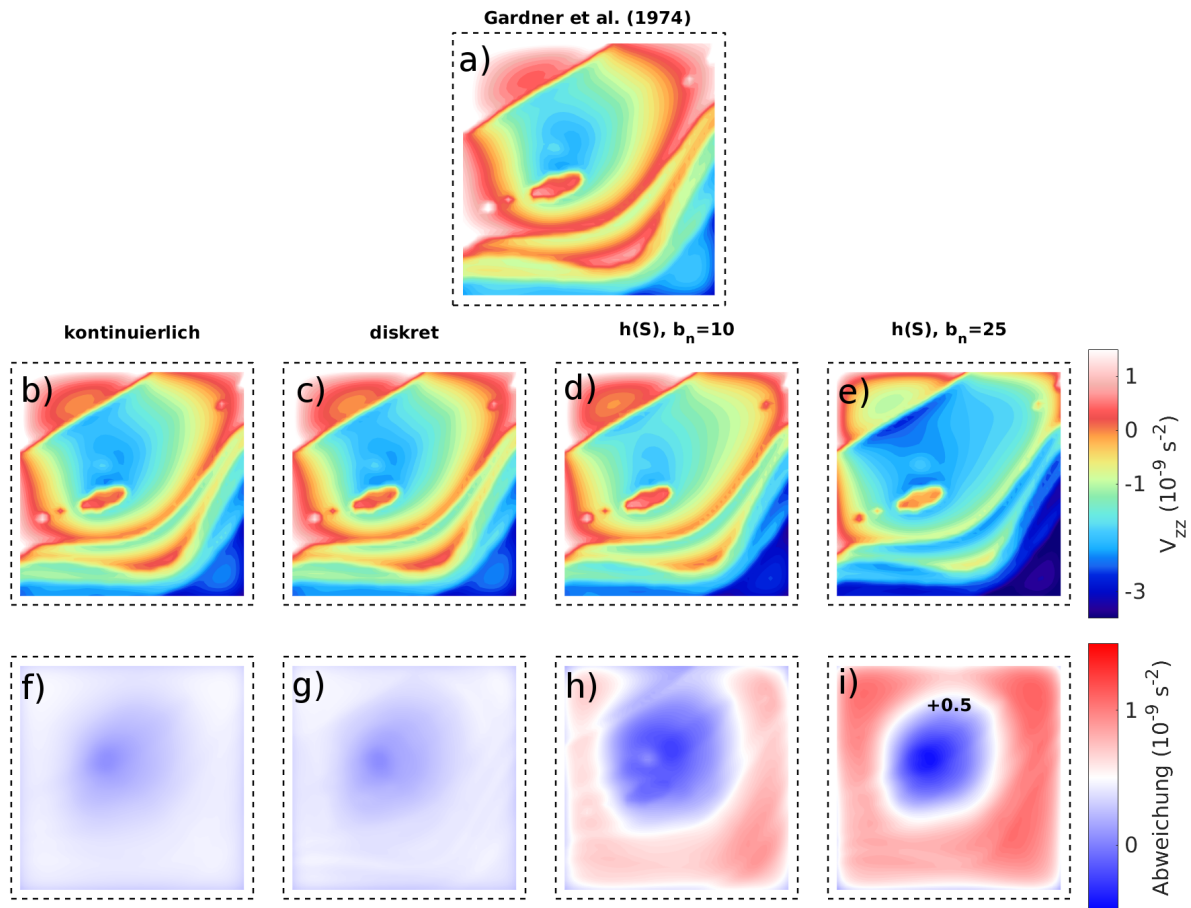


Abbildung 48: Vergleich des berechneten Effekts für den vertikalen Schweregradienten (V_{zz}) für die Verteilung nach Gardner et al. (1974) (a), die als plausibel abgeschätzten Dichteverteilungen (b, c, d) und eine nicht plausible Verteilung (e). In (f) bis (i) ist die Abweichung von (b) bis (d) zu (a) dargestellt. Die Abweichungen in (i) sind um $-0.5 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ verschoben dargestellt. Die gestrichelte Linie markiert die äußere Abmessung der Dichtegitter.

$-0.5 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ verschoben abgebildet. Die vorläufige Einschätzung des Ergebnisses der Abschätzung anhand der realen Häufigkeiten mit $s_{center} = S_{max}^I(h(S))$ und $b_n = 25$ als nicht plausibel hat sich bestätigt. Die Ergebnisse der anderen drei Ansätze können Gardner zwar nicht perfekt abbilden, erreichen aus Sicht der berechneten Schwerefelder aber akzeptable Ergebnisse. Die entscheidenden kurzwelligen Anomalien werden abgebildet. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass auch die Relation nach Gardner et al. (1974) nur ein mathematisches Modell ist und die Ergebnisse ebenfalls immer anhand anderer Daten validiert werden müssen. Die statistische Abschätzung der Dichtewerte erreicht zumindest äquivalente Ergebnisse zur Gardner-Relation für diese Beispieldaten. Im Gegensatz zu Gardner et al. (1974) könnte das Verfahren mit anderen Parametern auch für Gesteine verwendet werden, für die Gardner in keinem Fall gilt, zum Beispiel Salz.

5.3 Anwendungsbeispiel Bremerhaven-Cuxhavener Rinne

Um an einem “realistischen Beispiel” das abgeleitete statistische Verfahren zu testen, wurde das im vorhergehenden Abschnitt für das *SEG/EAGE Salt Model* verwendete Vorgehen auf das Testgebiet “Bremerhaven-Cuxhavener Rinne” (Projekt AIDA) angewendet. Das Ziel besteht darin, für die in Abschnitt 3.3 auf Plausibilität geprüfte Untergrundgeometrie Aussagen über eine möglichen Dichteverteilung innerhalb der identifizierten Dichtekörper zu treffen. Dafür wird im Folgenden eine vorliegende hochauflösende Widerstandsverteilung verwendet. Da für dieses Gebiet keine verwendbare formalisierte Relation zwischen Dichten und Widerständen existiert, wird der in Abschnitt 5.1.3 beschriebene Ansatz für eine klassifizierte Abschätzung verwendet. Für den Großraum Cuxhaven existiert ein sehr hoch aufgelöster Datensatz mit spezifischen Widerständen. Dieses Modell der Widerstandsverteilung basiert auf den Ergebnissen einer Hubschrauber-gestützten Elektromagnetik-Messung (HEM; Siemon et al., 2004; Siemon et al., 2009). Die initialen Messpunkte wurden auf Fluglinien gemessen und sind unregelmäßig über das Modellgebiet verteilt (Abb. 49, oben). Für die Abschätzung der Dichteverteilungen wird dieses Widerstandsmodell als Quellparameterverteilung S verwendet. An jedem Messpunkt liegen 6 spezifische Schichtwiderstände und 5 Schichtmächtigkeiten vor (Siemon et al., 2009). In den unteren beiden Teilabbildungen von Abb. 49 ist die Verteilung der logarithmischen spezifischen Widerstände über den beiden bereits in Abschnitt 5 vorgestellten Schwereprofilen “Profil Wanhöden” (links unten) und “Profil Krempel” (rechts unten) abgebildet. Da die Widerstandsdatenpunkte unregelmäßig über das Modellgebiet verteilt sind, wurde nur für die Profilpunkte die Widerstandsverteilung dargestellt, die einen Abstand von weniger als 100 m zum nächsten Widerstandspunkt aufweisen. Die Widerstandswerte umfassen einen Wertebereich von $0.1 \leq s_i \leq 10000 \Omega\text{m}$ und weisen damit sehr extreme Werte auf. Realistische Werte für die in diesem Gebiet vorliegenden Sedimente liegen im Bereich $3 \leq s_i \leq 1000 \Omega\text{m}$ (Siemon et al., 2004; Rumpel et al., 2006; Siemon et al., 2009). Werte außerhalb dieses Wertebereich sind eher selten und wurden nach der Analyse ihrer statistischen Verteilung entweder als Ausreißer oder anthropogen beeinflusst klassifiziert. Aus diesem Grund wurden die extremen Werte $s_i < 3 \Omega\text{m}$ und $s_i > 1000 \Omega\text{m}$ nicht für die Abschätzung verwendet. Für diese Werte wird stattdessen bei der Abschätzung eine relative Dichtedifferenz von 0 t/m^3 angenommen.

In früheren Studien (Gabriel et al., 2003 und Rumpel et al., 2009) wurden für die in dieser Arbeit betrachtete Untergrundstruktur der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne vier signifikante Dichteeinheiten identifiziert (siehe Abschnitt 3.3). Daher wurde für die Abschätzung der Dichteverteilungen die Unterteilung in bis zu 4 Klassen in Erwägung gezogen. Es hat sich dabei gezeigt, dass eine Klassifizierung in drei Klassen für diese Anwendung grundsätzlich ausreicht. Mittels des automatischen Klassifikationsalgo-

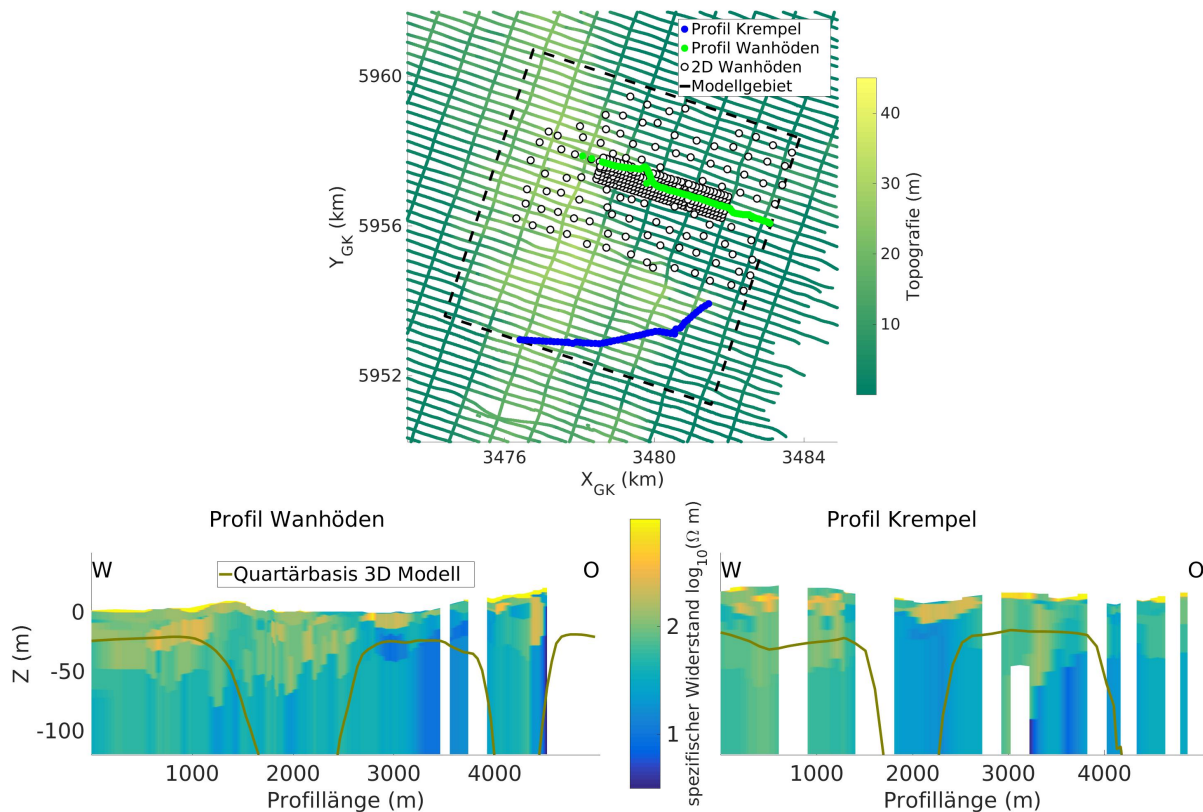


Abbildung 49: Oben: Topografie an den Fluglinien der HEM-Messungen über dem Modellgebiet für die Bremerhaven-Cuxhavener Rinne und Lage der verwendeten Schweredatensätze. Unten links: Logarithmische Widerstandsverteilung in der Tiefe über dem Profil “Wanhöden”. Unten rechts: Logarithmische Widerstandsverteilung in der Tiefe über dem Profil “Krempel”.

rithmus “ k -Means” (u. a. MacQueen, 1967) wurde die Widerstandsverteilung S in die Klassen $S \cup \{S^I, S^{II}, S^{III}\}$ unterteilt.

Für jeden der in Abb. 49 dargestellten und bereits in Abschnitt 3.3 verwendeten Schweredatensätze, “Profil Wanhöden”, “Profil Krempel” und “2D Wanhöden”, wurden alle Datenpunkte mit spezifischen Widerständen im “Nahbereich” ausgewählt und die dort vorliegenden (validen) Werte für die Abschätzung herangezogen. “Nahbereich” bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der maximale Abstand eines Widerstandsmesspunktes zu einer Schwerestation nicht mehr als 500 m beträgt. Für größere Abstände konnte keine sichere Validierung durchgeführt werden. Die Klassifikation erfolgte basierend auf den einem Datensatz zugeordneten Widerstandswerten und für jeden Schweredatensatz separat.

Die sich anschließende Abschätzung der Dichtewerte mit der einfachen linearen Beziehung aus Gl. 23 verwendete die klassifizierte, logarithmischen Widerstände $\bar{S} = \log_{10}(S)$. Diese Beziehung konnte verwendet werden, da die logarithmischen Widerstände annähernd normalverteilt sind, die initialen Widerstandswerte jedoch nicht. Für die Verteilung Dichten innerhalb der Klassen konnte ebenfalls eine Normalvertei-

Tabelle 6: Parametrisierung für die statistische Dichteabschätzung für die drei Teilgebiete in denen die vorhandenen Schweredaten für Bremerhaven-Cuxhavener Rinne vorliegen. Alle Werte für S^N , μ_S^N und σ_S^N sind auf zwei Nachkommastellen gerundet angegeben. Die Werte für μ_T^N , σ_T^N und c^N sind ungerundet angegeben. Alle Werte wurden ungerundet verwendet.

Klasse N	S^N (Ω m)	$\mu_S^N \log_{10}(\Omega$ m)	$\sigma_S^N \log_{10}(\Omega$ m)	μ_T^N (t/m^3)	σ_T^N (t/m^3)	c^N
Profil Kreppe						
I	3.17 – 38.69	1.04	0.22	–0.05	0.0192	1
II	38.71 – 131.56	1.85	0.11	0.015	0.058	–1
III	131.58 – 998.83	2.56	0.18	0	0.038	1
Profil Wanhöden						
I	3.18 – 33.69	1.01	0.20	0.0	0.077	1
II	33.71 – 101.36	1.77	0.10	0.05	0.019	1
III	101.37 – 935.79	2.49	0.19	–0.05	0.0038	1
2D Wanhöden						
I	3.17 – 30.25	0.99	0.20	–0.1	0.058	1
II	30.26 – 97.5	1.74	0.10	0.05	0.019	–1
III	97.57 – 999.01	2.49	0.20	0.0	0.058	1

lung angenommen werden. In Tab. 6 sind die Klassifizierungen und die verwendeten Abschätzungsparameter für die drei Schwere-Messkampagnen aufgeführt. Die Werte für μ_S und σ_S basieren auf klassifizierten logarithmischen Widerstandswerten im Nahbereich einer Messkampagnen und unterscheiden sich so zwischen den Klassen S^I , S^{II} und S^{III} . Dabei wurde für eine Klasse $N = \{I, II, III\}$ für den Parameter μ_S^K nicht der Mittelwert, sondern der Median-Wert mit $\mu_S^N = \bar{S}_{min}^N + 0.5 \cdot (\bar{S}_{max}^N - \bar{S}_{min}^N)$ und für σ_S^K anstelle der Standardabweichung $\sigma_S^K = 0.2 \cdot (\bar{S}_{max}^N - \bar{S}_{min}^N)$ der logarithmischen Widerstände verwendet. Die Parameter μ_T^N , σ_T^N und c^N waren unbekannt und wurden iterativ ermittelt. Die erste Abschätzung verwendete Standardwerte für die Parameter mit $\mu_T = 0.0$, $\sigma_T = 0.025$ und $c = 1$. Für die daraus erhaltene Dichteverteilung wurde der Schwereeffekt berechnet und mit dem zugehörigen Residualfeld verglichen. Danach wurden die Parameter manuell angepasst, um eine möglichst gute Korrelation zwischen Residualfeld und berechneter Schwere zu erhalten.

Da das Widerstandsmodell auch Werte für den Widerstand innerhalb der Topografie aufweist, beinhalten die erzeugten Dichteverteilungen auch Werte für $Z > 0$. Die erhaltenen relativen Schichtdichten wurden auf eine Gittergeometrie mit 50 m x 50 m x 1 m und einer Tiefe von 120 m unter lokalem NN übertragen. Die Tiefe von 120 m wurde gewählt, weil sie die maximale Eindringtiefe für die HEM-Messungen darstellt. Um absolute Dichtewerte für die Gitter zu erhalten (Abb. 50 und Abb. 51, links), wurde zu den relativen Dichtewerte die in Abschnitt 3.3 verwendete Referenzdichte für das Dichtemodell von 2.0 t/m³ addiert. Der Schwereeffekt des Gitters wurde dann mittels der Software IGMAS+ (siehe Abschnitt 3.1.2) berechnet. In IGMAS+ wurde allein der

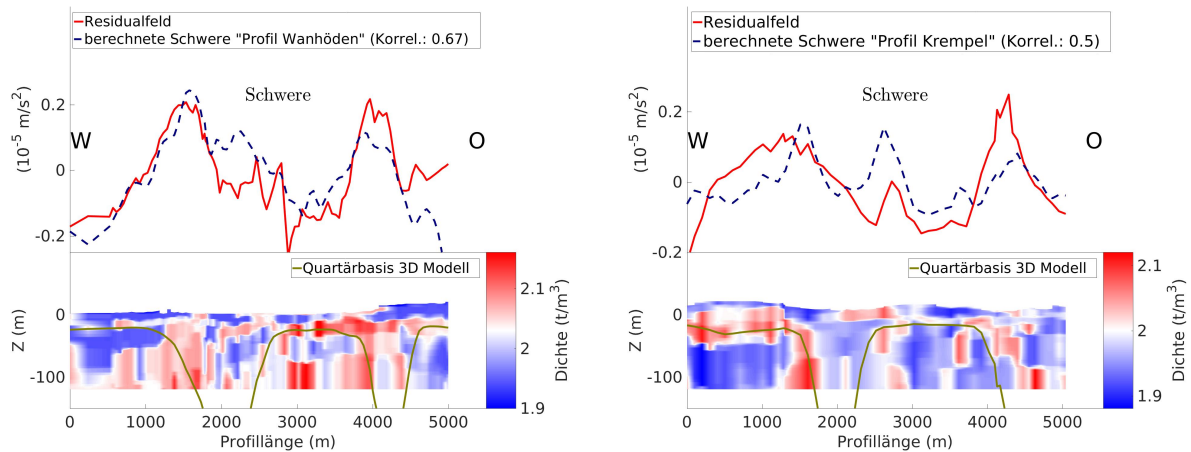


Abbildung 50: Abgeschätzte Dichteverteilungen für die beiden Profildatensätze "Profil Nord" (links) und "Profil Süd" (rechts) und deren berechneter Schwereeffekt im Vergleich zum verwendeten Residualfeld. Die Lage der Profile kann aus Abb. 16 entnommen werden.

Schwereeffekt der Gitter berechnet.

Die erzielten Ergebnisse sind in den Abb. 50 ("Profil Wanhöden" und "Profil Krempe") und Abb. 51 ("2D Wanhöden") dargestellt. Die endgültig erreichten Korrelationen zwischen berechneter Schwere und Residualfeld sind in Tab. 7 zusammengefasst.

Die erzeugten Dichtegitter sind räumlich begrenzt, liefern aber dennoch Anhaltspunkte über die interne Dichtestruktur der Rinne. Alle drei Dichteverteilungen zeigen die beiden im 3D Modell von Steinmetz et al. (2015) enthaltenen Rinnenstrukturen mit der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne im Zentrum und einer kleineren östlich davon gelegenen Rinne. In Abb. 50 ist deutlich zu erkennen, dass sich für die beiden Profile die westlichen Rinnenflanken, sowohl für die Bremerhaven-Cuxhavener Rinne als auch für die östlich gelegene kleinere Rinnenstruktur durch signifikant höhere Dichten als die östlichen Flanken und die Rinnenfüllung auszeichnen. Für den Datensatz "2D Wanhöden" (Abb. 50) weisen sowohl die westliche als auch die östliche Flanke der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne ähnliche Dichtewerte auf, die höher sind als die der Rinnenfüllung. Die kleine östliche Rinne weist für die Rinnenfüllung im Allgemeinen höhere Dichten auf als die Umgebung. Die Quartärbasis im westlichen Bereich außerhalb der Rinne zeichnet sich sehr deutlich als ein Bereich mit höheren Dichten ab.

Die relativ hohe Dichten an den Rinnenflanken sind plausibel, wenn man davon ausgeht, dass sich die quartäre Rinnenfüllung mit der höheren Dichte in den Randbereichen der Rinnen bis in oberflächennahe Bereiche erstreckt und die Tonlagen mit niedrigerer Dichte in der Rinnenmitte "einrahmt". Im Dichtemodell von Gabriel et al. (2003) ist eine ähnliche laterale Dichtestruktur mit niedrigeren Außendichten, Rinnenflanken mit höherer Dichte und niedrigen Dichten in der Rinnenmitte für die Bremerhaven-Cuxhavener Rinne bis in eine Tiefe von 200 m modelliert worden (Gabriel et al., 2003, Abb. 13). Die hier abgeschätzten relativen Dichteverteilungen sind demzufolge plausi-

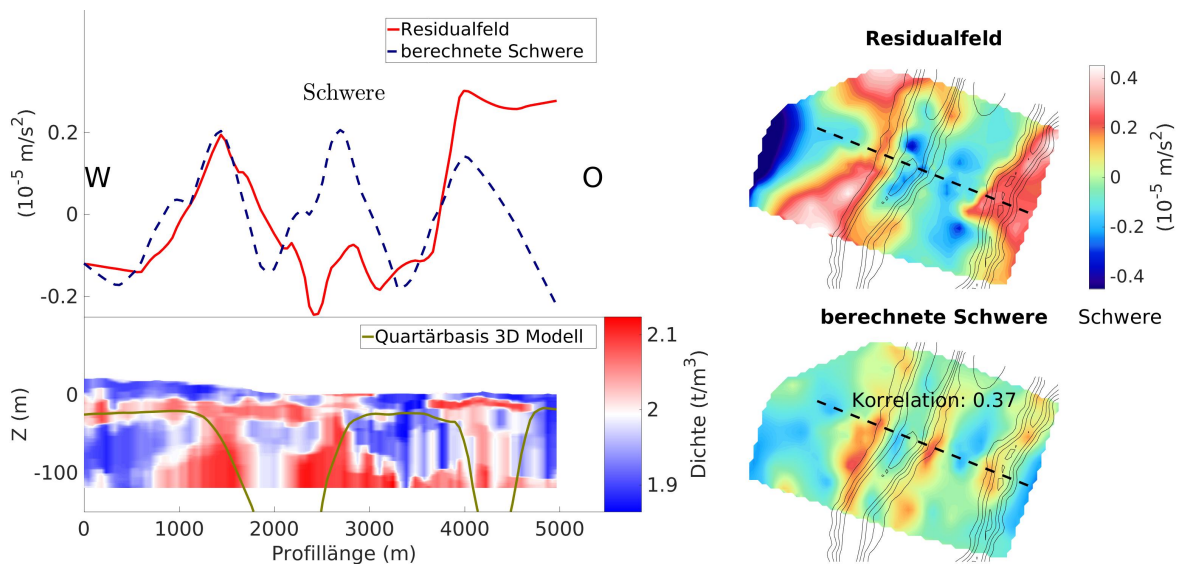


Abbildung 51: Residualfeld und Schwerewirkung der abgeschätzten Dichteverteilungen für den Datensatz "2D Wanhöden" (rechts). In der linken Teilabbildung ist die abgeschätzte Dichteverteilung auf einem Profil (gestrichelte Linie, rechts) durch die berechnete Dichteverteilung abgebildet.

bel. Ihr berechneter Schwerfeldereffekt erklärt die vorhandenen Residualfelder zudem besser als der Effekt der in Abschnitt 3.3 verwendeten Dichtemodelle (siehe Tab. 7). Dies ist darin begründet, dass durch die Abschätzung auch kleinräumige Dichteanomalien erfasst werden und auch die Topografie in den berechneten Schwereeffekt mit einfließt. Im Inneren der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne ist die Materialdichte deutlich geringer als an den Rinnenflanken. Dies äußert sich in zwei Maxima in der Schwereanomalie über den Rändern der Rinne und einem Minimum über der Rinnenmitte. Dies ist ein Hinweis auf die Areale in denen die Tonlagen besonders hohe Mächtigkeiten aufweisen. Diese befinden sich zumeist direkt über der Rinnenmitte. Die relativ niedrigere Tondichte zusammen mit der geringen Tiefe führt zu einer negativen Anomalie in Gebieten mit ausgeprägten Tonschichten. Die östliche Rinne weist eine deutlich positive Anomalie ohne signifikantes Minimum in der Mitte auf. Ihre Dichtestruktur ist deutlich anders als die der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne und lässt sehr viel geringere Tonmächtigkeiten in diesem Bereich vermuten.

Der Schwerereffekt der abgeschätzten Dichtegitter korreliert besser mit dem verwendeten Residualfeldern als der der konstant parametrisierten geologischen 3D Modellgeometrie, erklärt sie aber dennoch nur hinreichend gut. Dies beruht unter anderem darauf, dass die abgeschätzten Gitter nur Strukturen bis in eine Tiefe von 120 m abbilden und keine Strukturen darunter erfassen. Diese können jedoch die verwendeten Residualfelder ebenfalls beeinflussen. Aufgrund der einfachen Art der verwendeten Regionalfelder (Polynom zweiten Grades, angepasst an die Daten, siehe Abschnitt 3.3) werden die Effekte tieferer Strukturen nicht komplett entfernt. Ein weiteres Problem ne-

Tabelle 7: Vergleich der Korrelation der berechneten Schwerewirkung mit dem gegebenen Residualfeld für die Ergebnisse der Abschätzung der Dichteverteilungen über das in Abschnitt 5.1 beschriebene Verfahren und den Ergebnissen für die in Abschnitt 3.3 beschriebenen Dichtemodelle.

	Gabriel et al., 2003	Rumpel et al., 2009	statistische Abschätzung
Korrelation "Profil Krempel"	0.288	-0.072	0.502
Korrelation "Profil Wanhöden"	0.474	-0.300	0.666
Korrelation "2D Wanhöden"	0.039	-0.045	0.374

ben der begrenzten Eindringtiefe der HEM Messungen ist die begrenzte Auflösbarkeit von Strukturen unterhalb gut leitender Schichten. Im Untersuchungsgebiet "Bremerhaven-Cuxhavener Rinne" sind dies die ausgedehnten Tonlagen des "Lauenburg Clay Complex" (LCC oder LC), welche vor allem im oberen Bereich der Rinne mit höheren Mächtigkeiten vorliegen. Diese Schichten werden bei der Inversion der HEM-Daten in viel größere Tiefen ausgedehnt, als geologisch plausibel wäre. Der Effekt der Tone wird demzufolge vermutlich überschätzt. Dies könnte dadurch verhindert werden, dass die Inversionsergebnisse der HEM-Daten mit Hilfe der vorhandenen "SkyTEM"-Ergebnisse korrigiert werden. Diese Korrekturen lagen für die beschriebenen Arbeiten noch nicht vor und konnten so nicht in die Abschätzung mit einfließen. Zusätzlich können Salzwasserintrusionen in diesem Gebiet die Messungen beeinflussen (Siemon et al., 2004; Rumpel et al., 2006; Siemon et al., 2009).

Ein weiteres Problem könnte auch eine unzureichende Klassifikation sein. Die Klassifikation der spezifischen Widerstände erfolgt in drei Klassen. Vor allem für den räumlich stärker ausgedehnten Datensatz "2D Wanhöden" reicht diese Anzahl nicht aus. Es werden vermutlich mehr Klassen benötigt, um die vorliegenden Materialien abzubilden. Die genaue Anzahl ist aber unbekannt. Für eine unbekannte Anzahl an möglichen Klassen ist der verwendete Clusteralgorithmus ("k-Means") jedoch nicht geeignet. Alternativ besteht die Möglichkeit, eine überlappende Klassifikation zu verwenden. Dabei wird ein Parameterwert einer oder mehreren Klassen zugeordnet, wenn er die passenden Bedingungen erfüllt. Ein Beispiel wäre eine petro-physikalische Klassifikation, in der ein Parameterwert allen Klassen zugeteilt wird, in deren Wertebereich er fällt. Dabei entspricht jede Klasse einer definierten Lithologie. Dies kann noch dahingehend erweitert werden, dass die Zugehörigkeit zu einer in Frage kommenden Klasse statistisch abgeschätzt wird. Man erhält dann für alle Klassen eine Wahrscheinlichkeit, die die Klassenzugehörigkeit eines Wertes angibt. Mit einer solchen Unterteilung der vorhandenen Werte lässt sich das Abschätzungsergebnis vermutlich verbessern. Eine zusätzliche Verbesserung kann auch mit der Verwendung besserer Regionalfelder (z.B. aus Satelliten- oder Aero-Gravimetrie) und einer Kombination der verschiedenen zur

Validierung verwendeten Schweredaten zu einem kombinierten Schwerfeld erreicht werden. Dies wurde aus Zeitgründen in dieser Arbeit nicht getestet. Die erzeugten Dichtegitter können dennoch bereits als Startmodelle für Inversionen oder Vorwärtsmodellierungen verwendet werden und erlauben genauere Einsichten in die Dichtestruktur der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne.

5.4 Fazit

Neben der Kenntnis der Geometrie des Untergrundes sind für gravimetrische Anwendungen auch Informationen über die Dichteverteilung im Untergrund entscheidend. Vor allem im oberflächennahen Bereich reicht häufig die Zuordnung einer konstanten Dichte zu einer lithologisch-stratigrafischen Einheit nicht aus, da gerade bei sehr geringen Dichtedifferenzen zwischen den Einheiten das Schweresignal an Bedeutung gewinnt, welches durch Dichteveränderungen innerhalb der lithologischen Einheiten hervorgerufen wird. Diese lokalen Dichteveränderungen sind jedoch häufig nicht bekannt. Gerade in interdisziplinären Forschungsprojekten stehen aber meist Informationen über die oberflächennahe Verteilung anderer petro-physikalischer oder geophysikalischer Parameter zur Verfügung.

Der in dieser Dissertation entwickelte statistische Ansatz erlaubt es, eine unbekanntere Parameterverteilung im Untergrund basierend auf einer bekannten Verteilung eines anderen petro-physikalischen Parameters abzuschätzen. Der beschriebene Abschätzungsansatz berücksichtigt dabei keine realen physikalischen Abhängigkeiten. Die Ergebnisse müssen daher unter Berücksichtigung dieses Wissens interpretiert werden. Sie benötigen immer eine Überprüfung auf Plausibilität und eine Validierung anhand zusätzlicher Informationen. Wenn danach ein Ergebnis nicht zurückgewiesen werden muss, kann es zum Beispiel als Startmodell für eine Inversion oder Vorwärtsmodellierung verwendet werden.

Es konnte gezeigt werden, dass der vorgestellte Ansatz in der Lage ist, eine bekannte Beziehung zwischen p-Wellen Geschwindigkeiten und Dichten so zu reproduzieren, dass eine plausible äquivalente Dichteverteilung abgeschätzt wird.

Zudem war es möglich, über die Verwendung der Widerstandsverteilung eine mögliche, plausible Dichteverteilung für das Modellgebiet der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne abzuschätzen, deren berechneter Schwereeffekt die verwendeten Schweredaten besser erklären konnte als die in Abschnitt 3.3 verwendeten konstanten Dichtemodelle. Eine Verallgemeinerung der Ergebnisse auf andere Untersuchungsgebiete ist nicht ohne Weiteres möglich.

6 3D-Druck - Möglichkeiten der Anwendung analoger 3D Repräsentationen geophysikalischer Modelle

Seit in den 1980er Jahren erste Ansätze für 3D-Druck oder *Rapid Prototyping* vorgestellt wurden, hat sich diese Technologie stetig weiterentwickelt und wird inzwischen regelmäßig in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen von den Ingenieurwissenschaften bis hin zu Medizin und Chemie eingesetzt, um Vorserienprototypen, Bau- und Ersatzteile sowie Anschauungsmodelle günstig und schnell produzieren zu können (Gross et al., 2014). Innerhalb der Geowissenschaften und speziell der Geophysik wird dieses Verfahren bisher, wenn überhaupt zur Anfertigung von Ersatz- und Zusatzteilen für verschiedene Messinstrumente verwendet.

Im Rahmen des DGMK-Projekts TiPOT3D steht der Arbeitsgruppe "Geophysik und Geoinformation" der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel seit 2013 der 3D-Drucker "Ultimaker 2" zur Verfügung. In diesem Abschnitt wird versucht, die durch das Projekt gestellte Frage, in wie weit man 3D Dichtemodelle direkt über 3D-Druck repräsentieren kann, zu beantworten. Dafür wurden in einem ersten Ansatz verschiedene geophysikalische Daten und Geometrien für den 3D-Druck aufbereitet und als analoge Anschauungsmodelle gedruckt. Basierend auf den Ergebnissen wird eine erste Einschätzung über den wissenschaftlichen und kommunikativen Mehrwert dieses neuen Präsentationmittels getroffen.

6.1 Allgemeines Verfahren

Unter dem Begriff "*Rapid Prototyping*", umgangssprachlich auch als 3D-Druck bezeichnet, werden im Allgemeinen Verfahren zusammengefasst, mit denen schneller und günstiger als mit klassischen Produktionsverfahren Bauteile hergestellt werden können. Dabei werden auf Basis von digitalen 3D Geometriedaten Bauteile ohne formgebende Werkzeuge schichtweise aufgebaut. Die Herstellung ist dabei immer *generativ*, das heißt, dass die Formgebung über den Auftrag von initial formlosen Materialien und nicht über Materialabtrag erfolgt (Elsner, 2009). Die verschiedenen Verfahren für die Umsetzung von *Rapid Prototyping* verwenden einen gemeinsamen Workflow. Dieser ist in Abb. 52 zusammengefasst. Die initialen digitalen 3D Geometriedaten werden über eine software-basierte Geometrieschnittstelle ("Slicer") in einzelne, horizontale Schichten zerlegt. Diese Schichtinformationen werden anschließend in ein von der Funktionsweise des zu verwendenden Verfahrens abhängiges Datenformat überführt, welches an den Drucker übermittelt wird. Dieser setzt daraufhin die einzelnen Schichten physisch um und verbindet die Schichten untereinander. So wird aus einer initial nur digital vorhandenen Repräsentation eines Objektes eine analoge (physisch vorhandene) Repräsentation.

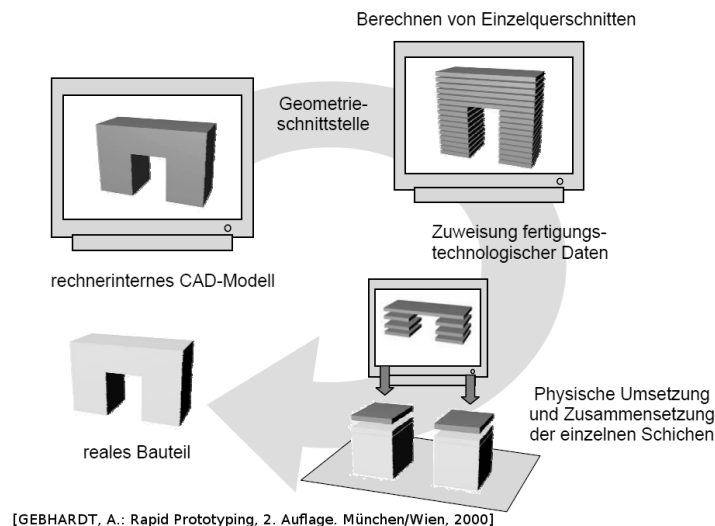


Abbildung 52: Schematische Darstellung des allgemeinen 3D-Druck Workflows. (Abbildung nach Elsner, 2009)

Es wurden seit den 1980er Jahren verschiedenen technische Lösungen zur physischen Umsetzung und Verbindung der Schichten entwickelt. Davon ist die *Stereolithografie* (SLA) das älteste, das *selective Lasersintern* (SLS) das kommerziell am weitesten verbreitete und *Fused Deposition Modelling* (FDM) und *Fused Filament Fabrication* (FFF) die technisch einfachsten und kostengünstigsten Verfahren.

Bei der SLA wird ein zu produzierendes Bauteil über das schichtweise Aushärten einer photoaktiven Flüssigkeit erstellt. Dafür wird der zu verfestigende Bereich an der Oberfläche der Flüssigkeit lokal mit UV-Licht bestrahlt. Um überhängende Strukturen herzustellen, ist der zusätzliche Druck von Stützstrukturen notwendig, um ein Verformen des Bauteils zu verhindern. Ein mehrfarbiger Druck ist aus praktischen Gründen unangebracht, da dafür das komplette Flüssigkeitsbad, in dem sich das Bauteil befindet, während des Druckvorgangs ausgetauscht werden müsste (Elsner, 2009; Gross et al., 2014).

Beim SLS wird für jede Schicht der gesamte Baubereich mit einer dünnen Schicht pulverförmigen Ausgangsmaterials bedeckt. Dieses wird dann mittels eines Lasers lokal an die darunter liegenden Schichten angeschmolzen. Da das überschüssige Pulver der vorherigen Schichten im Bauraum verbleibt und die darüber liegende Schicht stützt, sind hier keine separaten Stützstrukturen für Überhänge notwendig, was die Nachbearbeitung des Druckergebnisses vereinfacht. Theoretisch ist es zu dem möglich, für jede Schicht ein andersfarbiges Pulver zu verwenden, was einen effizienten Farbwechsel zwischen zwei Schichten ermöglicht. Das Druckmaterial kann sehr vielfältig gewählt werden, abhängig von den gewünschten Eigenschaften des Bauteils und der Leistungsfähigkeit des verwendeten Lasers. So lassen sich neben einfach Kunststoffen auch keramische und metallische Werkstoffe verwenden (Elsner, 2009).

Für nicht-professionelle Anwender bietet sich die Verfahren FDM und FFF an. Hier

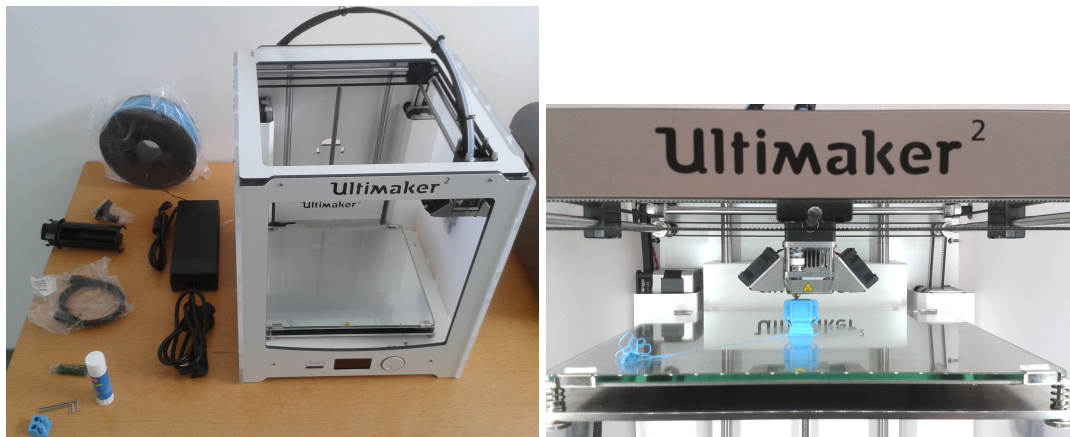


Abbildung 53: 3D-Drucker "Ultimaker 2". Links: Drucker und Zubehör. Rechts: Detaillierte Frontalansicht beim Probedruck eines Testmodells.

wird ein amorpher, pulver- (FDM) oder drahtförmiger (FFF) Werkstoff im Druckkopf aufgeschmolzen. Das flüssige Material wird für jede Schicht als Endlosfilament im Baubereich aufgebracht und härtet auf den darunterliegenden Schichten aus. Dadurch ist der Druck mit vergleichsweise geringem Zeit-, Material und Energieaufwand möglich. Allerdings kann es durch die Abkühlung zu Deformationen am Bauteil kommen. Diese können nur durch erhöhten technischen Aufwand (z.B. ein komplett beheizter Bauraum) verhindert werden. Als Werkstoffe kommen vor allem verschiedene thermoplastische Kunststoffe wie *Polyactid* (engl. *polylactic acid*, PLA) oder *Acrylnitril-Butadien-Styrol* (ABS) in Frage. Diese Werkstoffe liegen zum Beispiel bei der FFF als Endlosstrang auf Rollen vor. Da sich die Materialfarbe auf einer Rolle nicht ändert, müsste für einen Farbwechsel während des Drucks das komplette Material ausgetauscht werden. Dies ist in der Praxis nicht praktikabel. Auch für FDM und FFF ist der Druck von überhängenden Strukturen nur mittels zusätzlicher Stützstrukturen möglich. Diese müssen nachträglich entweder manuell entfernt werden oder können, wenn dafür Materialien mit anderen Eigenschaften als für das eigentliche Bauteil verwendet wurden, zum Beispiel chemisch gelöst werden (Elsner, 2009; Gross et al., 2014).

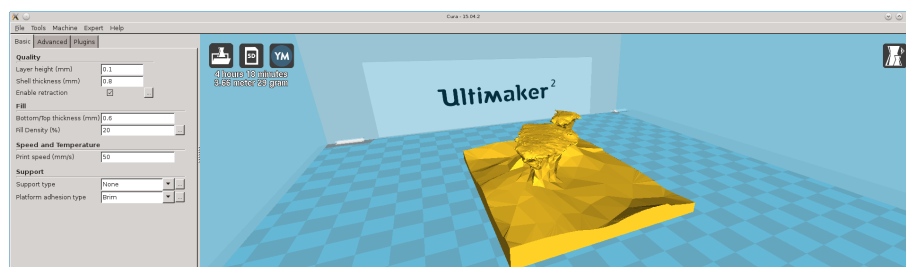


Abbildung 54: Screenshot aus der Open-Source-Software "Cura". Aktuell ist das in Abschnitt 4.2.2 beschriebene Salzstockmodell geladen, um für den 3D-Druck aufbereitet zu werden (Ergebnis siehe Abb. 55).

Beim vorhandenen 3D-Drucker der Arbeitsgruppe handelt es sich um das Modell "Ulti-

maker 2" (siehe Abb. 53). Mit Anschaffungskosten von unter 2 500 Euro handelt es sich um ein kostengünstiges Gerät, welches nach dem FFF Prinzip arbeitet und vorrangig PLA als Material verwendet (Ultimaker B.V., 2014). Um die digitalen 3D Modelle für den Druck vorzubereiten, wird die vom Hersteller bereitgestellte Open-Source-Software "Cura" (siehe Abb. 54) verwendet. Die Software importiert die Geometriemodelle zum Beispiel im STL-Format (*Standart Transformation Language*; Elsner, 2009) und dient als so genannter "Slicer". Sie zerlegt die 3D Geometrie in horizontale Schichten und berechnet zusätzlich automatisch die für Überhänge notwendigen Stützstrukturen. Für jede Schicht wird dann der Laufpfad des Druckkopfes bestimmt. Die Pfade für jede Schicht werden in das für den Drucker interpretierbare gcode-Format exportiert und diese Datei dem Drucker mittels einer SD-Karte zugeführt.

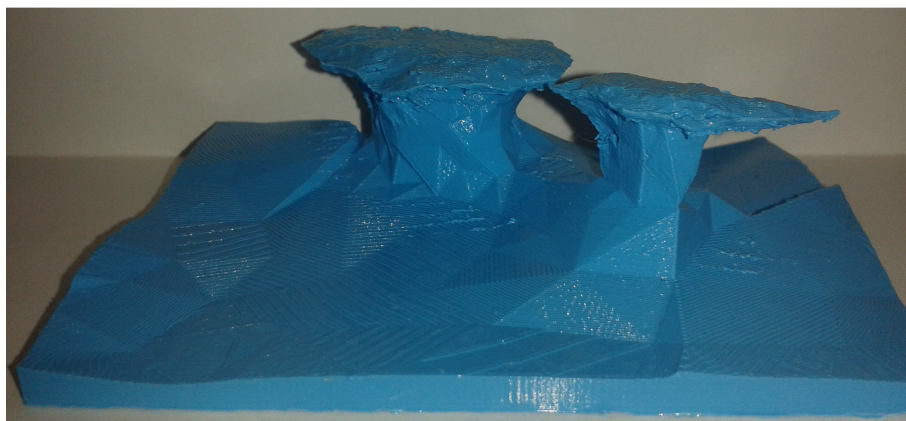
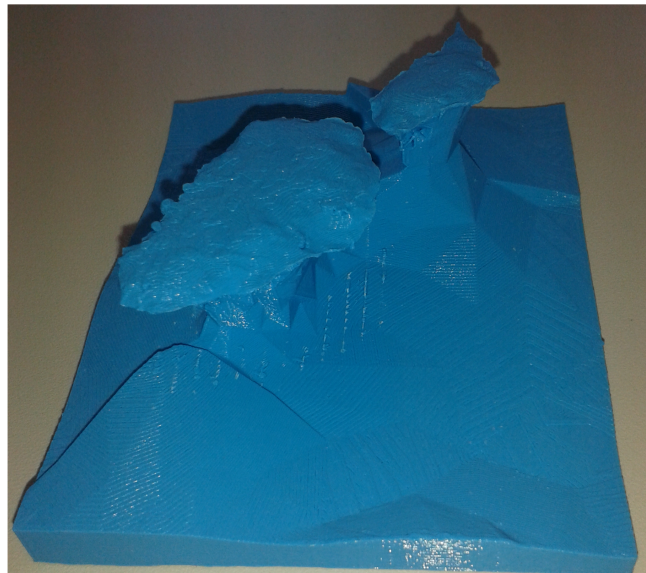


Abbildung 55: Druckergebnis für das in Abschnitt 4.2.2 beschriebene Salzstockmodell.

6.2 Aufbereitung geophysikalischer Datensätze für den 3D-Druck

Damit die Software ein zu druckendes Geometriemodell in die notwendigen horizontalen Schichten zerlegen kann, muss sie in der Lage sein, eindeutig das "Innere" und "Äußere" der Geometrie zu bestimmen. Dafür muss die Geometrie ein Volumen einschließen und es dürfen zusätzlich keine sich überschneidenden Flächen auftreten.

Für die in Kapitel 3.1 beschriebenen konsistent geschlossenen Hüllgeometrien ist Cura in jedem Fall in der Lage, diese Geometrie für den Druck aufzubereiten. In Abb. 54 ist die geschlossene triangulierte Hülle für die in Abschnitt 4.2.2 beschriebene und vereinfachte Geometrie zweier Salzstöcke in Cura dargestellt. Abb. 55 zeigt das gedruckte Ergebnis für dieses Modell aus zwei verschiedenen Blickwinkeln.

Auch der Druck komplexer, mehrteiliger Modelle ist über diese geschlossenen triangulierten Hüllen möglich. Ein Beispiel dafür ist das in Abb. 56 (oben links) gezeigte Modell aus drei getrennten Hüllen, die auf einem geologischen Strukturmodell für eine Salzstruktur bei Geesthacht in Schleswig-Holstein (Heese, 2012) basieren. Die drei Hüllen repräsentieren die geologischen Einheiten direkt unter (grau) und über (gelb) dem Salz, sowie das Salz (grün), inklusive der Salzstöcke. Das Modell der Schicht unter

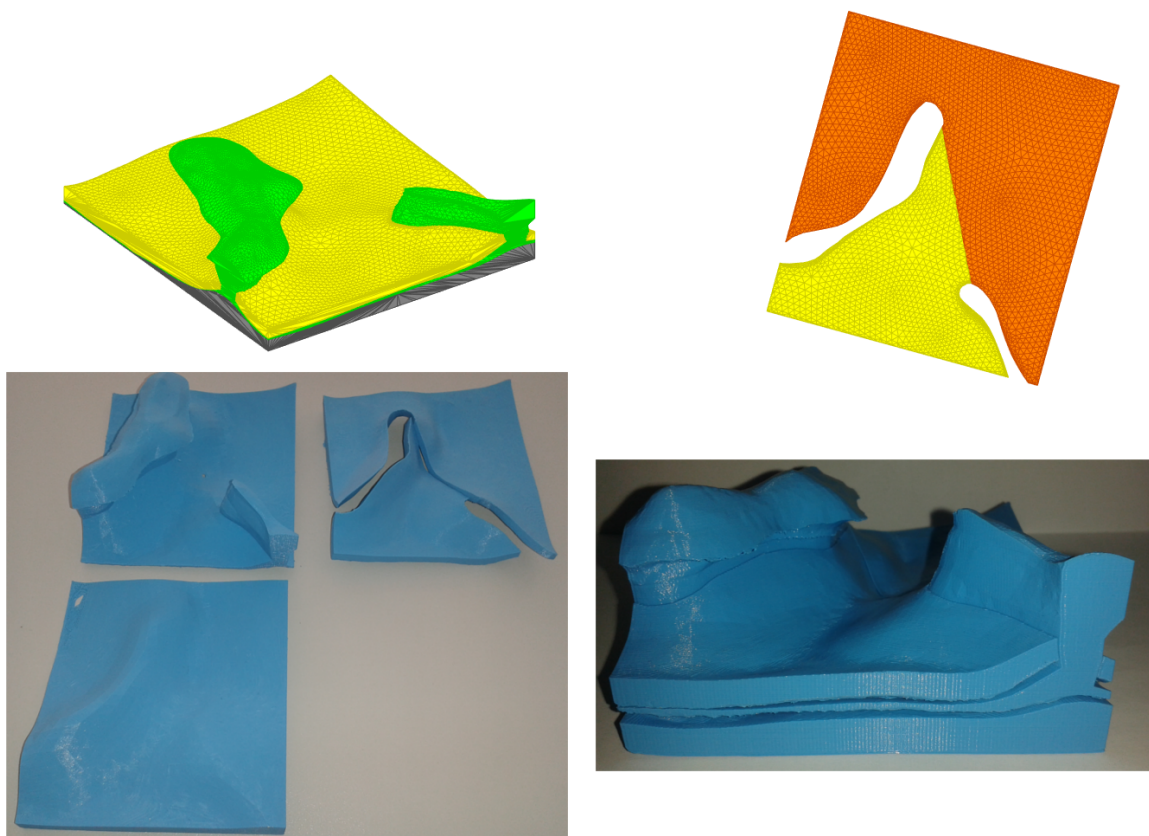


Abbildung 56: Druckergebnis für ein Untergrundmodell aus drei separaten Teilgeometrien für eine Salzstockgeometrie aus dem Raum Geesthacht in Schleswig-Holstein, Deutschland (Heese, 2012). Oben: Initiale digitale Geometrien. Links unten: Einzelteile nach der Nachbearbeitung. Rechts unten: Zusammengefügtes Modell.

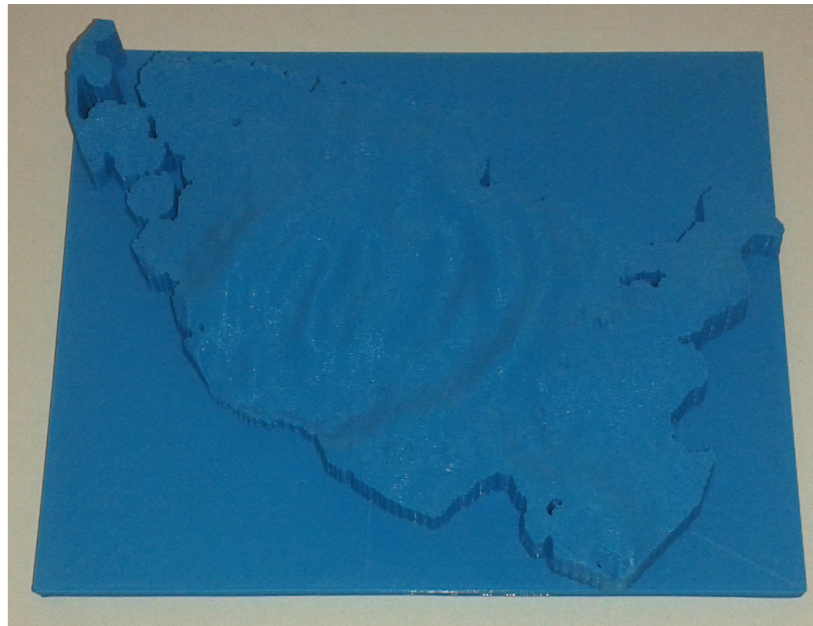
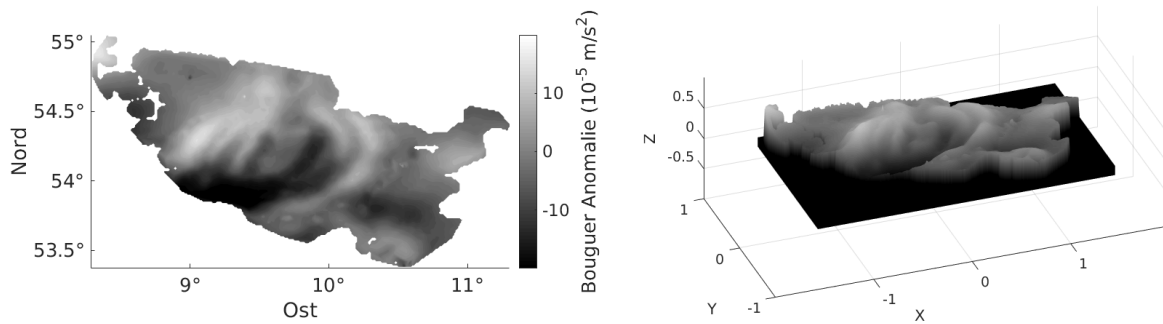


Abbildung 57: Umwandlung des 2D Schwerefelds von Schleswig-Holstein (Bouguer-Anomalie, oben links) in eine druckbare triangulierte Geometrie (oben rechts). Für den Druck wurden die Koordinaten lokalisiert und der Wert für die Bouguer-Anomalie als relative Höhenangaben repräsentiert. Unten: Druckergebnis für das Schwerefeld von Schleswig-Holstein.

dem Salz und das der Salzstrukturen können ohne weitere Anpassung gedruckt werden. Um das Modell nach dem Druck aber auch zusammen setzen zu können, ist es notwendig, die Geometrie der Schicht über dem Salz in zwei getrennte Teile aufzuspalten (Abbildung 56, oben rechts). Der dafür notwendige Workflow wird im beiliegenden Matlab-Script `divideOBJMesh.m` (Anhang C) abgearbeitet. Nachdem dem Laden der Geometrieinformationen des Modells definiert der Anwender interaktiv eine vertikale Schnittebene, an der das initial geschlossene Modell aufgetrennt wird. Dann werden alle Modelldreiecke mit dieser Ebene verschnitten. Dafür wurde für das gezeigte Modell das Verfahren von Tropp et al. (2006) verwendet, da dieses es ermöglicht, die genauen Schnittpunkte auf den betroffenen Dreiecksseiten zu bestimmen. Anhand dieser Schnittpunkte wird dann das neue Grenzpolygon der beiden entstandenen offenen Hüllen bestimmt. Durch dessen Triangulation werden die Hüllen wieder geschlossen.

Die beiden Teile können jetzt gedruckt werden (Abb. 56, unten links). Nachdem die Modelle gesäubert und die Stützstrukturen entfernt wurden, lassen sich die vier Teilmodelle zu einem Gesamtmodell kombinieren (Abb. 56, unten rechts).

Neben diesen Geometriemodellen ist es auch möglich, zweidimensionale Messdaten und Parametermodelle zu drucken. Dafür müssen die Mess- oder Parameterwerte erst als Geometrie repräsentiert werden. Dies ist in Abb. 57 am Beispiel des 2D Gitters der Bouguer-Anomalie von Schleswig-Holstein (oben links) dargestellt. Die Schwereanomalie wurde erst in relative Höhenwerte übertragen und die entstandene Fläche im Raum danach trianguliert. Basierend auf dem Randpolygon werden zusätzliche vertikale Randflächen aufgebaut, welche die Bodenplatte für das Modell bilden. Die entstandene Geometrie (oben rechts) konnte danach gedruckt werden. Das Ergebnis ist in der unteren Teilabbildung von Abb. 57 dargestellt.

6.3 Fazit

Grundsätzlich lassen sich Modelle der Geowissenschaften als 3D-Druck repräsentieren. Je komplexer die Modelle allerdings werden, desto größer ist der Arbeitsaufwand, der in die Nachbearbeitung der Modelle investiert werden muss. Die in dieser Arbeit erstellten analogen Modelle erwiesen sich als ein recht eindrucksvolles Mittel zur Präsentation der Arbeiten, vor allem für fachfremdes Publikum. Zudem ist für die Präsentation der einmal gedruckten Geometrien, im Gegensatz zur digitalen Stereo-Visualisierung, kein zusätzliches Equipment notwendig. Sie bieten sich also vor allem dann als Kommunikationsmedium an, wenn Präsentationen über 3D Computergrafik nicht angemessen sind oder nicht in Frage kommen.

7 Abschließendes Fazit und Ausblick

Anhand von Anwendungen aus der Geophysik wurde gezeigt, wie die Geoinformatik die Handhabung komplexer Geodaten und Geomodelle in der interdisziplinären Forschung unterstützt. Dies geschah exemplarisch für die Themen **Kommunikation und Datenaustausch, Optimierung von Daten und Modellen, statistische Analyse zur Abschätzung von Untergrundparametern und Präsentation von geophysikalischen Daten über das Verfahren 3D-Druck**.

Durch die zunehmende Digitalisierung und Vernetzung der interdisziplinären Forschung ist die Verwendung von Kommunikationsplattformen aus dem "Web 2.0" (z. B. Wiki-Seiten) eine vielversprechende Möglichkeit die Kommunikation in Verbundprojekten zu koordinieren und zu archivieren. Dabei ist der entscheidende Punkt, dass möglichst viele der an einem Forschungsprojekt Beteiligten die bereitgestellte Plattform nutzen, um Informationen und Daten für alle anderen bereitzustellen. Die Effektivität dieser Art der Kommunikation steigt mit der Anzahl der daran beteiligten Personen. Für zukünftige Forschungsvorhaben sollten "Web 2.0"-basierte Kommunikationsplattformen zusätzlich zur normalen direkten Kommunikation für die Projektarbeiten in Betracht gezogen werden.

Bei der Bereitstellung von Schnittstellen für den Datenaustausch innerhalb interdisziplinärer Forschung ist die genaue Kenntnis der Eigenschaften der auszutauschenden Datensätze und der an sie gestellten Anforderungen bzgl. ihrer weiteren Verarbeitung notwendig. Diese unterscheiden sich zwischen den verschiedenen geowissenschaftlichen Anwendung zum Teil sehr stark. Spezifische Schnittstellen zwischen den unterschiedlich verwendeten Repräsentationen für Daten und Modelle von verschiedenen Anwendungen können diese Unterschiede explizit berücksichtigen. Heterogene Systeme für den Datenaustausch bestehen aus solchen spezifischen Schnittstellen. Sie sind aktuell weit verbreitet und wurden auch in dieser Arbeit implementiert und verwendet. Da für jede neue Kombination aus Datenquelle und Datennutzer eine neue spezifische Schnittstelle geschaffen werden muss, sind diese heterogenen Systeme jedoch aufwendig zu warten und unflexibel. Homogene Schnittstellensysteme sind dahingehend flexibler, da sie die auszutauschenden Daten immer in einer einheitlichen Repräsentationsform vorhalten. Für diese müssen dann jeweils nur die passenden Dateneingabe- oder Datenausgabeschnittstellen geschaffen werden. Diese Systeme sind aufwendig zu etablieren und lohnen sich bei geringem Datenaufkommen nicht.

Der aktuell enorm große Datenumfang in vielen geophysikalischen Datensätzen erschwert die numerische Verarbeitung massiv. Daher erscheint es angebracht, den Datenumfang an die Anforderungen der jeweiligen Anwendung anzupassen. Die in dieser Arbeit vorgestellten Ansätze zur Ausdünnung verteilter Daten (CIDRe) und triangulierter Geometriemodelle ("Mesh-Simplification") sind sehr gut geeignet, um den

Umfang dieser Datensatz-Typen für gravimetrische Anwendungen ohne signifikanten Einfluss auf die Berechnungsergebnisse zu reduzieren. Beide Verfahren können in Zukunft noch auf andere Arten von Datensätzen wie 2D und 3D Gitter oder unstrukturierte Gitter (z.B. Tetraedergitter) angepasst und erweitert werden.

Die Kenntnis der Verteilung von Materialparametern im Untergrund ist für geophysikalische Anwendungen von entscheidender Bedeutung. Der in dieser Arbeit abgeleitete statistische Ansatz analysiert die Eigenschaften einer bekannten Parameterverteilung und schätzt basierend auf diesen Informationen die unbekannte Verteilung eines weiteren Parameters ab. Da es sich um eine rein statistische Methode handelt, benötigen die Ergebnisse in jedem Fall eine anschließende Evaluierung und Interpretation. Sie sollten niemals ohne eine Interpretation verwendet werden. Das vorgestellte Verfahren wurde auf ein synthetisches und ein reales Beispiel erfolgreich angewandt. Die erzielten Ergebnisse lassen sich jedoch nicht bedingungslos auf andere Anwendungen übertragen. Für jede neue Anwendung ist immer eine erneute Validierung der Ergebnisse erforderlich.

Interaktive 3D Computergrafik ist aktuell in den Geowissenschaften ein weit verbreitetes Präsentationsmittel, da sich damit auch sehr komplexe Daten und Sachverhalte sehr effektiv darstellen lassen. Für diese Art der Visualisierung ist jedoch immer eine technische Infrastruktur für die Präsentation notwendig. In dieser Arbeit hat sich die Präsentation von geophysikalischen Modellen mittels 3D-Druck als effektiv und eindrucksvoll erwiesen. Die technisch bedingte geringe Komplexität der gedruckten Modelle war dabei kein Nachteil und erleichterte sogar das Verständnis der Sachverhalte eines fachfremdem Publikums. Zudem ist für die Präsentation einmal gedruckter Modelle keine weitere technische Infrastruktur notwendig. Für zukünftige Arbeiten kann und sollte 3D-Druck als zusätzliches Präsentationsmittel zumindest in Betracht gezogen werden.

Danksagung

Ich möchte mich hiermit sehr herzlich bei meinem Betreuer, Prof. Dr. H.-J. Götze und Prof. W. Rabbel für die Betreuung und Begutachtung meiner Arbeit bedanken. Mit besonderer Dank gilt zudem Sabine Schmidt, Theresa Schaller und allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe "Geophysik und Geoinformation" für ihre freundliche Hilfe, Ratschläge und Hinweise.

Diese Arbeit ist im Zuge des Projekte "AIDA - From Airborne Data Inversion to In-Depth Analysis" und des "TiPOT3D - Integrative Interpretation von Potentialfeldern und korrespondierenden Gradienten mit Hilfe von 3D Modellen und Visualisierungen" entstanden. Ich möchte mich bei allen Projektbeteiligten für die Unterstützung meiner Arbeit bedanken.

Anhang

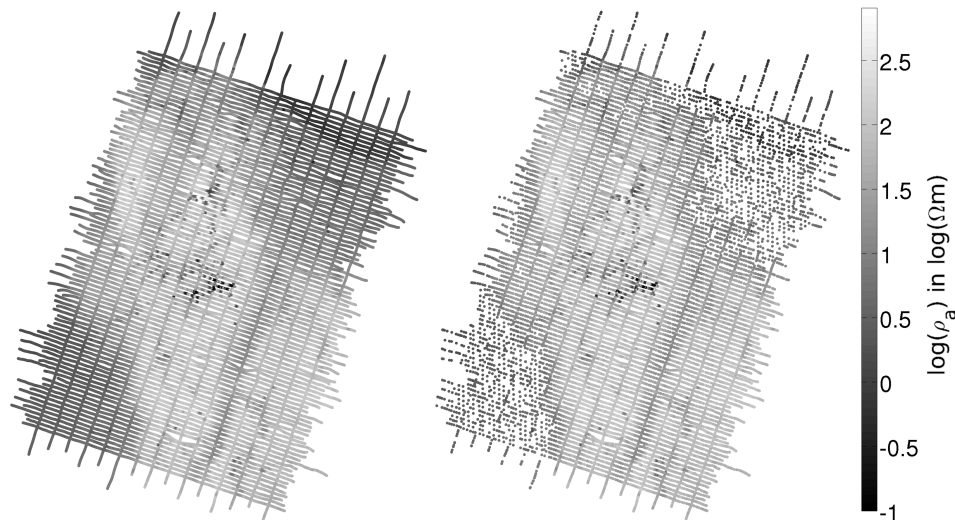


Abbildung 58: Logarithmischer scheinbarer Widerstand $\rho_a^{385\text{ Hz}}$ im Untersuchungsgebiet Cuxhavener Rinne für die Messfrequenz 385 Hz. Links: Initiale Messpunktverteilung. Rechts: CIDRe-Ergebnis für eine Reduktion anhand des Einzelparameters $\rho_a^{385\text{ Hz}}$. Der reduzierte Datensatz enthält nur noch 22.3% der initialen Datenpunkte. (Abbildung nach Götze et al., 2014)

A Weitere Anwendungen des CIDRe Verfahrens

A.1 Resampling mittels mehrerer Datenparameter: HEM-Datensatz der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne (Projekt AIDA)

Für die Arbeit im Verbundprojekt AIDA stand für das Untersuchungsgebiet der Cuxhavener Rinne ein Hubschrauber-Elektromagnetik-Datensatz mit rund 120 000 Messpunkten zur Verfügung (siehe Abb. 58, links). Dieser Datensatz umfasst für jeden Datenpunkt fünf mittels 1D Inversion ermittelte scheinbare Widerstände ρ_a für die fünf gemessenen Frequenzen (Siemon et al., 2004; Siemon et al., 2009). Dieser Datensatz stellt ein Zwischenprodukt für die in Steinmetz et al. (2015) und Abschnitt 5.3 verwendete endgültige Widerstandsverteilung aus Schichtwiderständen und Schichtmächtigkeiten dar und wurde in Götze et al. (2014) bereits anhand des Datenparameters $\rho_a^{385\text{ Hz}}$ (invertierter scheinbarer Widerstand für die Messfrequenz 385 Hz) mit dem in Abschnitt 4.1 vorgestellten CIDRe-Verfahren ausgedünnt. Das Ergebnis mit knapp 27 000 Datenpunkten (22.3% der initialen Punktzahl) ist in Abb. 58 (rechts) dargestellt. In Götze et al. (2014) wird für dieses Ergebnis eine mittlere Abweichung im Datenparameter $\rho_a^{385\text{ Hz}}$ von rund $1.2\ \Omega\text{m}$ angegeben, was 0.19% der initialen Parameteramplitude entspricht. Dies entspricht einem RMSE (siehe Gleichung 7) für $\rho_a^{385\text{ Hz}}$ von rund $3.1\ \Omega\text{m}$. Die Fehler in allen fünf Datenparametern für die Ausdünnung anhand des einzelnen Parameters $\rho_a^{385\text{ Hz}}$ sind in Tab. 8 zusammengefasst und liegen zwischen $2.6\ \Omega\text{m}$ für den Parameter $\rho_a^{1.83\text{ kHz}}$ und $5.7\ \Omega\text{m}$ für den Parameter $\rho_a^{192.6\text{ kHz}}$.

In einer zweiten Anwendung wurde dieser Datensatz anhand der scheinbaren Wider-

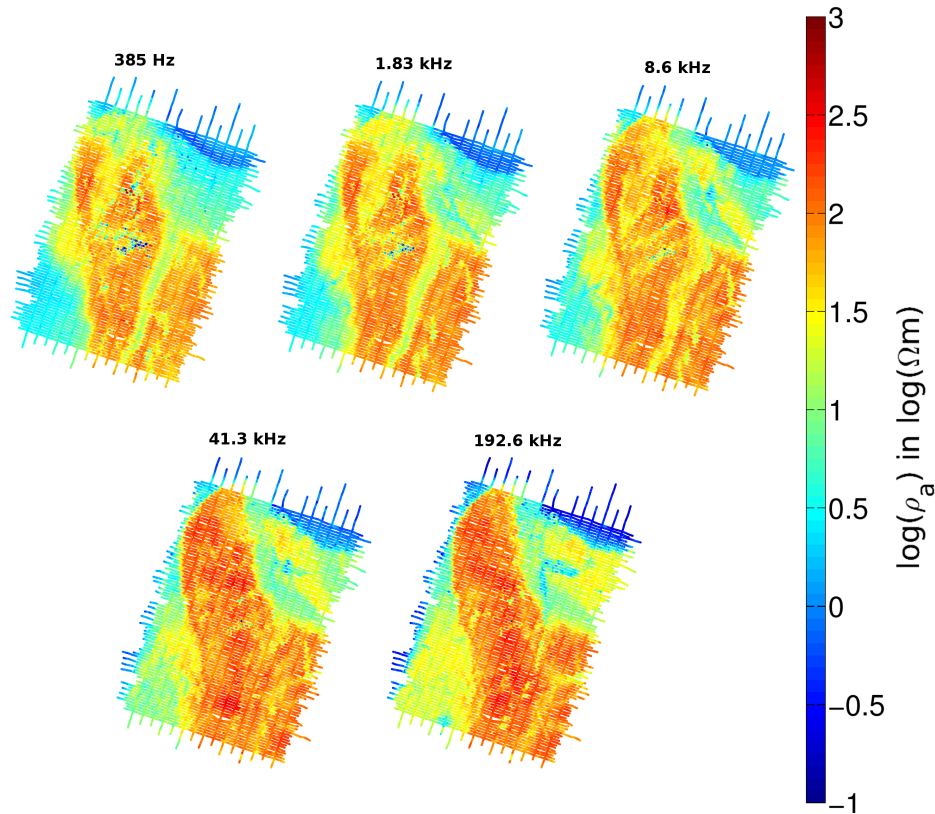


Abbildung 59: Logarithmischer scheinbarer Widerstand ρ_a im Untersuchungsgebiet Bremerhaven-Cuxhavener Rinne für die fünf Messfrequenzen (Siemon et al., 2004).

stände für alle fünf Messfrequenzen (385 Hz, 1.8 kHz, 8.6 kHz, 41.3 kHz und 192.6 kHz, siehe Abb. 59) mittels CIDRe ausgedünnt. Das Ergebnis der CIDRe Ausdünnung mit mehreren Parametern beinhaltet noch knapp 30 000 Datenpunkte. Die Verteilung der verbliebenen Punkte ist in Abb. 60 dargestellt. Die Fehler für die einzelnen Parameter sind in Tab. 8 zusammengefasst und liegen zwischen $2.4 \Omega m$ für den Parameter $\rho_a^{8.6 \text{ kHz}}$ und $3.8 \Omega m$ für die Parameter $\rho_a^{41.3 \text{ kHz}}$ und $\rho_a^{192.6 \text{ kHz}}$. Sie sind damit geringer als die Fehler für die Ausdünnung bei der nur der Parameter $\rho_a^{385 \text{ Hz}}$ verwendet wurde. Um die durch die Ausdünnung auftretenden Fehler in allen vorhandenen Datenparametern möglichst gering zu halten, sollten alle Parameter durch die Datenreduktion berücksichtigt werden.

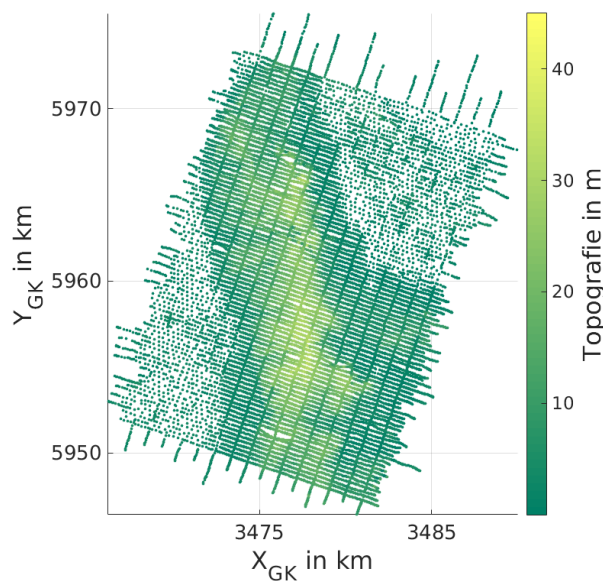


Abbildung 60: Punktverteilung des HEM-Datensatzes nach Ausdünnung auf 30 000 Datenpunkte. Für die Ausdünnung wurden die scheinbaren Widerstände für alle fünf gegebenen Messfrequenzen verwendet.

Tabelle 8: Resamplingfehler als absoluter RMSE in allen fünf gegebenen Parametern für Einzel- und Multiparameterausdünnung des Widerstandsdatensatzes im Gebiet der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne. Für die Einzelparameterausdünnung wurde der Parameter $\rho_a^{385 \text{ Hz}}$ verwendet.

Ausdünnung anhand	RMSE				
	$\rho_a^{385 \text{ Hz}}$	$\rho_a^{1.83 \text{ kHz}}$	$\rho_a^{8.6 \text{ kHz}}$	$\rho_a^{41.3 \text{ kHz}}$	$\rho_a^{192.6 \text{ kHz}}$
Einzelparameter $\rho_a^{385 \text{ Hz}}$	$\approx 3.1 \Omega\text{m}$	$\approx 2.6 \Omega\text{m}$	$\approx 3.0 \Omega\text{m}$	$\approx 5.4 \Omega\text{m}$	$\approx 5.7 \Omega\text{m}$
Multiparameter $\rho_a^{385 \text{ Hz}}, \rho_a^{1.83 \text{ kHz}}, \rho_a^{8.6 \text{ kHz}},$ $\rho_a^{41.3 \text{ kHz}}$ und $\rho_a^{192.6 \text{ kHz}}$	$\approx 3.5 \Omega\text{m}$	$\approx 2.5 \Omega\text{m}$	$\approx 2.4 \Omega\text{m}$	$\approx 3.8 \Omega\text{m}$	$\approx 3.8 \Omega\text{m}$

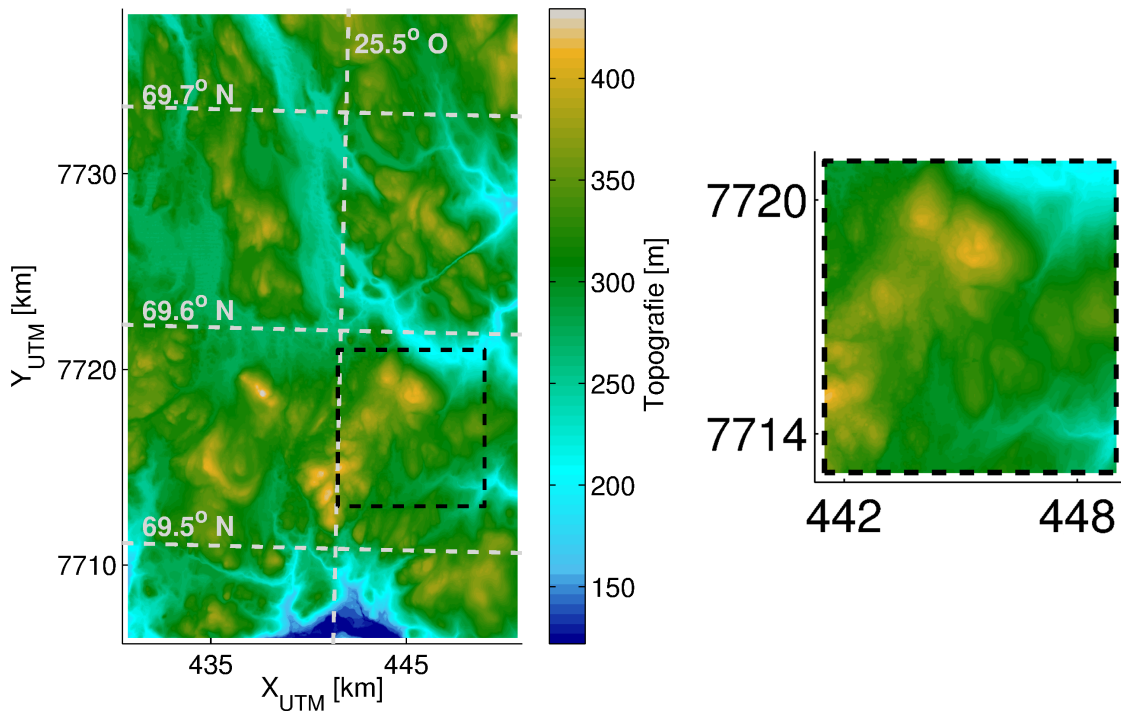


Abbildung 61: Initialer Datensatz (links) und für diese Anwendung verwendetes Beispielgebiet (gestrichelter Kasten, rechts) für die Ausdünnung der Topografie im Gebiet Karasjok, Nord-Norwegen (Mittelpunkt des Gesamtdatensatzes: 25.5° Ost, 69.6° Nord).

A.2 Resampling hoch aufgelöster Topografiedaten für die Korrektur von Schweregradienten (Karasjok, Nord-Norwegen)

In einer weiteren Anwendung des in Abschnitt 4.1 beschriebenen CIDRe Verfahrens sollte überprüft werden, ob sich die daraus resultierenden ausgedünnten Datensätze weiterhin als Grundlage zur Prozessierung von gemessenen Schweregradienten eignen. Die hier beschriebene Anwendung wurde bereits in Menzel (2015) kurz vorgestellt.

Am Beispiel eines Aero-Datensatzes wird gezeigt, wie ein informationserhaltendes Resampling topografischer Daten zur effizienten Korrektur von Schweregradienten genutzt werden kann. Der verwendete Datensatz umfasst ca. 500 000 "full tensor gravity" (FTG)-Messpunkte, zusätzlich liegt die Topografie mit über 30 Millionen Punkten in einem Abstand von $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ vor. Die Topografie basiert auf einer parallel zu den Schweregradientenmessungen durchgeführte Erfassung mittels LIDAR. Die Messungen wurden von *Fugro Airbone Surveys* im Auftrag von *Store Norske Gull AS* und *Norges Geologiske Undersøkelse* durchgeführt und sind in *FUGRO AIRBORNE SURVEYS Pty Ltd* (2011) dokumentiert.

Die vorhandene topografische Korrektur der Schweregradientenmessungen soll durch eine Neuberechnung basierend auf der triangulierten Geometrie der Topografie (Ver-

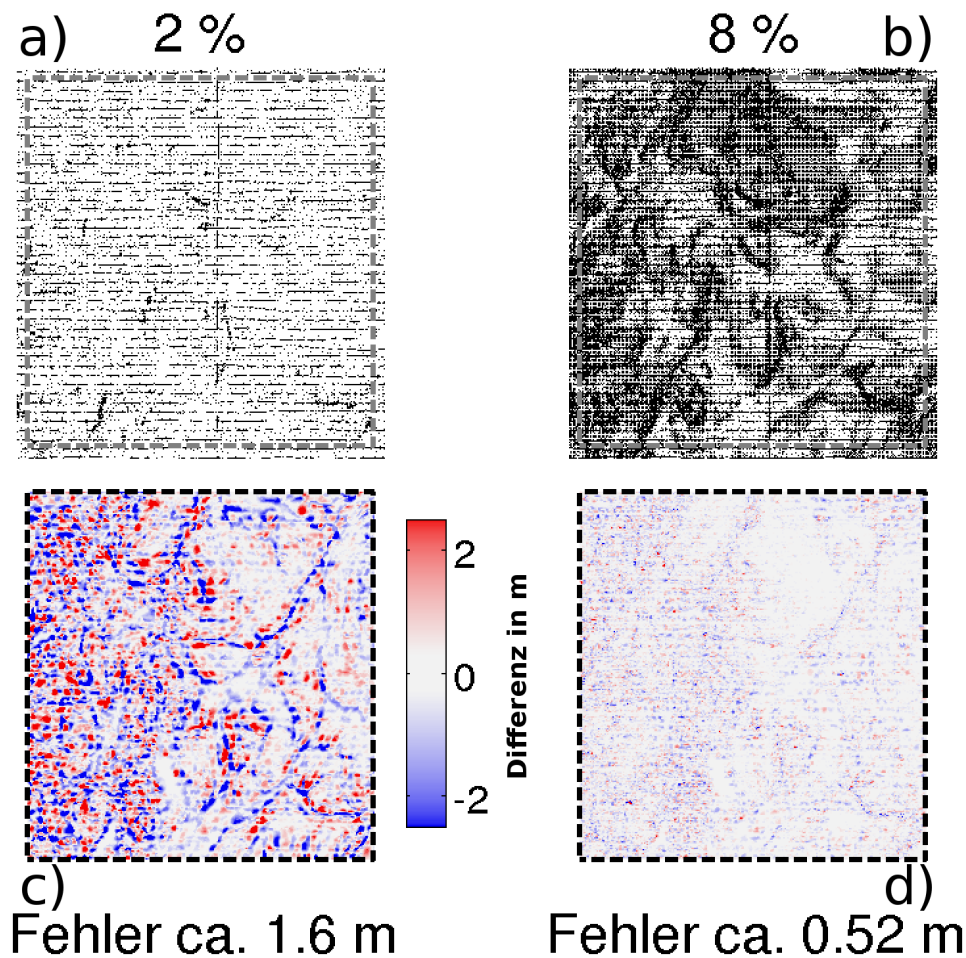


Abbildung 62: Punktverteilung für den mit CIDRe und unter Berücksichtigung externer Punktgewichte ausgedünnten Datensatz mit 2% (a) und 8% (b) der Datenpunkte im Testgebiet (gestrichelter Kasten). In (c) und (d) sind für (a) und (b) die absoluten Abweichungen von der initialen Topografie (Abb. 61, links) dargestellt.

fahren von Götze und Lahmeyer, 1988 verifiziert werden. Dies ist jedoch auf Grund des Datenumfangs sehr aufwendig. Daher sollte geprüft werden, ob für die Korrektur die initiale Auflösung notwendig ist, oder ob auch ein ausgedünnter Datensatz verwendet werden kann. Um dies zu testen, wurde die Topografie durch das in Abschnitt 4.1 beschriebene CIDRe Verfahren ausgedünnt. Danach wurde für ein Beispielgebiet (Abb. 61, gestrichelter Kasten) der topografische Effekt der initialen Topografie und der Ergebnisse der Ausdünnung berechnet und verglichen.

Um den Einfluss der Ausdünnung auf die Berechnung des topografischen Effekts zu minimieren wurde die in Abschnitt 4.1.2 beschriebene Erweiterung des CIDRe-Verfahrens um externe Punktgewichte verwendet. Jedem Topografiepunkt P wurde vor der Ausdünnung ein externes Gewicht $W_{P(ext)} = \frac{1}{d_{min}}$ zugeordnet, d_{min} entspricht dabei der minimalen Distanz dieses Punktes zu den Messpunkten. An den Messpunkten wurde dann der topografische Effekt berechnet. Dafür wurde für die Topografie eine Dichte von 2.67 t/m^3 angenommen. Die externen Gewichte bewirken, dass vor allem Punkte,

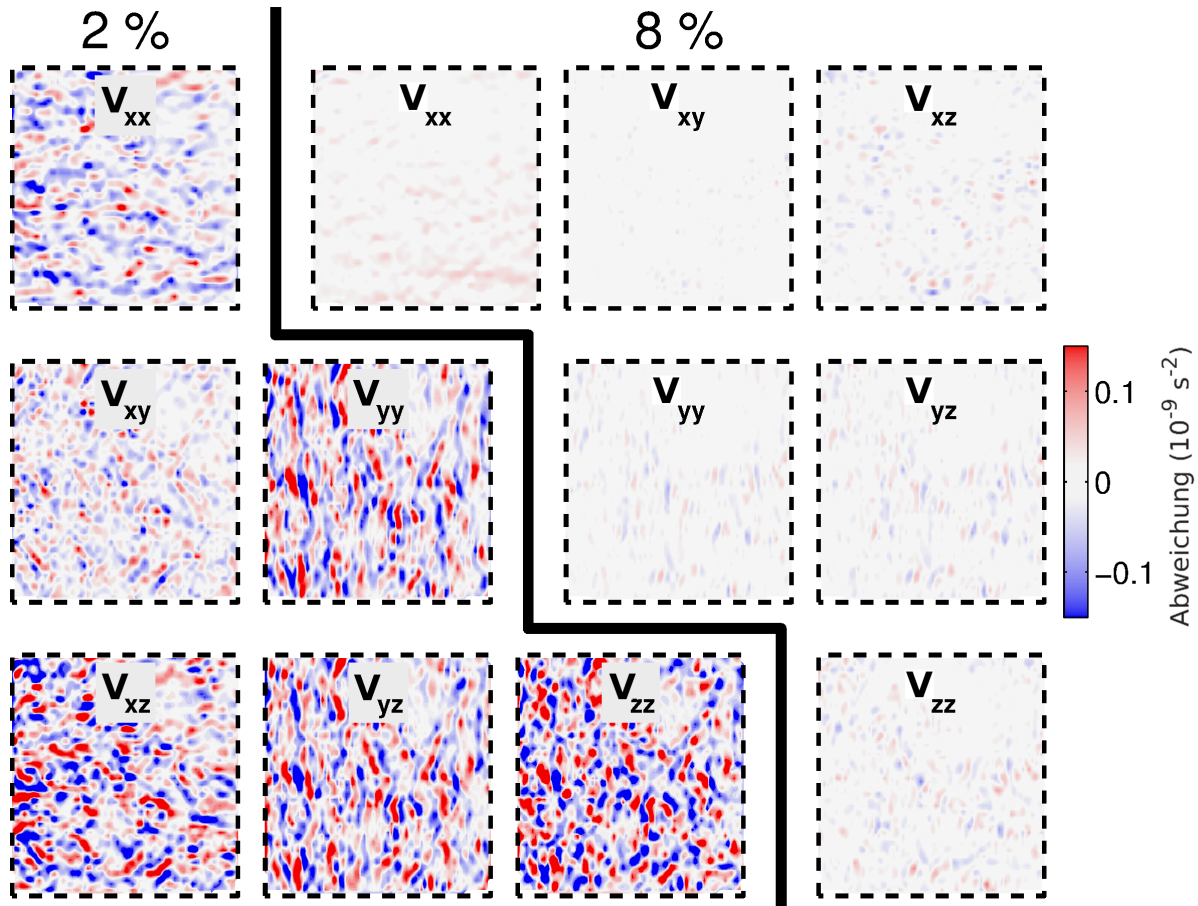


Abbildung 63: Abweichung im FTG-Effekt der ausgedünnten Topografiedatensätze vom Effekt der initialen Topografie.

die sich in einiger Entfernung zu den Stationen befinden, bei der Ausdünnung berücksichtigt werden. Die ausgedünnten Datensätze für zwei verschiedenen Auflösungen sind in Abb. 62 (a und b) dargestellt. Die Fehler (RMSE, Gl. 7) und die Abweichungen von der initialen Topografie sind für beide Ergebnisse in Abb. 62 (c und d) dargestellt. Der Unterschied des berechneten Effekts der initialen und ausgedünnten Topografie in allen Komponenten des Schweregradiententensors ist in Abb. 63 dargestellt. Die maximale Abweichung beträgt dabei $0.2 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ für die ausgedünnte Topografie mit 2% der initialen Punkte und $0.05 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ für die auf 8% ausgedünnte Topografie. Diese Abweichungen sind klein im Vergleich zur Amplitude des vorhandenen topografischen Effekts in den Schweregradientenkomponenten mit $\pm 150 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ (siehe FUGRO AIRBORNE SURVEYS Pty Ltd, 2011). Topografische Daten, welche mittels des CIDResamplings vereinfacht wurden, eignen sich weiterhin als Berechnungsgrundlage für eine topografische Korrektur von Schweregradienten. Sie können darüber hinaus uneingeschränkt auch für weitere rechenintensive Anwendungen, z.B. interaktive 3D Visualisierung, verwendet werden.

B Statistische Abschätzung von Parametermodellen

B.1 Herleitung der linearen Relation für den Spezialfall, dass S und T die gleiche Dichtefunktion aufweisen

Unter der Annahme, dass S und T kontinuierlich verteilt sind und die gleiche Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion aufweisen, lässt sich eine lineare Relation $s_i \rightarrow t_i$ bestimmen. Um dies zu demonstrieren wird angenommen, dass beide Parameter normalverteilt mit $\mathcal{N}(S, \mu_S, \sigma_S)$ und $\mathcal{N}(T, \mu_T, \sigma_T)$ sind, aber unterschiedliche Formfaktoren aufweisen. Zusätzlich wird eine Diskretisierung $\epsilon\sigma$ mit $\epsilon \ll 1$ für beide Verteilungen gewählt. Nach Gleichung 16 kann die Auftrittswahrscheinlichkeit für einen Wert X innerhalb eines Intervalls $X - 0.5\epsilon\sigma \leq X \leq X + 0.5\epsilon\sigma$ über der Fläche unter diesem Intervall der Dichtefunktion mit

$$\phi(X) = \int_{X-0.5\epsilon\sigma}^{X+0.5\epsilon\sigma} \mathcal{N}(x, \mu, \sigma) dx$$

bestimmt und über die Fläche eines Rechtecks

$$\phi(X) = \epsilon\sigma \mathcal{N}(X, \mu, \sigma)$$

abgeschätzt werden. Da die Umkehrfunktion von \mathcal{N} über

$\mathcal{N}^{-1}(\phi, \mu, \sigma) = \mu + \sigma \sqrt{-2 \ln(\sigma \phi \sqrt{2\pi})}$ definiert ist, kann ein t_i aus einem s_i durch

$$\begin{aligned} \phi(t_i) &= \phi(s_i) \\ \epsilon\sigma_T \mathcal{N}(t_i, \mu_T, \sigma_T) &= \epsilon\sigma_S \mathcal{N}(s_i, \mu_S, \sigma_S) \\ t_i &= \mathcal{N}^{-1}\left(\frac{\sigma_S}{\sigma_T} \mathcal{N}(s_i, \mu_S, \sigma_S), \mu_T, \sigma_T\right) \\ t_i &= \mu_T + \sigma_T \sqrt{-2 \ln\left(\frac{\sigma_S}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} \frac{\sigma_S}{\sigma_S \sqrt{2\pi} \sigma_T} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{s_i - \mu_S}{\sigma_S}\right)^2}\right)} \\ t_i &= \mu_T + \sigma_T \sqrt{\left(\frac{s_i - \mu_S}{\sigma_S}\right)^2} \\ t_i &= \mu_T \pm \frac{\sigma_T}{\sigma_S} (s_i - \mu_S) \end{aligned}$$

abgeleitet werden. Um die auftretende Mehrdeutigkeit aufzulösen, muss ein Korrelationsfaktor c bestimmt werden. Dies führt dann zu der linearen Relation in Gl. 23, welche bereits in Abschnitt 5.1.1 vorgestellt wurde:

$$t_i = \mu_T + c \frac{\sigma_T}{\sigma_S} (s_i - \mu_S)$$

Für $c = 0$ sind S und T unkorreliert. In diesem Fall wird jedem t_i der Wert von μ_T für alle Werte s_i zugeordnet und man erhält eine konstante Zuordnung $s_i \rightarrow \mu_T$.

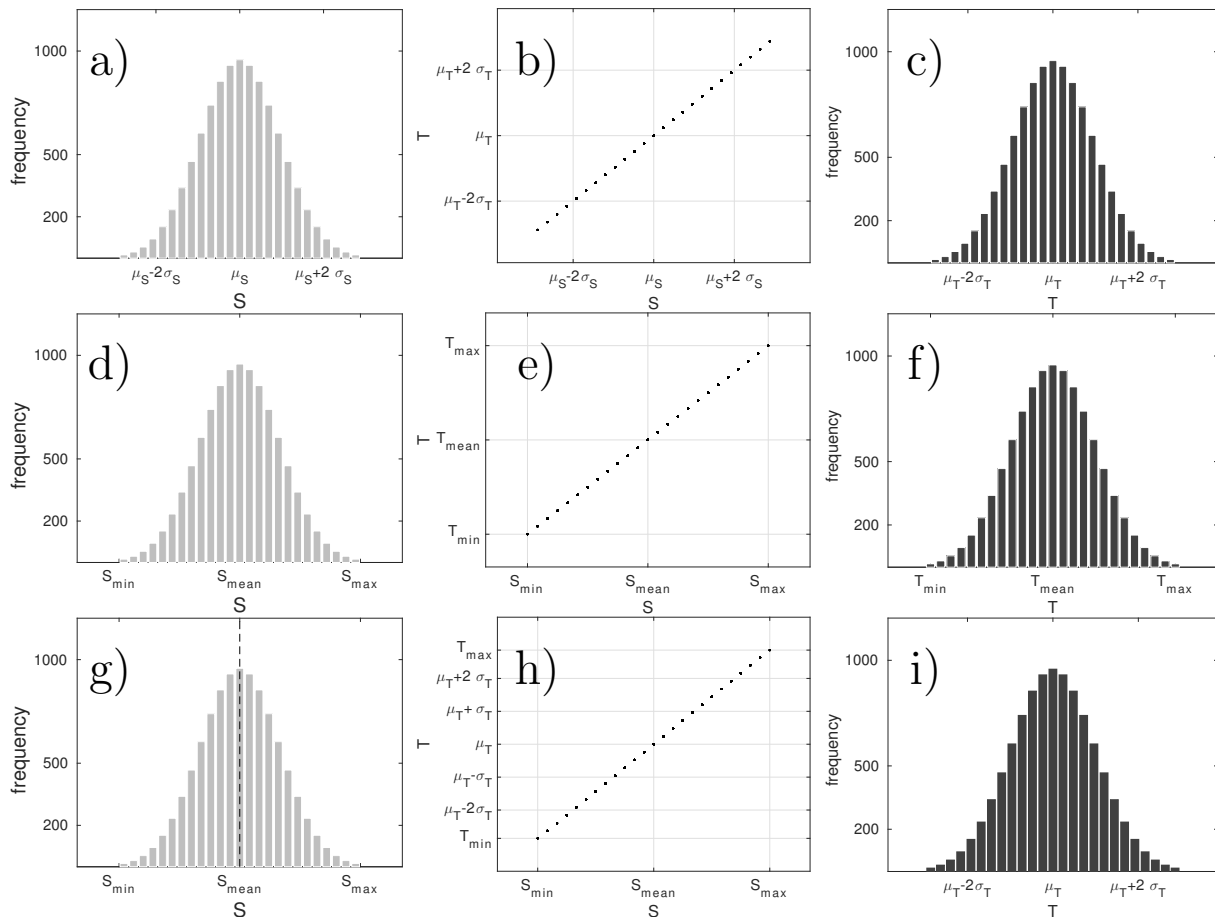


Abbildung 64: Parameterübertragung anhand eines synthetischen Beispiels mit 10 000 perfekt normalverteilten Werten. a, d und g zeigen die Häufigkeitsverteilung von S , in c, f und i ist die sich ergebende Verteilung für T dargestellt. In b, e und h wird die Zuordnung von S nach T dargestellt. a, b, c) Übertragung über eine kontinuierliche Relation; d, e, f) Übertragung über diskrete Parameterintervalle; g, h, i) Übertragung über relative Häufigkeiten. T wird als normalverteilt mit μ_T und σ_T angenommen.

B.2 Weitere synthetische Beispiele

Perfekt normalverteiltes S

Für einen perfekt normalverteilten Parameter S ist die Ergebnisverteilung T für die drei in Abschnitt B.2 beschriebenen Ansätze identisch zu S (Abb. 64). Wie in Abb. 64 (b, e, h) zu sehen ist, besteht hier zwischen S und T immer eine perfekt lineare Beziehung.

Annähernd gleichverteiltes S

Für einen annähernd gleichverteilten Parameter S ist die erhaltene Zielverteilung T über den kontinuierlichen und den diskreten Ansatz wie zu erwarten sehr ähnlich zu S (Abb. 65 a,b c und Abb. 65 d, e, f). Für die Anwendung des Ansatzes, welcher die relativen Häufigkeiten verwendet, wurden die Häufigkeiten von S mit einem Maximalwert $d_S^I \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}}$ normalisiert. Dieser Wert entspricht der maximalen Auftrittswahrscheinlich-

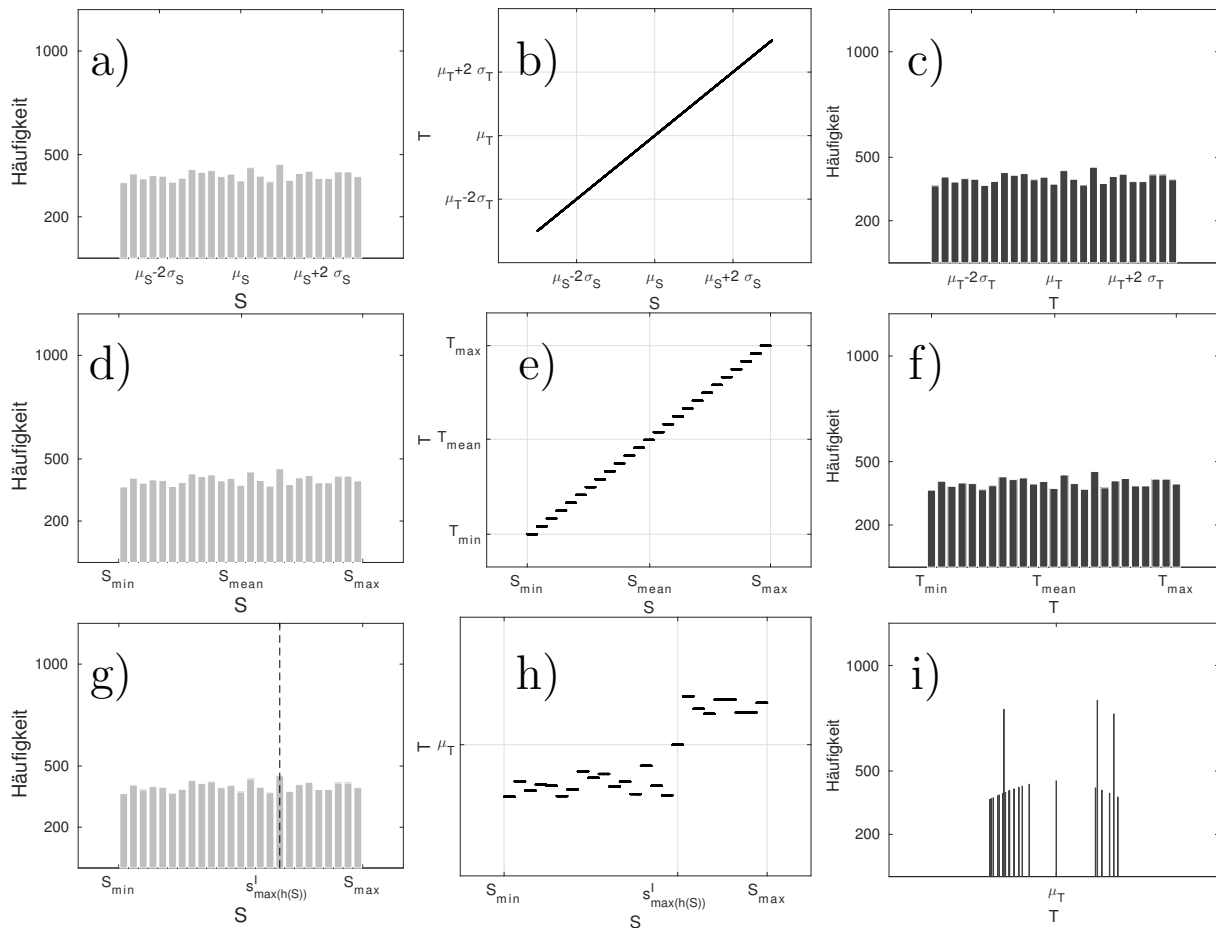


Abbildung 65: Parameterübertragung anhand eines synthetischen Beispiel mit 10 000 gleichverteilten Zufallswerten. (a, d, g) zeigen die Häufigkeitsverteilung von S , in (c, f, i) ist die sich ergebende Verteilung für T dargestellt. In (b, e, h) wird die Zuordnung von S nach T dargestellt. (a, b, c) Übertragung über eine kontinuierliche Relation; (d, e, f) Übertragung über diskrete Parameterintervalle; (g, h, i) Übertragung über relative Häufigkeiten. T wird als normalverteilt mit μ_T und σ_T angenommen.

keit in einem normalverteilten T . Aus diesem Grund werden die Werte aus S , die die höchsten relativen Häufigkeiten aufweisen einem Wert $t^I = \mu_T$ zugeordnet. Die Zielverteilung T unterscheidet sich sehr stark von S , die Beziehung zwischen den beiden Verteilungen ist stark nicht-linear (Abb. 65, g, h, i).

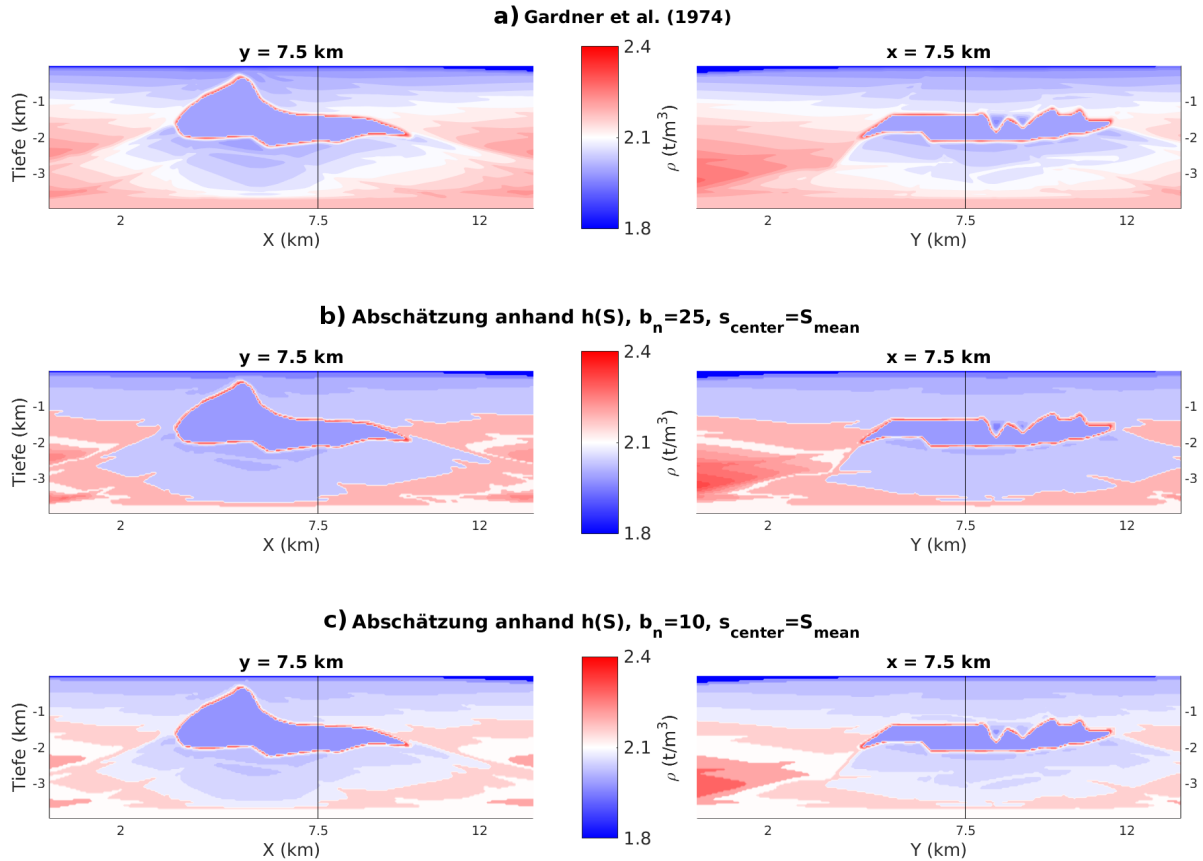


Abbildung 66: Resultierende Dichteverteilung für eine Abschätzung anhand der relativen Häufigkeiten mit $b_n = 25$ (b) und $b_n = 10$ (c). Für b und c wurde $s_{center} = S_{mean}$ angenommen. Beide abgeschätzten Verteilungen (b und c) sind aufgrund der Wechselagen zwischen hohen und niedrigen Dichten nicht plausibel. Die berechneten Dichteverteilungen sind jeweils auf den beiden Profilschnitten $y = 7.5$ km (links) und $x = 7.5$ km (rechts) aus Abb. 43 dargestellt.

B.3 Ergänzungen zur Abschätzung von Dichten aus seismischen Geschwindigkeiten

In Abb. 66 und Abb. 67 sind die weiteren Ergebnisse der Abschätzung der Dichteverteilung aus der in Abschnitt 5.2 Geschwindigkeitsverteilung dargestellt. Als Referenz ist die Dichteverteilung nach Gardner et al. (1974) in beiden Abbildungen in der oberen Teilabbildung (a) dargestellt. Abb. 66 zeigt das Ergebnis der Abschätzung über die relativen Häufigkeiten $h(S)$ mit $b_n = 25$ (b) und $b_n = 10$ (c). s_{center} wird über das arithmetische Mittel von S bestimmt. Die verwendeten Beziehungen zwischen v_p und ρ sind die grünen Kurven in der linken Teilabbildung von Abb. 46 (Abschnitt 5.2). Abb. 67 zeigt das Ergebnis der Abschätzung über die relativen Häufigkeiten $h(S)$ mit $b_n = 25$ (b) und $b_n = 10$ (c). s_{center} wird in diesem Fall über die maximale relative Häufigkeit mit $s_{center} = S_{max}^I(h(S))$ bestimmt. Die verwendeten Beziehungen zwischen v_p und ρ sind die roten Kurven in der linken Teilabbildung von Abb. 46 (Abschnitt 5.2). Die Verteilungen,

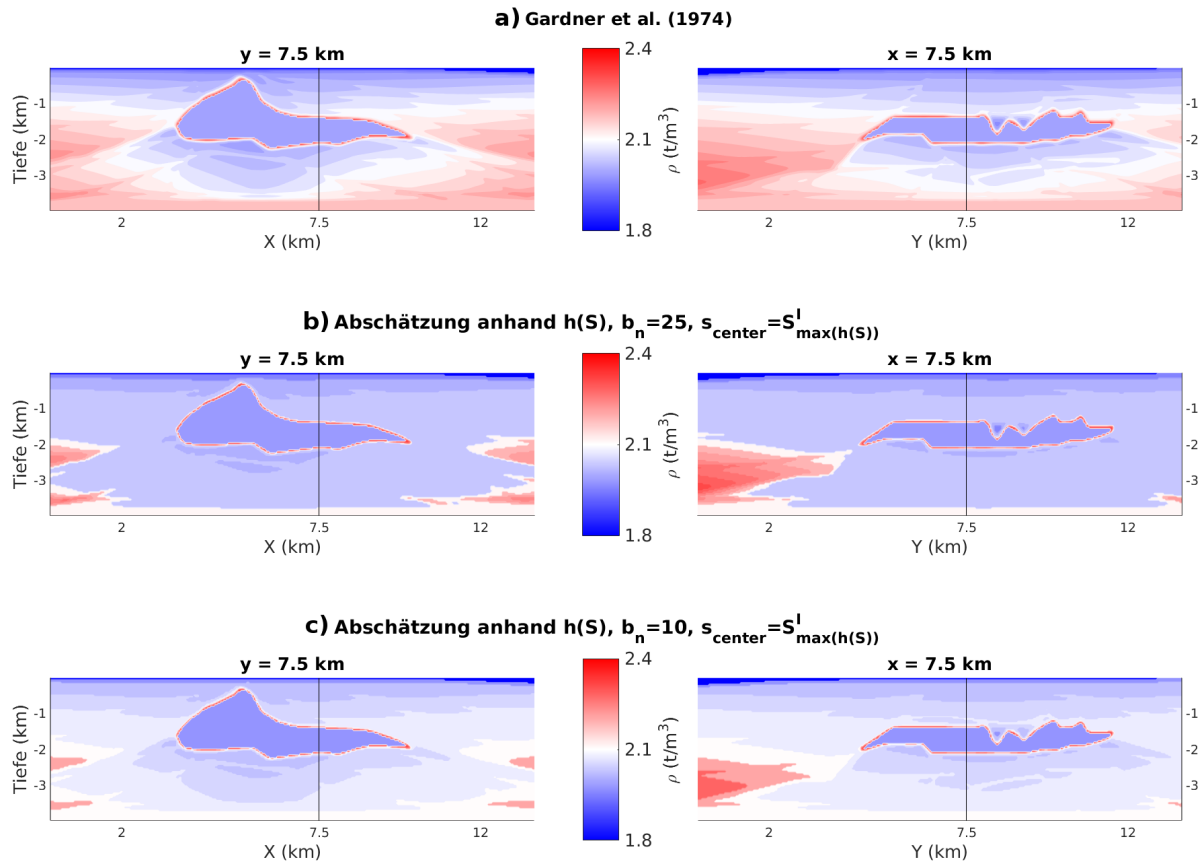


Abbildung 67: Resultierende Dichteverteilung für eine Abschätzung anhand der relativen Häufigkeiten mit $b_n = 25$ (b) und $b_n = 10$ (c). Für b und c wurde hier $s_{center} = S^I_{\max(h(S))}$ angenommen. Da für $b_n = 25$ (b) viel zu niedrige Dichtewerte abgeschätzt werden, ist hier nur das Ergebnis für $b_n = 10$ (c) plausibel. Die berechneten Dichteverteilungen sind jeweils auf den beiden Profilschnitten $y = 7.5$ km (links) und $x = 7.5$ km (rechts) aus Abb. 43 dargestellt.

welche mittels des Parameters $b_n = 25$ erzeugt wurden, erscheinen nicht plausibel, da gerade mittlere Dichten im Vergleich zu den Gardner-Dichten stark unterschätzt werden (Abb. 66 b und Abb. 67 b). Ebenso sind es die Ergebnisse aus der Verwendung von $s_{center} = S_{mean}$, da Wechsellagen zwischen höheren und niedrigen Dichten abgeschätzt werden, die in der Geschwindigkeitsverteilung nicht auftreten (Abb. 43 b und c, Abschnitt 5.2). Die Parameterkombination aus $b_n = 10$ und $s_{center} = S^I_{\max(h(S))}$ (siehe Abb. 67 c) liefert ein plausibles Ergebnis, aber auch in diesem Fall werden gerade die sehr häufig auftretenden mittleren Geschwindigkeiten durch zu niedrige Dichten abgeschätzt. Die ausführliche Auswertung der Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 5.2.

C Verzeichnis über den dieser Arbeit beiliegenden Code

Im Rahmen dieser Dissertation wurden sehr viele verschiedenen Verfahren und Algorithmen in Matlab implementiert. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde aber darauf verzichtet, diesen Code in den Text dieser Arbeit zu integrieren. Eine Auswahl der für diese Dissertation entscheidenden *Scripte*, *Funktionen*, *Klassen* und *Anwendungen* liegen dieser Arbeit digital bei. Im der folgenden Tab. 9 werden diese Dateien aufgelistet und kurz beschrieben. Sie werden in verschiedene Gruppen eingeteilt. *Klassen* sind objekt-orientiert Strukturen mit eigenen Eigenschaften und Funktionen. *Funktionen* sind einfache, in Matlab aufrufbare Methoden, wohingegen *Scripte* meist eine spezielle Anwendung oder einen Workflow beschreiben und abarbeiten. Sie rufen ihrerseits meist Funktionen auf. *Anwendungen* sind ein eigener Typ von Skripten, welche unter anderem eine GUI (*grafical user interface*) verwenden und zudem als alleinlauffähige ausführbare Programme kompiliert werden können.

Tabelle 9: Verzeichnis des dieser Arbeit beiliegenden Matlab-Codes.

Dateiname	Beschreibung
GUI_CIDRE.m	Stabile Version der Anwendersoftware GUI_CIDRe, enthält das in dieser Arbeit entwickelte CIDRe-Verfahren (Anwendung)
GUI_CIDREV2.m	Überarbeitete und erweiterte Version der Anwendersoftware GUI_CIDRe (Anwendung)
Demo_LOD2.m	Demonstrationstool für Level-of-Detail für IGMAS-Modelle (Anwendung)
IGMASModel.m	Schnittstelle zum Import/Export von IGMAS+ Modellinformationen nach Matlab (Klasse), ermöglicht algorithmischen Zugriff auf alle Modellbestandteile
calcGravity.m	Berechnung der Schwerekomponenten und -gradienten für ein gegebenes Dreieck und Berechnungsstationen nach Götze (1976) (Funktion)
function_computeClosedTriHull.m	Automatische Erstellung einer geschlossenen Hülle aus einer triangulierten Fläche (Funktion)
function_computeTriPolyhedronVolumeOpt.m	Berechnung des Volumens eines triangulierten Polyeders (Funktion)
function_getBorderingPoylgons.m	Bestimmung der inneren und äußeren Grenzpolygone einer triangulierten Fläche (Funktion)
function_getMeshGravity.m	Anwendung von calcGravity.m auf ein trianguliertes Modell (Funktion)
function_GriddedResampling.m	Regelmäßige Ausdünnung verteilter Punktdaten (Funktion)
function_interpolateDataOnGrid.m	Interpolation auf regelmäßiges Gitter (Funktion)
function_meshSimplificationV2.m	Vereinfachung eines Dreiecksgitters über "CollapsePolyhedron"(Funktion)
function_TriangulateFlatPolygon.m	Triangulation eines ebenen 3D Polygons (Funktion)
function_testLODbyQEM.m	Vereinfachung eines Dreiecksgitters über "Quadric Error Metric" (Funktion)
function_TriFaceOverlap.m	Intersektion zweier Dreiecksvermaschungen (eigener Ansatz und Möller, 1997, Funktion)
function_TriFaceOverlapV2.m	Intersektion zweier Dreiecksvermaschungen nach Tropp et al. (2006) (Funktion)
LoadTSurf.m	Laden eines TSurf-Objekts (Funktion)
LoadTSurfV200.m	Laden und Analyse mehrerer TSurf-Objekte (Funktion)
LoadVTKGrid.m	Laden eines VTK-Objekts (Rechteck- oder Dreiecksgitter, Funktion)
WriteTSurfV2.m	Export eines oder mehrerer TSurf-Objekte (Funktion)
divideOBJMesh.m	Aufteilen einer geschlossenen triangulierten Hülle in zwei separate geschlossene Hüllen (Script)

Abbildungsverzeichnis

1	Das "AIDA-Projekt-Wiki" als Beispiel für eine "Web 2.0"-basierte Kommunikationsplattform.	19
2	Datenpräsentation im Projekt CO ₂ -MoPa.	20
3	Verteiltes System für den Austausch heterogener Daten im Projekt CO ₂ -MoPa.	22
4	Verbundprojekt AIDA: Projektpartner und Untersuchungsgebiete	25
5	Kommunikations-Netzwerk im Verbundprojekt AIDA	26
6	Datenaustauschnittstellen für das Verbundprojekt AIDA.	28
7	Geometrische Größen für die Berechnung des Potentielfeldefekt eines Polyeders.	36
8	Modellaufbau und Modellelemente in IGMAS / IGMAS+.	37
9	Grenzen in einer nicht-konsistent geschlossenen Triangulation.	39
10	Korrektur von Inkonsistenzen für geschlossene triangulierte Körper. . . .	41
11	Gemessene und berechnete Schwerenomalie für das KTB Dichtemodell vor der Überarbeitung	45
12	KTB Modell - Sektion 18, initiale Polygeometrie und Dichten.	46
13	KTB Modell - Sektion 18, Anpassung der Dichtewerte.	47
14	Gemessene und berechnete Schwereanomalie für das KTB Dichtemodell nach der Überarbeitung.	48
15	KTB Modell - Sektion 18, Überarbeitete Geometrie der Polygone mit der zugehörigen Sektion aus der 3D Seismik.	49
16	Lage des Modellgebiets für die Bremerhaven-Cuxhavener Rinne und der vorhandenen Schweremesskampagnen.	51
17	Modellgeometrie und Dichteinheiten des Modells der subglazialen Rinne.	53
18	Schweredaten und Schwerefelddefekt des Modells der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne (I).	55
19	Schweredaten und Schwerefelddefekt des Modells der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne (II).	56
20	Ablaufschema für das CIDRe-Verfahren.	66
21	Ausgangsdatensatz zur Validierung des CIDRe-Verfahrens.	70
22	Testdatensatz zur Validierung des CIDRe-Verfahrens.	70
23	Ergebnis der Validierung des CIDRe-Verfahrens	72
24	Resamplingergebnis für den synthetischen Datensatz mit 7 % der initialen Datenpunkte	73
25	Marines Schwerfeld vor der chilenischen Pazifikküste	75
26	Validierung der Datenreduktion für den marinen Schweredatesatz in Abb. 25	76

27	Ergebnis der Datenreduktion für den marinen Schweredatesatz in Abb. 25 mit 8% der initialen Datenpunkte	77
28	Abweichung des Berechnungsergebnisses für das niedrig aufgelöste Schwerfeld (Abb. 27) vom initialen Berechnungsergebnis des marinen Schweredatesatzes aus Abb. 25	78
29	Datensatz für die Validierung der CIDRe-Erweiterung auf den Einsatz auf mehrere Datenparameter	81
30	Fehlerentwicklung CIDRe für mehrere Datenparameter.	82
31	Resamplingergebnis CIDRe für mehrere Datenparameter.	83
32	Ausgangssituation einer Triangulation vor dem Entfernen eines Punktes P_i	87
33	“Edge contraction” der Kante $e(id_i, id_{jI})$	89
34	Schematische Darstellung eines idealen Vereinfachungs-Polyeders.	89
35	Evaluierung der verwendeten Vereinfachungsverfahren anhand einer triangulierten Kugelgeometrie.	91
36	Vergleich Vereinfachung ohne und mit Berücksichtigung der Stationspositionen.	92
37	Geometriemodell und Messstationen des Salzstocks im Gifhorner Trog.	94
38	Abweichung im Schwereeffekt durch die Vereinfachung des Geometriemodells der Salzstöcke im Gifhorner Trog.	95
39	Vergleich der durch die Vereinfachung verursachten Fehler für das Geometriemodell der beiden Salzstöcke im Gifhorner Trog.	96
40	Vereinfachtes Modell der Salzstöcke im Gifhorner Trog.	97
41	Parameterübertragung anhand eines normalverteilten synthetischen Beispiels.	107
42	Schematische Darstellung einer klassifizierten Parameterübertragung mit mehreren Stoffklassen.	109
43	Synthetisches Geschwindigkeitsmodell eines Salzstocks.	110
44	Häufigkeitsverteilung der verwendeten Geschwindigkeitswerte und der aus Gardner et al. (1974) berechneten Dichtewerte.	111
45	Abgeschätzte Dichteverteilungen für das SEG/EAGE Salz Modell (I)	112
46	Abhängigkeiten zwischen Geschwindigkeiten und abgeschätzten Dichten.	113
47	Vergleich des berechneten vertikalen Schwereeffekts für die abgeschätzten Dichteverteilungen.	116
48	Vergleich des berechneten Effekts für den vertikalen Schweregradienten der abgeschätzten Dichteverteilungen.	117
49	Widerstandsdaten für das Modellgebiet Bremerhaven-Cuxhavener Rinne.	119
50	Abgeschätzte Dichteverteilungen für “Profil Wanhöden” und “Profil Krepel” und deren berechneter Schwereeffekt.	121

51	Abgeschätzte Dichteverteilung für den Datensatz "2D Wanhöden" und deren berechneter Schwereffekt.	122
52	Schematische Darstellung des 3D-Druck Workflows.	126
53	3D-Drucker "Ultimaker 2".	127
54	Drucker-Software "Cura".	127
55	Druckergebnis für ein einfaches Salzstockmodell.	128
56	Druckergebnis für ein mehrteiliges Untergrundmodell.	129
57	Umwandlung des 2D Schwerefelds von Schleswig-Holstein in eine druckbare Geometrie.	130
58	Anhang A: Reduktionsergebnis für den HEM-Datensatz.	138
59	Anhang A: Verteilung der scheinbaren Widerstände für alle 5 Messfrequenzen.	139
60	Anhang A: Punktverteilung des HEM-Datensatzes nach CIDRe Ausdünnung anhand von 5 Parametern.	140
61	Anhang A: Topografie im Gebiet Karasjok, Nord-Norwegen.	141
62	Anhang A: Punktverteilung und Resamplingfehler für die Topografie im Beispielgebiet Karasjok.	142
63	Anhang A: Abweichung im FTG-Effekt der ausgedünnten Topografie von dem der initialen Topografie.	143
64	Anhang B: Parameterübertragung anhand eines perfekt normalverteilten synthetischen Beispiels.	145
65	Anhang B: Parameterübertragung anhand eines gleichverteilten synthetischen Beispiels.	146
66	Anhang B: Abgeschätzte Dichteverteilungen für das SEG/EAGE Salz Modell (II).	147
67	Anhang B: Abgeschätzte Dichteverteilungen für das SEG/EAGE Salz Modell (III).	148

Tabellenverzeichnis

1	Nutzer und ihre Beiträge zum "AIDA-Projekt-Wiki"	29
2	Mögliche Dichteverteilung für das Untergrundmodell der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne.	54
3	Schweredaten für das Untersuchungsgebiet.	54
4	Einfluss der Reduktion des Datenumfangs auf die Berechnungszeit	79
5	Vergleich der verschiedenen Ansätze zur "Mesh-Simplification".	86
6	Parametrisierung für die Dichteabschätzung für die Breemrhaven-Cuxhavener Rinne.	120

7	Vergleich der Korrelation der berechneten Schwerewirkung mit dem gegebenen Residualfeld für die verschiedenen Dichtemodelle.	123
8	Anhang A: Resamplingfehler für Einzel- und Multiparameterausdünnung des Widerstandsdatensatzes im Gebiet der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne.	140
9	Anhang C: Verzeichnis des dieser Arbeit beiliegenden Codes.	150

Literatur

- AIDA. Aida - from airborne data inversion to in-depth analysis (2016). BGR Hannover. URL <http://www.geotechnologien-aida.de>
- M. R. Alvers. *Zur Anwendung von Optimierungsstrategien auf Potentialfeldmodelle*. Dissertation, Freie Universität Berlin (1998).
- M. R. Alvers, H.-J. Götze, L. Barrio-Alver, S. Schmidt, B. Lahmeyer und C. Plonka. A novel warped-space concept for interactive 3D-geometry-inversion to improve seismic imaging. *First Break*, 32(4):61–67 (2014).
- M. R. Alvers, H.-J. Götze, B. Lahmeyer, C. Plonka und S. Schmidt. Advances in 3D Potential Field Modeling. In *75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013*. European Association of Geoscientists and Engineers (2013). doi: 10.3997/2214-4609.20130125.
- O. B. Andersen und P. Knudsen. Global marine gravity field from the ERS-1 and Geosat geodetic mission altimetry. *J. Geophys. Res.: Oceans (1978-2012)*, 103(C4):8129–8137 (1998). doi:10.1029/97JC02198.
- R. Baldschuhn, F. Binot, S. Fleig und F. Kockel. *Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor*. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany (2001). ISBN 9783510958818.
- K. M. Barry, D. A. Cavers und C. W. Kneale. Recommended standarts for digital tape formats. *GEOPHYSICS*, 20(2):344–352 (1975).
- S. Bauer, H. Class, M. Ebert, V. Feeser, H. Götze, A. Holzheid, O. Kolditz, S. Rosenbaum, W. Rabbel, D. Schäfer und A. Dahmke. Modeling, parameterization and evaluation of monitoring methods for co2 storage in deep saline formations: the co2-mopa project. *Environmental Earth Sciences*, 67(2):351–367 (2012). ISSN 1866-6299. doi:10.1007/s12665-012-1707-y.
URL <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-012-1707-y>

- U. Casten, H.-J. Götze, S. Plaumann und H. C. Soffel. Gravity anomalies in the KTB area and their structural interpretation with special regard to the granites of the northern Oberpfalz (Germany). *Geologische Rundschau*, 86(1):S79–S86 (1997). ISSN 0016-7835. doi:10.1007/PL00014667.
URL <http://dx.doi.org/10.1007/PL00014667>
- T. Damm und H.-J. Götze. Modern Geodata Management: Application of Interdisciplinary Interpretation and Visualization in Central America. *International Journal of Geophysics*, 2009 (2009). doi:10.1155/2009/878324. Article ID 878324.
- I. Daubechies, I. Guskov, P. Schröder und W. Sweldens. Wavelets on Irregular Point Sets. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 357(1760):2397–2413 (1999).
- P. C. Elsner. *3D-Drucktechnologie – Grundlagen zur Herstellung polymerer Bauteile mit gradierten Werkstoffeigenschaften*. Dissertation, Technischen Universität Berlin (2009).
- R. Emmermann und H. Rischmüller. Das Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland (KTB). *Die Geowissenschaften*, 8(9):241–258 (1990).
- M. Franc und V. Skala. Fast Algorithm for Triangular Mesh Simplification Based on Vertex Decimation. *ICCS '02 Proceedings of the International Conference on Computational Science-Part II*, 15(3):42–51 (2002).
- FUGRO AIRBORNE SURVEYS Pty Ltd. Alta, Norway FALCON™ Airborne Gravity Gradiometer Survey - Processing Report. Technischer Bericht, FUGRO with Store Norske Gull AS and Norges Geologiske Undersøkelse (2011).
- G. Gabriel. Gravity investigation of buried Pleistocene subglacial valleys. *Near Surface Geophysics*, 4(5):321–332 (2006).
- G. Gabriel, R. Kirsch, B. Siemon und H. Wiederhold. Geophysical investigation of buried Pleistocene subglacial valleys in Northern Germany. *Journal of Applied Geophysics*, 53:159–180 (2003).
- G. H. F. Gardner, L. W. Gardner und A. R. Gregory. Formation velocity and density - the diagnostic basics for stratigraphic traps. *GEOPHYSICS*, 39(6):770–780 (1974). doi:10.1190/1.1440465.
URL <http://dx.doi.org/10.1190/1.1440465>
- M. Garland und P. S. Heckbert. Surface Simplification Using Quadric Error Metrics. *SIGGRAPH '97 Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, S. 209–216 (1997).

LITERATUR

- C. Godsil und G. Royle. *Algebraic Graph Theory*. Graduate Texts in Mathematics. Springer New York (2001). ISBN 9780387952413.
URL <http://www.springer.com/book/978-0-387-95241-3>
- R. N. Goldman. IV.1 - AREA OF PLANAR POLYGONS AND VOLUME OF POLYHEDRA. In *Graphics Gems II* (herausgegeben von J. ARVO), S. 170 – 171. Morgan Kaufmann, San Diego (1991). ISBN 978-0-08-050754-5. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-050754-5.50043-8>.
- H.-J. Götze. *Ein numerisches Verfahren zur Berechnung der gravimetrischen und magnetischen Feldgrößen für dreidimensionale Modelle*. Dissertation, Technische Universität Clausthal (1976).
- H.-J. Götze. *Über den Einsatz von interaktiver Computergrafik im Rahmen 3-dimensionaler Interpretationstechniken in Gravimetrie und Magnetik*. Habilitation, Technische Universität Clausthal (1984).
- H.-J. Götze, M. Afanasjew, M. Alvers, L. Barrio-Alvers, R.-U. Börner, C. Brandes, R. Eröss, P. Menzel, U. Meyer, M. Scheunert, B. Siemon, K. Spitzer, D. Steinmetz, J. Stoll, G. Sudha, B. Tezkan, A. Ullmann und J. Winsemann. Towards an integrative inversion and interpretation of airborne and terrestrial data. In *Tomography of the Earths Crust: From Geophysical Sounding to Real-Time Monitoring* (herausgegeben von M. Weber und U. Münch), Advanced Technologies in Earth Sciences, S. 21–41. Springer International Publishing (2014). ISBN 978-3-319-04204-6. doi:10.1007/978-3-319-04205-3_2.
URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-04205-3_2
- H.-J. Götze und B. Lahmeyer. Application of three-dimensional interactive modeling in gravity and magnetics. *Geophysics*, 53(8):1096–1108 (1988). doi:10.1190/1.1442546.
- H.-J. Götze, D. Merthmann, U. Riller und J. Arndt. *Einführung in die Geowissenschaften*, Kapitel Geoinformatik, S. 192–210. Eugen Ulmer KG, Stuttgart (2015a). 2. Auflage.
- H.-J. Götze, D. Merthmann, U. Riller und J. Arndt. *Einführung in die Geowissenschaften*, Kapitel Einführung und Überblick, S. 13–26. Eugen Ulmer KG, Stuttgart (2015b). 2. Auflage.
- H.-J. Götze, S. Schmidt und P. Menzel. Neue Möglichkeiten interaktiver 3-dimensionaler Modellierungen von Potentialfeldern und ihrer Ableitungen. In *DGMK Tagungsbericht 2015-1, Autorenmanuskripte, DGMK/ÖGEW-Frühjahrstagung 2015, Celle, Germany*, S. 329 – 338. DGMK Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. (2015c). ISBN 978-3-941721-55-2.

- H.-J. Götze, S. Schmidt, P. Menzel und Konsortium des DGMK-Projektes 771 "Ti-POT3D". Hybride 3D Modellierungen im Gifhorner Trog für die Kombination von über- und Untertage-Gravimetrie. In *DGMK-Tagungsbericht 2016-1, DGMK/ÖGEW-Frühjahrstagung 2016, Fachbereich Aufsuchung und Gewinnung, Celle, Germany*, S. 97 – 103. DGMK Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. (2016). ISBN 978-3-941721-64-7.
- H.-J. Götze, M. Schröder, B. Siemon, R.-U. Börner, B. Tezkan und J. Winsemann. Aida - From Airborne Data Inversion to In-Depth Analysis. In *GEOTECHNOLOGIEN Science Report No. 18: Tomography of the Earths Crust: From Geophysical Sounding to Real-Time Monitoring* (herausgegeben von U. Münch), S. 83–96 (2011).
- B. C. Gross, J. L. Erkal, S. Y. Lockwood, C. Chen und D. M. Spence. Evaluation of 3d printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences. *Analytical Chemistry*, 86(7):3240–3253 (2014). doi:10.1021/ac403397r. PMID: 24432804. URL <http://dx.doi.org/10.1021/ac403397r>
- B. Gutknecht, H.-J. Götze, T. Jahr, G. Jentzsch, R. Mahatsente und S. Zeumann. Structure and State of Stress of the Chilean Subduction Zone from Terrestrial and Satellite-Derived Gravity and Gravity Gradient Data. *Surveys in Geophysics*, 35(6):1417–1440 (2014). ISSN 0169-3298. doi:10.1007/s10712-014-9296-9. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10712-014-9296-9>
- A. Guttman. R-trees: A Dynamic Index Structure for Spatial Searching. *SIGMOD Rec.*, 14(2):47–57 (1984). ISSN 0163-5808. doi:10.1145/971697.602266. URL <http://doi.acm.org/10.1145/971697.602266>
- F. Heese. *3D Modellierungen und Visualisierung von Untergrundstrukturen für die Nutzung des unterirdischen Raumes in Schleswig-Holstein*. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität Kiel (2012).
- I. Heyde. *Integrierte Interpretation gravimetrischer und magnetischer Daten am Beispiel KTB*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum (1999).
- I. T. Jolliffe. *Principal Component Analysis*. Springer Series in Statistics. Springer New York (2002).
- T. Kanungo, D. M. Mount, N. S. Netanyahu, C. D. Piatko, R. Silverman und A. Y. Wu. An efficient k-means clustering algorithm: analysis and implementation. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 24(7):881–892 (2002). ISSN 0162-8828. doi:10.1109/TPAMI.2002.1017616.

- T. Kanungo, D. M. Mount, N. S. Netanyahu, C. D. Piatko, R. Silverman und A. Y. Wu. A local search approximation algorithm for k-means clustering. *Computational Geometry*, 28(2–3):89 – 112 (2004). ISSN 0925-7721. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.comgeo.2004.03.003>. Special Issue on the 18th Annual Symposium on Computational Geometry - SoCG2002.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925772104000215>
- M. Körbe, M. Stiller, H. Horstmeyer und T. Rühl. Migration of the 3-D deep-seismic reflection survey at the {KTB} location, oberpfalz, germany. *Tectonophysics*, 271(1–2):135–156 (1997). ISSN 0040-1951. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00178-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00178-3).
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040195196001783>
- H. Ledoux und C. Gold. An Efficient Natural Neighbour Interpolation Algorithm for Geoscientific Modelling. In *Developments in Spatial Data Handling*, S. 97–108. Springer Berlin Heidelberg (2005). ISBN 978-3-540-22610-9. doi:10.1007/3-540-26772-7_8.
URL http://dx.doi.org/10.1007/3-540-26772-7_8
- B. Leuf und W. Cunningham. *The Wiki Way: Quick Collaboration on the Web*. Addison-Wesley (2001). ISBN 9780201714999.
- J. MacQueen. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1: Statistics*, S. 281–297. University of California Press, Berkeley, Calif. (1967).
URL <http://projecteuclid.org/euclid.bsm/1200512992>
- J.-L. Mallet. *Geomodelling*, Kapitel Discrete Modeling for Natural Objects, S. 1–26. Oxford University Press (2002a).
- J.-L. Mallet. *Geomodelling*, Kapitel Discrete Smooth Interpolation, S. 139–198. Oxford University Press (2002b).
- P. Menzel. CIDRe - a new irregular and parameter constrained approach for the resampling of scattered data. In *Proceedings of the 17th annual conference of the International Association for Mathematical Geosciences, September 5-13, 2015, Freiberg (Saxony) Germany* (herausgegeben von H. Schäben, R. Tolosana Delgado, K. G. van den Boogaard und R. van den Boogaard) (2015). ISBN 978-3-00-050337-5.
- P. Menzel. Constrained indicator data resampling — a parameter constrained irregular resampling method for scattered point data. *GEOPHYSICS*, 81(2):F27–F36 (2016). doi:10.1190/geo2015-0220.1.
URL <http://dx.doi.org/10.1190/geo2015-0220.1>

- P. Menzel und H.-J. Götze. Aida project wiki (2014). CAU Kiel.
URL <http://www.aida.uni-kiel.de>
- P. Menzel, H.-J. Götze, S. Schmidt und Konsortium des DGMK-Projektes 771 "Ti-POT3D". Level-Of-Detail Strategie zur Sereinfachung komplexer Untergrundmodelle - Gifhorner Trog. In *DGMK-Tagungsbericht 2016-1, DGMK/ÖGEW-Frühjahrstagung 2016, Fachbereich Aufsuchung und Gewinnung, Celle, Germany, S. 91 – 96*. DGMK Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. (2016). ISBN 978-3-941721-64-7.
- T. Möller. A fast triangle-triangle intersection test. *Journal of Graphics Tools*, 2(2):25–30 (1997).
- E. Mundry. Zur automatischen Herstellung von Isolinienplänen. *Beih. geol. Jb.*, 98:77–93 (1970).
- L. Papula. *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3 - Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung*, Kapitel Wahrscheinlichkeitsrechnung, S. 249–464. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden (Germany), 2001 (2001). 4. Auflage.
- C. B. Prezzi, H.-J. Götze und S. Schmidt. 3D density model of the Central Andes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 177(3–4):217 – 234 (2009). ISSN 0031-9201. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2009.09.004>.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003192010900199X>
- R. Ronfard und J. Rossignac. Full-range approximation of triangulated polyhedra. *Computer Graphics Forum*, 15(3):C67–C76 (1996). Proc. Eurographics 1996.
- H.-M. Rumpel, F. Binot, G. Gabriel, K. Hinsby, B. Siemon, A. Steuer und H. Wiederhold. Cuxhavener Rinne. In *BurVal Working Group: Groundwater resources in buried valleys - a challenge for geosciences* (herausgegeben von R. Kirsch, H.-M. Rumpel, W. Scheer und H. Wiederhold), S. 227–240 (2006).
- H.-M. Rumpel, F. Binot, G. Gabriel, B. Siemon, A. Steuer und H. Wiederhold. The benefit of geophysical data for hydrological 3D modelling - an example using the Cuxhaven buried valley. *Zeitung der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 160(3):259–269 (2009).
- T. Schaller, J. Andersen, H.-J. Götze, N. Koproch, S. Schmidt, M. Sobiesiak und S. Spletstößer. Segmentation of the Andean Margin by Isostatic Models and Gradients. *Journal of South American Earth Sciences*, 59(0):69–85 (2015). doi:10.1016/j.jsames.2015.01.008. Doi: 10.1016/j.jsames.2015.01.008.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981115000164>

- M. Scheunert, A. Ullmann, M. Afanasjew, R.-U. Börner, B. Siemon und K. Spitzer. A cut-&paste strategy for the 3-D inversion of helicopter-borne electromagnetic data – I. 3-D inversion using the explicit Jacobian and a tensor-based formulation. *Journal of Applied Geophysics*, 129:209 – 221 (2016). ISSN 0926-9851. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.03.023>.
- S. Schmidt. 3D Modelling of Geoid and Gravity using gIS-Functions. In *Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik - Proceedings of the 7th International Meeting on Alpine Gravimetry*, Band 4, S. 137–144 (1996).
- S. Schmidt, C. Plonka, H.-J. Götze und B. Lahmeyer. Hybrid modelling of gravity, gravity gradients and magnetic fields. *Geophysical Prospecting*, 59(6):1046–1051 (2011).
- W. J. Schroeder, J. Zarge und W. E. Lorensen. Decimation of Triangle Meshes. In *SIG-GRAPH 92 Conference Proceedings*, S. 65–70 (1992).
- H. Schuhmann und W. Müller. *Visualisierung - Grundlagen und allgemeine Methoden*. Springer Verlag Berlin Heidelberg (2000).
- SFB 574. Sonderforschungsbereich 574 (2016). CAU Kiel / HZOF Kiel (Geomar).
URL <https://sfb574.geomar.de/>
- A. S. Sharma, D. N. Baker, A. Bhattacharyya, A. Bunde, V. P. Dimri, H. K. Gupta, V. K. Gupta, S. Lovejoy, I. G. Main, D. Schertzer, H. von Storch und N. W. Watkins. *Extreme Events and Natural Hazards: The Complexity Perspective*, Kapitel Complexity and Extreme Events in Geosciences: An Overview, S. 1–16. American Geophysical Union (2013). ISBN 9781118670187. doi:10.1029/2012GM001233.
URL <http://dx.doi.org/10.1029/2012GM001233>
- B. Siemon, E. Auken und A. V. Christiansen. Laterally constrained inversion of helicopter-borne frequency-domain electromagnetic data. *Journal of Applied Geophysics*, 67(3):259–268 (2009).
- B. Siemon, D. G. Eberle und F. Binot. Helicopter-borne electromagnetic investigation of coastal aquifers in north-west germany. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften*, 32(5/6):385–395 (2004).
- D. Steinmetz, J. Winsemann, C. Brandes, B. Siemon, A. Ullmann, H. Wiederhold und U. Meyer. Towards an improved geological interpretation of airborne electromagnetic data: a case study from the Cuxhaven tunnel valley and its Neogene host sediments (northwest Germany). *Netherlands Journal of Geosciences*, 94:201–227 (2015). ISSN 1573-9708. doi:10.1017/njg.2014.39.
URL http://journals.cambridge.org/article_S0016774614000390

- M. Stiller. 3-D Vertical Incidence Seismic Reflection Survey at the Ktb Location, Oberpfalz. In *Continental Lithosphere: Deep Seismic Reflections* (herausgegeben von R. Meissner, L. Brown, H.-J. Dürbaum, W. Franke, K. Fuchs und F. Seifert), S. 101–113. American Geophysical Union (1991). ISBN 9781118669761. doi:10.1029/GD022p0101. URL <http://dx.doi.org/10.1029/GD022p0101>
- P. Tafti, S. Shirani und X. Wu. On Interpolation and Resampling of Discrete Data. *Signal Processing Letters, IEEE*, 13(12):733–736 (2006). ISSN 1070-9908. doi:10.1109/LSP.2006.879854.
- A. Tassara, H.-J. Götze, S. Schmidt und R. Hackney. Three-dimensional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B9) (2006). ISSN 2156-2202. doi:10.1029/2005JB003976. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2005JB003976>
- B. Thalheim und I. Nissen. *Wissenschaft und Kunst der Modellierung: Kieler Zugang zur Definition, Nutzung und Zukunft*. Walter de Gruyter GmbH, Berlin (2015).
- A. Thomsen, H.-J. Götze und K. Altenbrunn. Towards information management for the synoptic interpretation of complex geoscientific models - the virtual CO₂ storage project “CO₂-MoPa” as an example. *Zeitschrift für geologische Wissenschaften*, 40(6):393–415 (2012).
- O. Tropp, A. Tal und I. Shimshoni. A fast triangle to triangle intersection test for collision detection. *Computer Animation And Virtual Worlds*. (2006). Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com).
- A. Ullmann, M. Scheunert, M. Afanasjew, R.-U. Börner, B. Siemon und K. Spitzer. A cut-&-paste strategy for the 3-D inversion of helicopter-borne electromagnetic data – II. Combining regional 1-D and local 3-D inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 130:131 – 144 (2016). ISSN 0926-9851. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.04.008>.
- Ultimaker B.V. *Ultimaker 2 - User manual* (2014). English Version 1.08.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit von mir unter Anleitung meiner Betreuer und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst worden ist. Diese Arbeit hat weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer anderen oder dieser Stelle im Rahmen eines Prüfungsverfahrens vorgelegen.

Abschnitt 4.1.1 dieser Arbeit ist bereits unter dem Titel

“Constrained indicator data resampling - A parameter constrained irregular resampling method for scattered point data”

in der Ausgabe März/April 2016 der Fachzeitschrift *GEOPHYSICS* veröffentlicht worden (Menzel, 2016; peer reviewed).

Hiermit versichere ich, dass die Arbeit unter Einhaltung der Regeln guter wissenschaftlicher Praxis der Deutschen Forschungsgemeinschaft entstanden ist.

Kiel, der 11.06.2017

P e t e r M e n z e l
.....
(Peter Menzel)