Institut für Photogrammetrie und GeoInformation
Leibniz Universität Hannover

Bachelorarbeit

Analyse von Laserscannerdaten im Küstenbereich

Christian Kruse
2793070

Betreuer
Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke
M. Sc. Alena Schmidt

Hannover, 31. Oktober 2013

Leibniz Universität Hannover

BACHELORARBEIT

Kandidat Christian Kruse

Aufgabe Analyse von Laserscannerdaten im Küstenbereich

Motivation Luftgestütztes Laserscanning ist eine geeignete Methode zur großräumigen und hochgenauen Erfassung der Erdoberfläche und wird daher auch für Aufgaben im Küstenschutz angewandt. Durch den stetigen Einfluss von Gezeiteneffekten sowie klimatischen und menschlichen Eingriffen ist hierbei eine kontinuierliche Überwachung erforderlich. Für diesen Zweck können aus den Laserscanningdaten hochaufgelöste Digitale Geländemodelle (DGM) zur Beschreibung der Topographie abgeleitet werden. Durch den Vergleich zu unterschiedlichen Zeitpunkten lassen sich dann Aussagen über Änderungen im Gelände, wie beispielsweise der Verlagerung von Prielkanten, treffen. Zudem können Echtzeit-GPS-Messungen im Watt vorgenommen und dadurch punktuell weitere Höhen- und Lageinformationen gewonnnen werden, welche sich ebenfalls in einem Monitoring analysieren lassen.

Ansatz Ziel der Bachelorarbeit ist die Untersuchung von Laserscannerdaten in Küstengebieten. Hierzu sind Geländemodelle aus den Daten von drei Überfliegungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten abzuleiten. Anschließend sollen diese verglichen und auf Änderungen in der Topographie analysiert werden. Hierfür sind geeignete Methoden zu entwickeln. Die Ergebnisse sollen anschließend interpretiert werden. Zudem sind im Watt Echtzeit-GPS-Messungen durchzuführen, welche für einen zusätzlichen Vergleich Verwendung finden können.

Skills Im Rahmen der Arbeit ist ein solides Grundwissen in Statistik und der Auswertung von Laserscannerdaten erforderlich. Weiterhin ist die Kenntnis einer Programmier- oder Skriptsprache (C/C++, Matlab) notwendig.

Ansprechpartner

Institut für Photogrammetrie und GeoInformation

M.Sc. Alena Schmidt

alena.schmidt@ipi.uni-hannover.de
0511 - 762 2566

www.ipi.uni-hannover.de

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Hannover, 31. Oktober 2013 _____

Christian Kruse

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

1.1 Motivation 1

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit 2

2 Grundlagen 3

2.1 Airborne Laserscanning 3

2.1.1 Sensoren 3

2.1.2 Eigenschaften des Lasers 4

2.1.3 Aufnahmeprinzip des Laserscanners 5

2.1.4 Komponenten des ALS 8

2.1.5 Georeferenzierung 10

2.2 Ableitung von digitalen Geländemodellen 11

2.2.1 Inverse Distanzwichtung 13

3 Datensätze 16

3.1 Datensätze aus Laserscannermessungen 17

3.2 Daten aus GPS-Messungen 18

3.3 Testgebiete 19

4 Methodik 22

4.1 DGM-Generierung aus Laserscannerdaten 22

4.2 Höhenänderungen aus Differenzen-DGMs 25

4.3 Anwendung eines Kantenoperators 25

4.4 Untersuchungen von GPS-Daten 27

5 Analyse der Ergebnisse 29

5.1 Testgebiet 1 30

5.1.1 Epochenvergleich 2012-2010 30

5.1.2 Epochenvergleich 2013-2012 32

5.1.3 Epochenvergleich 2013-2010 35

5.1.4 Detaillierte Betrachtung der Prielveränderungen 37
5.1.4.1 Ausschnitt 1 38
5.1.4.2 Ausschnitt 2 40
5.1.4.3 Ausschnitt 3 41
5.1.5 Epochenvergleiche mittels Kantenoperator 43
5.1.6 Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse von Testgebiet 1 45
5.2 Testgebiet 2 45
5.2.1 Epochenvergleiche mittels Differenzbildung 46
5.2.2 Epochenvergleiche mittels Kantenoperator 48
5.2.3 Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse von Testgebiet 2 51
5.3 Untersuchungen der GPS-Daten 51
5.3.1 Testgebiet 1 52
5.3.2 Testgebiet 2 55
5.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse 58
6 Zusammenfassung und Ausblick 60
Literaturverzeichnis 63

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das Wattenmeer der Nordsee ist ein besonderes Ökosystem, welches sich von Den Helder in den Niederlanden bis zu Blåvandshuk in Dänemark erstreckt. Der Einfluss der Gezeiten lässt das Gebiet zweimal am Tag überfluten und im Anschluss wieder trockenfallen. Bedingt durch diesen periodischen Wechsel konnte sich ein außergewöhnlicher Landschaftsraum mit diversen Pflanzen- und Tierarten, unbebauten Landschaften sowie ein ergiebiges Kulturerbe entwickeln – das deutsche Wattenmeer zählt zum Weltnaturerbe. Auch führen die Gezeiten dazu, dass es innerhalb des Wattenmeeres zu dynamischen Veränderungen der Topographie kommt, welche darüber hinaus durch klimatische Effekte und vom Menschen verursachte (anthropogene) Eingriffe beeinträchtigt werden. So sind zum Beispiel Verlagerungen, Verschmälerungen und Formveränderungen der Priele die Folge, aber auch Sedimentzunahmen bzw. –abnahmen treten auf [ImTG, 2009].

Das flugzeuggestützte Laserscanning (ALS) stellt eine geeignete Möglichkeit dar, um Gebiete großer Ausdehnung flächendeckend, schnell und hochgenau zu erfassen. Die Daten werden hierbei berührungslos erhoben, was einen wesentlichen Vorteil gegenüber terrestrischen Messungen, zum Beispiel mittels Echtzeitkinematik (RTK), darstellt. Wegen der Gezeiten fallen viele Gebiete des Wattenmeeres für nur einige Stunden trocken, sodass eine kontinuierliche, punkthafte Aufnahme derart großer Flächen nur in Etappen möglich ist. Aus den Laserscannerdaten werden digitale Geländemodelle generiert, welche als Arbeitsgrundlage für den Küstenschutz dienen. Lage- und Höhenänderungen küstenmorphologischer Objekte, wie Priele und Dünen, können aus digitalen Geländemodellen verschiedener Epochen gewonnen werden.

ALS wird seit ungefähr einer Dekade für das Monitoring des Wattenmeeres verwendet. Zu Beginn stand die Sicherheit des Menschen im Vordergrund. So wurden die Daten erhoben, um zum Beispiel die Ausmaße von Deichen und Sandbänken zu überwachen, da eine Versandung von wichtigen Schifffahrtsrinnen zu erheblichem Schaden führen würde. Neben der Sicherheit im Schiffsverkehr spielt in diesem Zusammenhang der Klimawandel eine an Bedeutung zunehmende Rolle. In den letzten Jahren hat sich ein weiteres, wesentliches Ziel ergeben – der Erhalt der Natur. Dieser Entwicklungsprozess hat dazu geführt, dass diverse europäische Richtlinien herausgegeben wurden, welche die Länder verpflichtend einhalten

müssen. Zu diesen zählen unter anderem die Wasserrahmenrichtlinie und die Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie, wobei für eine Einhaltung der ersteren viele Informationen über die Topographie im Wattenmeer vorhanden sein müssen [CWSS, 2010].

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Innerhalb dieser Arbeit werden verschiedene Datensätze des niedersächsischen Wattenmeeres untersucht, wobei die Analysen zu Zwecken des Monitorings durchgeführt werden. Aus den zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten erfassten Datensätzen werden digitale Geländemodelle generiert. Ein Vergleich der verschiedenen Epochen lässt Untersuchungen im Hinblick auf Veränderungen der Topographie zu. Neben den Befliegungen wurden in Bereichen des Wattes noch zusätzlich Echtzeit-GPS-Messungen durchgeführt, welche ebenfalls zur Analyse herangezogen werden können.

Die Arbeit gliedert sich hierbei wie folgt.

In Kapitel 2 werden die Grundlagen beschrieben, die für die nachfolgenden Untersuchungen der Datensätze aus dem Wattenmeer erforderlich sind. Wesentliche Punkte, die näher beschrieben werden, sind das ALS und die Ableitung von digitalen Geländemodellen.
Das nächste Kapitel (Kap. 3) stellt die verwendeten Datensätze vor. Die später folgenden Analysen werden sich auf zwei frei gewählte Testgebiete beschränken. Diese befinden sich südlich der Insel Norderney im ostfriesischen Wattenmeer. Hierfür stehen insgesamt drei ALS-Datensätze sowie terrestrische GPS-Messungen zur Verfügung. Die Laserscannerdaten wurden in den Jahren 2010, 2012 und 2013 erhoben, die GPS-Daten sind von 2013.
Eine Erläuterung von Methoden, welche im Rahmen dieser Arbeit für die Analysen der verschiedenen Datensätze Anwendung finden, erfolgt im vierten Kapitel.
In Kapitel 5 werden die verschiedenen Datensätze für das jeweilige Testgebiet untersucht und die Ergebnisse dargestellt. Die Analysen der Laserscannerdaten erfolgen auf Grundlage von Differenzbildungen und Kantendetektionen der generierten digitalen Geländemodelle. Für die GPS-Daten werden ebenfalls Differenzen gebildet. Alle Untersuchungen werden zwecks Monitoring des Wattenmeeres vorgenommen.
Schließlich erfolgt in Kapitel 6 eine Zusammenfassung der Ergebnisse und es wird ein kurzer Ausblick hinsichtlich weiterer möglicher Untersuchungen der vorgestellten Methoden gegeben.

2 Grundlagen

2.1 Airborne Laserscanning

Das flugzeuggestützte Laserscanning, auch Airborne Laserscanning (ALS) genannt, ist ein Verfahren, welches eine quantitative, dreidimensionale Repräsentation der Geländeoberfläche, zum Beispiel in Form einer Punktwolke, liefert. Dabei erfasst der Laserscanner die geometrischen, gegebenenfalls auch strukturellen Informationen der sichtbaren Objektoberflächen auf der Erde und speichert diese [Beraldin et al., 2010].
Airborne Laserscanning ist ein modernes Verfahren, welches innerhalb der letzten Jahrzehnte einen starken Aufschwung erfahren hat. Durch die berührungslose Aufnahme der Objekte auf der Erdoberfläche sowie der Kombination aus schneller Messung mit hoher Genauigkeit besitzt dieses Verfahren viele Vorteile gegenüber einer terrestrischen Aufnahme, zum Beispiel mittels Tachymeter. In den Anfängen der siebzieger Jahre war die erzielbare Genauigkeit des ALS bei der Entfernungsmessung zwischen dem Flugzeug und den Objekten auf dem Boden schlechter als 1 m. Auch die Anzahl der erzeugten Laserpulse pro Sekunde war mit einer Rate von ungefähr 5 bis 10 kHZ zu Beginn der neunziger Jahre im Vergleich zu heute (ca. 300 kHz) noch gering [Beraldin et al., 2010].
Die Anwendungsbereiche des Airborne Laserscannings sind umfangreich. Mithilfe der gewonnenen 3D-Informationen der Erdoberfläche aus den Laserscanneraufnahmen können digitale Oberflächen- als auch digitale Geländemodelle erstellt werden. Neben der Rekonstruktion von Gebäuden sind auch die Überwachung von Stromleitungen sowie der Küstenschutz zentrale Bereiche, in denen dieses Verfahren Anwendung findet. Beispielsweise ist eine Simulation von Flutereignissen und der dadurch auftretenden Schäden möglich [Sörgel, 2013a].

2.1.1 Sensoren

In der Fernerkundung ist zwischen passiven und aktiven Sensoren zu unterscheiden. Es gibt drei Energiequellen, die Informationen in Form von elektromagentischer Strahlung liefern können. Zu diesen zählen die Sonne, die Erde und der Sensor selbst.

Passive Sensoren finden Anwendung in der Luftbildphotogrammetrie. Mögliche Strahlungsquellen sind hier die Sonne und die Erde. Entweder gelangt die Strahlung über Reflexion an der Erdoberfläche zum Sensor oder die Erdoberfläche selbst strahlt Energie in Form von Wärmestrahlung aus.
Bei den aktiven Sensoren ist die Strahlungsquelle der Sensor selbst (Abb. 2.1). Die Sensorstrahlung wird an der Erdoberfläche reflektiert [Niemeyer, 2009].

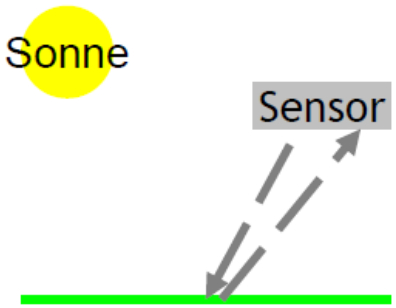

Abbildung 2.1: Prinzip des aktiven Sensors [Niemeyer, 2009]

Beim Airborne Laserscanning werden aktive Sensoren verwendet. Somit ist dieses Verfahren unabhängig von externen Energiequellen, was auch Befliegungen in der Nacht ermöglicht [Heipke, 2012].

2.1.2 Eigenschaften des Lasers

Beim Laser handelt es sich um eine künstliche Strahlungsquelle. Die Strahlung wird durch stimulierte Emission erzeugt. Aus diesem Zusammenhang leitet sich die Abkürzung des Lasers ab (light amplification by stimulated emission of radiation). Laserlicht ist stark gebündelt (kleiner Öffnungswinkel des Lichtstrahls), kohärent (gleiche Phasenlage), nahezu monochromatisch (konstante Wellenlänge) und besitzt eine hohe Intensität. Bedingt durch die recht große Entfernung zwischen dem Flugzeug und der Erdoberfläche sind der kleine Öffnungswinkel und die hohe Strahlenintensität von Wichtigkeit, damit einerseits genügend Strahlung zum Laserscanner zurückkehrt (etwaige Probleme s. Kapitel 2.1.3) und der Durchmesser des Laserstrahls auf der Erdoberfläche nicht zu groß wird.
Abhängig von der Entstehungsart der Strahlung muss zwischen spontaner und stimulierter Emission unterschieden werden. Anders als beim Laser kommt es bei natürlichen Lichtquellen zu einer spontanen Emission von Photonen. Abbildung 2.2 zeigt die spontane (links) und stimulierte (rechts) Emission von Photonen.

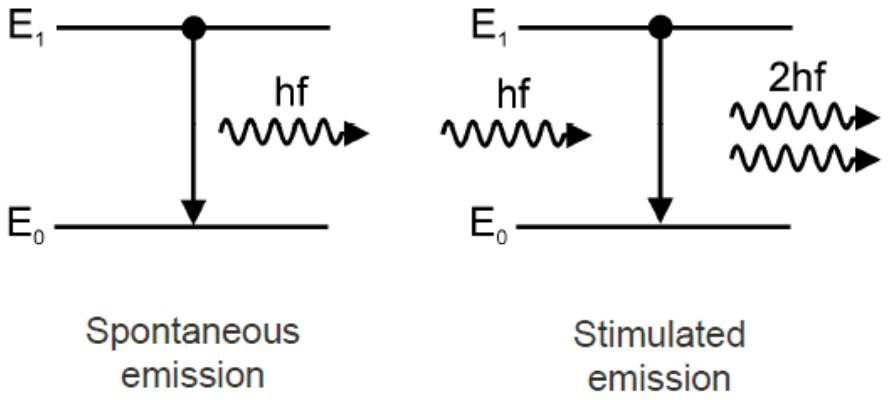

Abbildung 2.2: Emission von Photonen
[Wagner, 2009]

Die spontane Emission findet ohne Einwirkung von außen statt und ist ein Zufallsprozess. Ein genauer Zeitpunkt, wann es zur Emission eines Photons kommt, ist nur zu vermuten. Dies gilt auch für die Richtung des ausgestrahlten Photons.
Bei der Emission geht ein Elektron von einem energiereicheren (E_1) in ein energieärmeres (E_0) Niveau über. Dabei wird Energie frei. Diese Energiedifferenz kann physikalisch über die Frequenz *f* und das Plancksche Wirkungsquantum *h* beschrieben werden:

$$h \cdot f = E_1 - E_0 \tag{2.1}$$

Bei der stimulierten oder auch induzierten Emission wird das Photon nicht spontan ausgesendet – vielmehr wird die Emission durch ein anderes Photon ausgelöst. Dies hat zur Folge, dass nicht nur ein Photon sondern zwei Photonen emittiert werden. Beide Photonen weisen identische Eigenschaften auf, so besitzen sie zum Beispiel die gleiche Energie und Ausbreitungsrichtung. Hierdurch wird die ausgesendete Strahlung verstärkt und es können kontrolliert Laserpulse vom Laserscanner emittiert werden [Wagner et al., 2003].

2.1.3 Aufnahmeprinzip des Laserscanners

Beim Airborne Laserscanning erfolgt eine direkte Messung eines Geländepunktes über die Laufzeitmessung eines ausgesendeten Impulses. Der Laserpuls wird vom Sender emittiert, trifft auf die Erdoberfläche und kehrt zum Empfänger, welcher in Form einer Photodiode realisiert wird, zurück. Neben dem Sender und dem Empfänger existiert noch die Steuerungs- und Messeinheit als weitere Komponente der Lasereinheit. Durch wiederholtes Aussenden von Laserpulsen wird die Erdoberfläche quer zur Flugrichtung Punkt für Punkt

abgetastet. Das Resultat ist eine 3D-Punktwolke, welche die Erdoberfläche repräsentiert. Abhängig von der Fluggeschwindigkeit und der Aufnahmehöhe können mit der heutigen Technologie Punktdichten zwischen 0,2 und ca. 50 Punkten pro Quadratmeter erreicht werden. Dabei wird die Punktdichte unterhalb des Flugzeuges am höchsten sein und zu den Seiten hin abnehmen [Beraldin et al., 2010 und Ressl, 2007].

Kraus (2004) formuliert den Zusammenhang zwischen der Entfernungs- und der Laufzeitmessung wie folgt: Wird die Laufzeit des Impulses mit der Gruppengeschwindigkeit, welche in etwa 99,97% der Lichtgeschwindigkeit ausmacht, multipliziert, so ergibt sich die doppelte Entfernung:

$$2 \cdot R = t_L \cdot v_{Gruppe} \tag{2.2}$$

mit

$$R : \text{Entfernung}$$
$$t_L : \text{Laufzeit}$$
$$v_{Gruppe} : \text{Gruppengeschwindigkeit}$$

Abbildung 2.3 veranschaulicht die Komponenten der Lasereinheit sowie das Prinzip der Entfernungsmessung über Laufzeitmessung des ausgesendeten Laserpulses.

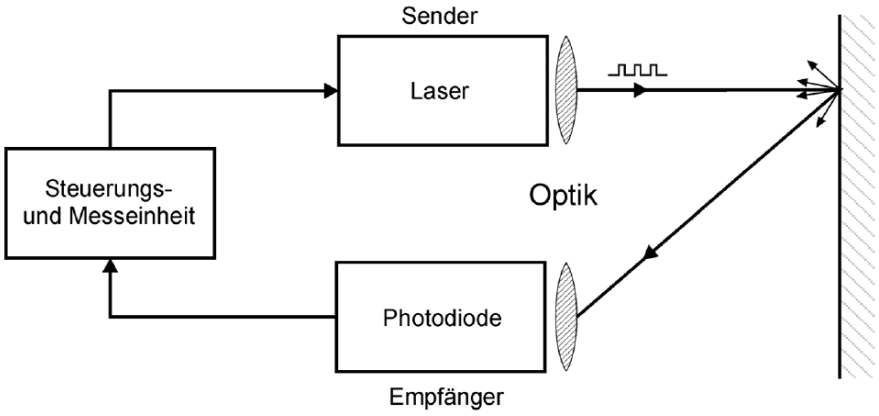

Abbildung 2.3: Komponenten der Lasereinheit und Entfernungsmessung über Laufzeitmessung des Laserpulses [Wagner et al., 2003]

Nicht alle Pulse werden vom Laserscanner erfasst, da bestimmte Objekte aufgrund ihres Materials und ihrer Oberflächenbeschaffenheit nur einen geringen oder gar keinen Signalanteil reflektieren. Auch kann es passieren, dass der Puls aufgrund von gerichteter Reflexion nicht zum Laserscanner zurückkehrt. Dies ist insbesondere bei einem hohen Inzidenzwinkel der Fall.

Zu gerichteter Reflexion kann es auf sehr glatten Oberflächen kommen (z. B. Autodach). Gegebenenfalls kann der gespiegelte Puls auf eine weitere Oberfläche treffen, die durch

diffus wirkende Reflexionseigenschaften die Rückkehr des Pulses zum Laserscanner ermöglicht. In diesem Fall wird die Entfernung aufgrund der vorherigen Umwege (multi path) als zu lang bestimmt werden.
Andere Oberflächen (z. B. Gewässer) können absorbierende Eigenschaften aufweisen. Dies führt dazu, dass am Laserscanner nicht genügend Energie ankommt, die für eine Entfernungsmessung nötig wäre. Die Stärke der Absorption ist beim lotrechten Auftreffen des Laserpulses auf die Wasseroberfläche maximal [Kraus, 2004]. Aufgrund von spiegelnder Reflexion lassen sich in Nadir jedoch häufig auch sehr starke Reflexionen beobachten, was sich ebenfalls in den in dieser Arbeit untersuchten Datensätzen zeigt.

Abbildung 2.4 zeigt die Rückkehr der Laserpulse zum Laserscanner (erstes und/oder letztes Echo), die gerichtete Reflexion (Spiegelung) und die Absorption.

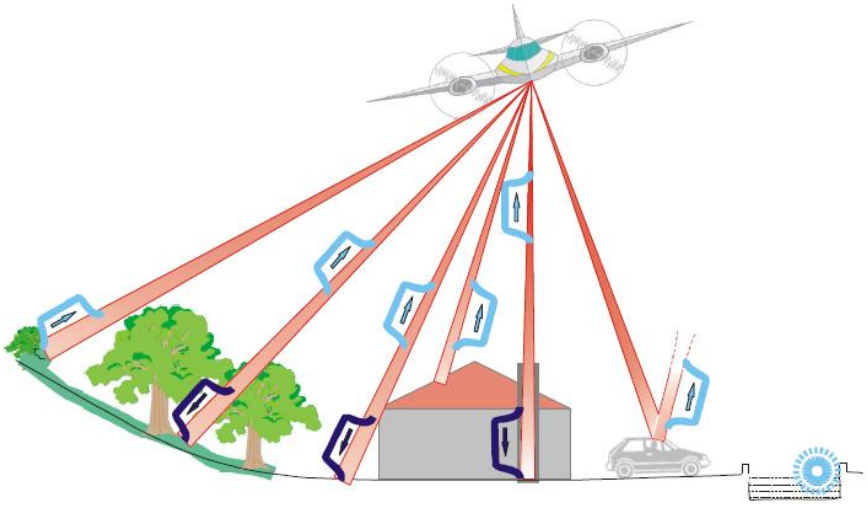

Abbildung 2.4: Rückkehr der Laserpulse sowie Spiegelung und Absorption [Ressl, 2007]

Bedingt durch die Beugung des Laserpulses handelt es sich mathematisch betrachtet nicht um eine punktweise Aufnahme der Erdoberfläche, da der Punkt einen gewissen Durchmesser auf dem Boden besitzt. Deshalb wird häufig von einem Abdruck (Footprint) gesprochen. Parameter, die Einfluss auf den Durchmesser des Abdrucks haben, sind die Divergenz des Laserstrahls sowie die Entfernung des Flugzeuges zur Erdoberfläche [Heipke, 2010].
Eine Konsequenz der Beugung ist, dass ein Laserpuls nicht nur ein einzelnes, sondern gegebenenfalls auch mehrere Objekte auf der Erdoberfläche erfassen kann. Abhängig von der Höhe des Objektes wird die Laufzeit des Laserpulses variieren. Infolge der unterschiedlichen Laufzeiten können mehrere Echos aufgezeichnet werden. Dieses Phänomen ist ebenfalls in Abbildung 2.4 dargestellt. In hellblau sind die zurücklaufenden

Echos (first pulse) und in dunkelblau ist die zweite und hier letzte Reflexion, zum Beispiel am Baumstamm (zweiter Strahl von links), dargestellt (last pulse). Es sind auch noch weitere Echos dazwischen denkbar [Kraus, 2004].

Das Full-Waveform-Verfahren liefert zusätzlich noch Informationen hinsichtlich der Form des Pulses. Durch die Digitalisierung des zurückkehrenden Echos mit einer Auflösung im Gigahertzbereich ist eine Analyse der Gestalt des Echos möglich [Beraldin et al., 2010]. Attribute, wie die Breite und die Amplitude des Echos, können auf diese Weise gewonnen werden. Dabei beschreibt die Amplitude die Stärke des reflektierten Signals, welche zum Beispiel von der Atmosphäre und den Reflexionseigenschaften des Objekts abhängt. Die Breite des Echos liefert Information zu der Variation der Distanz zum Objekt. Dabei wird die Echobreite eines Signals, welches beispielsweise an einem Satteldach reflektiert wird, deutlich breiter sein, als bei einem ebenen Gelände, da hier die Höhenvariation innerhalb des Footprints geringer ausfallen wird. Somit wird hier die Breite des emittierten und reflektierten Signals nahezu identisch sein [Pfeifer et al., 2004].

2.1.4 Komponenten des ALS

Da nicht nur die Entfernung zum Objekt auf der Erdoberfläche zu bestimmen ist, sondern auch noch die variable Position und Raumrichtung des Flugzeuges bekannt sein muss, existieren beim Airborne Laserscanning noch weitere Komponenten (Abb. 2.5). Zu diesen gehören neben der Lasereinheit eine Kombination aus GPS (Global Positioning System) und IMU (Inertial Measurement Unit), welche zusammen die System-Komponenten des ALS bilden [Beraldin et al., 2010].

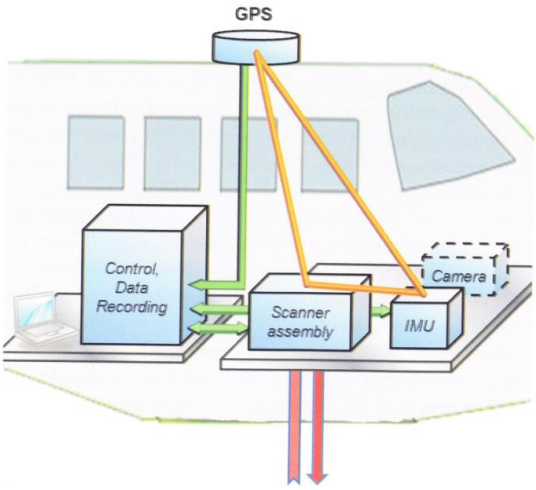

Abbildung 2.5: Komponenten beim Airborne Laserscanning [Beraldin et al., 2010]

Mithilfe der GPS-Antenne erfolgt die Positionsbestimmung des Flugzeuges. Die Antenne befindet sich auf dem Dach, damit ungestört GPS-Satelliten empfangen werden können. Die Abtastfrequenz des GPS-Signals beträgt 1 Hz. Zusätzlich fungiert eine in der Nähe (bis zu 30 km Abstand) befindliche GPS-Station auf dem Boden als Referenzstation. Durch Differenzbildung können unter anderem atmosphärische Effekte, die eine hochgenaue Positionsbestimmung verhindern würden, eliminiert werden. Es wird deshalb vom differentiellen GPS gesprochen (DGPS). Viele Länder betreiben heutzutage ein Netzwerk aus dauerhaft installierten GPS-Stationen, was den Aufbau einer Referenzstation speziell für die Befliegung überflüssig macht.

Die IMU ist entweder direkt am Laserscanner befestigt oder auf einer festen Plattform in unmittelbarer Nähe angebracht (vgl. Abb. 2.5). Sie dient der Bestimmung der Raumorientierung des Messsystems. Hierbei beschreiben die Fluglagewinkel (Roll-, Nick- und Kurswinkel) die Verdrehung des Flugzeuges bzw. die Veränderung der Flugrichtung – sie geben die Orientierung der Plattform an. Auch beinhaltet die IMU Beschleunigungsmesser für alle drei Achsen des Flugzeuges. Die hieraus gewonnenen Informationen werden genutzt, um die Position der Plattform zu interpolieren. Die Messfrequenz dieser Größen liegt bei 200 Hz. Jedoch weist die IMU ein Driftverhalten auf, sodass eine längere Nutzung ohne Genauigkeitsverlust nicht möglich ist.

Durch die Kombination von GPS und IMU kann die Trajektorie des Flugzeuges mit einer Genauigkeit besser als 10 cm bestimmt werden [Beraldin et al., 2010 und Würländer und Wenger-Oehn, 2007].

Weitere Komponenten sind der Laptop für den Piloten sowie die Kontroll- und Datenaufzeichnungseinheit. Diese sind eng miteinander verknüpft, da die aufgezeichneten Daten (Entfernungsmessungs- und Positionsdaten gewonnen aus den Laserscanner-, GPS- und IMU-Daten) mithilfe des Laptops eingesehen und überprüft und gegebenenfalls weitere Parameter hinsichtlich der Befliegung aufgesetzt werden können. Zu den Aufgaben der Kontrolleinheit zählen die Zeitsynchronisation und die Kontrolle des gesamten Systems. Die Datenmenge, die aus Entfernungsmessungen stammt, übersteigt die der aus GPS- und IMU-Messungen zusammenkommenden Daten um das 200-fache. Dies zeigt, dass eine Interpolation der Parameter für die Positionsbestimmung und die Raumorientierung der Lasereinheit nötig ist [Beraldin et al., 2010].

2.1.5 Georeferenzierung

Aufgrund der unterschiedlichen Referenzsysteme, in denen die Daten der System-Komponenten aufgezeichnet werden, ist eine Georeferenzierung notwendig. Unter der Georeferenzierung wird die Bestimmung des räumlichen Bezugs eines Objektes zu einem Koordinatensystem verstanden. Der räumliche Bezug, also die Orientierung und die Lage, sind durch das GPS und die IMU gegeben. Um nun die Daten in einem gemeinsamen, übergeordneten Referenzsystem (z.B. WGS 84) vorliegen zu haben, bedarf es mehrerer aufeinander folgender Transformationen. Abbildung 2.6 zeigt die verschiedenen Koordinatensysteme beim ALS, bedingt durch untereinander abweichenden Positionen der drei System-Komponenten.

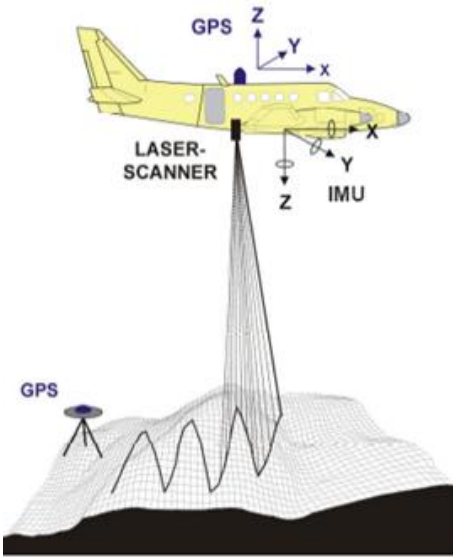

Abbildung 2.6: Unterschiedliche Koordinatensysteme beim ALS [Ressl, 2007]

Im ersten Schritt werden die Koordinaten im System des Laserscanners bestimmt. Dies geschieht über die Distanz und den Auslenkwinkel des Laserstrahls, welche gemessen worden sind. Daraufhin erfolgt der Übergang in das Referenzsystem der IMU. Dieses wird in das lokale GPS-Referenzsystem überführt und schließlich erfolgt die Transformation in das Referenzsystem WGS 84. Für die letzten beiden Transformationen sind zum einen die gemessene Höhe und Position des Flugzeuges zum Zeitpunkt der Entfernungsmessung und zum anderen die Höhe des örtlichen Niveaus, abhängig von der Flugzeugposition, notwendig. Die für die Transformationen relevanten Größen werden in Form von Parametern und Rotationsmatrizen angebracht [Heipke, 2010].

Durch die unterschiedlichen Positionen der System-Komponenten, wie unter 2.1.5 beschrieben, müssen Daten hinsichtlich der Lagerung untereinander (Exzentrizität und

Orientierung) gesammelt werden. Hierbei wird zwischen der direkten und der verfeinerten Georeferenzierung unterschieden. Erstere nutzt ausschließlich Informationen des verwendeten Messystems während bei der verfeinerten Georeferenzierung noch zusätzlich Informationen am Objekt Verwendung finden. Hierbei werden identische Flächenelemente in Flugstreifen gemessen und anschließend an die GPS- und IMU-Werte Korrekturen über einen Ausgleichungsprozess angebracht. Es wird deshalb auch von einer „Nachkalibrierung“ des Messsystems gesprochen, welche verbesserte Ergebnisse liefert. Sollen die Daten im Landeskoordinatensystem geliefert werden, so kann dies über eine Datumstransformation erfolgen [Würländer et al., 2005].
Näheres zur Georeferenzierung sowie praktische Erfahrungen können in [Würländer und Wenger-Oehn, 2007] sowie [Würländer et al., 2005] nachgelesen werden.

Die Genauigkeit, die in der Praxis erreicht werden kann, hängt von vielen Faktoren ab. Wesentlichen Einfluss nehmen die fehlerhafte Kalibrierung der System-Komponenten und die begrenzte Genauigkeit, mit der die Trajektorie des Flugzeuges, bedingt durch die im Vergleich kleine Abtastfrequenz, wiedergeben wird. Auch die Komplexität des zu befliegenden Gebietes ist ausschlaggebend. Ein ebenes Gelände wird in der Regel bessere Genauigkeiten liefern, als ein hügeliges. Zu nennen sind auch die etwaigen Mehrfachreflexionen, die in Kapitel 2.1.3 vorgestellt worden sind. Abschließend ist die Transformationen zwischen den einzelnen Koordinatensystemen, insbesondere die Transformation in das Landeskoordinatensystem, als limitierender Faktor zu nennen. Da es sich bei den Höhen des Landeskoordinatensystems meist um orthometrische Höhen handelt (zum Beispiel Gauß-Krüger), sind diese hypothesenbehaftet, sodass die mangelnde Kenntnis des Geoids zu Ungenauigkeiten führen kann.
Insgesamt liegt die mögliche Genauigkeit für die Höhe zwischen 5-20 cm, für die Lage ist sie mit 20-100 cm schlechter. Ausgegangen wird hier von einer maximalen Flughöhe von bis zu zwei Kilometern über Grund [Beraldin et al., 2010].

2.2 Ableitung von digitalen Geländemodellen

Nach der Georeferenzierung können aus der gegebenen Punktwolke, die eine unregelmäßige Struktur hinsichtlich der Punkteverteilung aufweist, digitale (mathematische) Modelle der Erde erstellt werden. Zu diesen gehören das digitale Oberflächenmodell (DOM) sowie das digitale Geländemodell (DGM). Hier liegen die Punkte in einer Datenstruktur vor.

Gängige Strukturen sind das regelmäßige Raster oder die Dreiecksvermaschung (Triangulierung).

Das DOM ist eine digitale Repräsentation der Erdoberfläche inklusive der Gebäude und der Vegetation. Anschaulich wird (fast) all das dargestellt, was das Flugzeug während der Befliegung „sieht“. Von Häusern wird die Oberfläche der Dächer erfasst, Waldgebiete werden durch Flächen, welche durch ineinander greifende Baumkronen entstehen, repräsentiert. Für offenes Gelände ist das DOM identisch mit dem DGM.

Das DGM hingegen stellt eine Repräsentation der Erdoberfläche ohne die Gebäude und die Vegetation dar - vielmehr werden die Höhen des Geländes beschrieben. Es kann Geripplinien, Geländekanten und markante Punkte enthalten [Pfeifer, 2003]. Häufig wird nur der letzte Puls zur Beschreibung des DGMs verwendet, da früher reflektierte Pulse in der Regel nicht die Erdoberfläche sondern andere Objekte, wie zum Beispiel Bäume, repräsentieren. Jedoch kann es aufgrund von Mehrwegreflexionen (vergleiche Kapitel 2.1.3) passieren, dass Punkte unterhalb der eigentlichen Erdoberfläche aufgenommen werden.

In Abbildung 2.7 ist die perspektivische Sicht eines Gebietes, jeweils mit einer Rasterweite von 1 m, dargestellt.

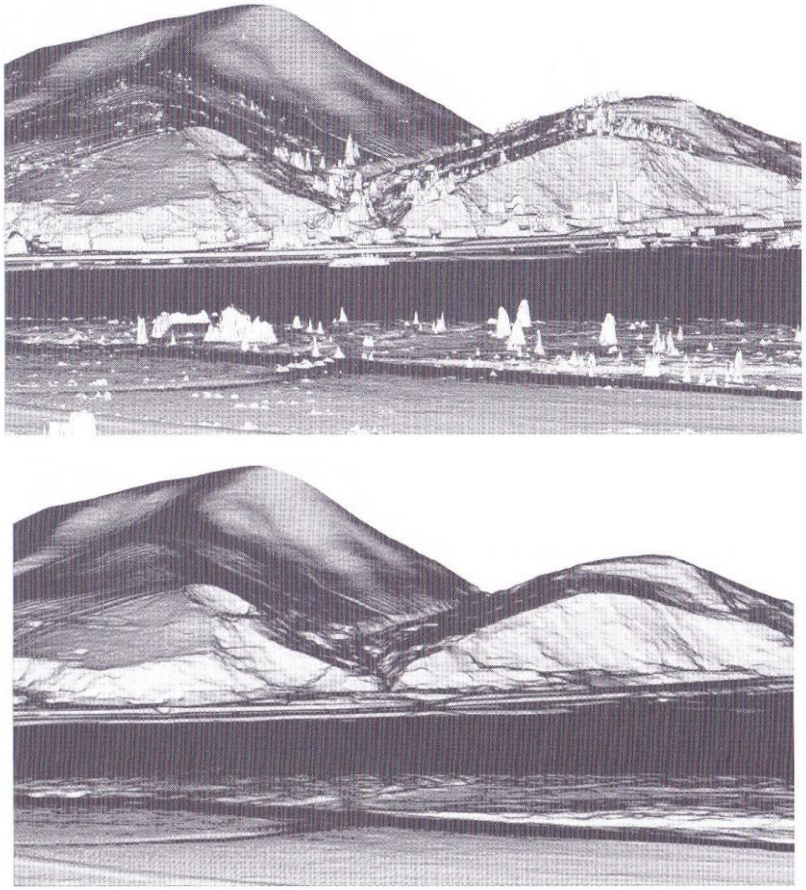

Abbildung 2.7: Darstellung des DOM (oben) und des DGM (unten) [Briese, 2010]

Für die Erstellung des DOMs sind im Allgemeinen zwei wesentliche Schritte erforderlich: die Filterung (Trennung von Gelände- und Nichtgeländepunkten) sowie die Interpolation der rohen Punktwolke in ein regelmäßiges Raster.

Für die Filterung ist aufgrund der hohen Datenmengen, die bei der Erfassung anfallen, eine Automatisierung nötig, um die Gelände- von den Nichtgeländepunkten zu trennen. Zur Ableitung des DGMs existieren diverse Filterungsansätze. Sithole und Vosselman (2004) sowie Sithole (2005) geben einen Überblick über verschiedene Filteralgorithmen. Einige Filteralgorithmen arbeiten auf Rasterdatenstrukturen, andere direkt mit der „originalen“ Punktwolke oder mit triangulierten Daten. Erstere haben den Vorteil, dass schnelle und einfache Operationen hinsichtlich der Nachbarschaft, unter einem gewissen Genauigkeitsverlust, möglich sind. Durch die Verarbeitung der originalen Punktwolke können hingegen einige Geländestrukturen, wie z.B. Bruchkanten, besser erhalten bleiben. Manchmal werden die beiden zuerst genannten Algorithmen kombiniert genutzt, um eine bessere Qualität hinsichtlich der Klassifikation in Gelände- und Nichtgeländepunkte zu erzielen [Briese, 2010].

Um die unregelmäßige Punktwolke in eine Rasterstruktur zu überführen, sind verschiedene Interpolationsmethoden möglich. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Interpolationsalgorithmus „Inverse Distance to a Power“ (Inverse Distanzwichtung) für unregelmäßig verteilte Punktwolken zur Erstellung der digitalen Geländemodelle verwendet. Eine nähere Beschreibung dieser Methode erfolgt in Kapitel 2.2.1 auf Basis von [GDAL Grid Tutorial, 2008] und [GITTA, 2011]. Auf einen Filterungsschritt als Vorverarbeitung kann aufgrund der Geländebeschaffenheit – im Watt sind keine Objekte wie Gebäude oder hohe Vegetation vorhanden – hingegen verzichtet werden. DOM und DGM sind in diesem Fall identisch.

2.2.1 Inverse Distanzwichtung

Für die Interpolation von Höhenwerten der originalen Punktwolke auf ein Raster werden die Höhen von Nachbarpunkten berücksichtigt. Dem Verfahren der inversen Distanzgewichtung liegt dabei der Gedanke zugrunde, dass zwei Messwerte sich umso weniger ähneln, je weiter sie voneinander entfernt sind. Dieser Grundgedanke wird bei dem Interpolationsverfahren dadurch umgesetzt, dass Messwerte mit einem Gewicht multipliziert werden, welches proportional zur Inversen der Distanz zwischen dem jeweiligen Schätz- und

Messort ist. Häufig wird der Einfluss der Distanz noch zusätzlich über einen Exponenten gesteuert.

Für jeden Rasterpunkt wird die resultierende Höhe über folgende Formel geschätzt:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{z_i}{r_i^p}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{r_i^p}} \tag{2.3}$$

mit

z: zu schätzende Höhe

z_i: bekannte Höhe am i-ten Punkt

r: Distanz vom Raster zum i-ten Punkt

p: Exponent zur Gewichtung der Distanz

n: Anzahl der Punkte in einer „Suchellipse“

Die Such- bzw. Rotationsellipse definiert den Bereich, in welchem der Algorithmus nach Punkten sucht, die für die Berechnungen genutzt werden. Punkte auf dem Rand der Ellipse werden ebenfalls verwendet. Die Ellipse wird über drei Parameter beschrieben – die kleine und große Halbachse sowie den Rotationswinkel (Abb. 2.8).

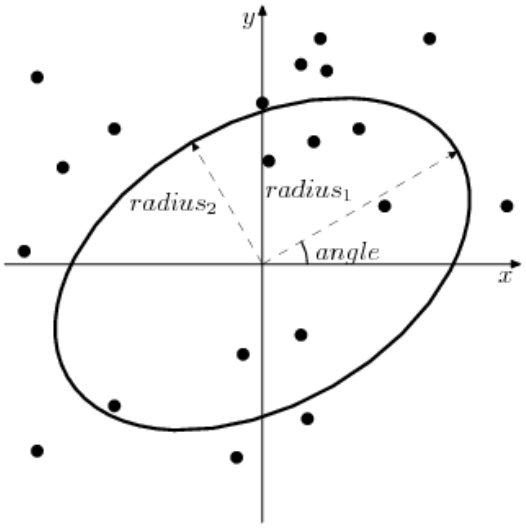

Abbildung 2.8: Suchellipse zur Bestimmung der nächsten Nachbarn für die Interpolation der Höhen [GDAL Grid Tutorial, 2008]

Abhängig von der Wahl des Exponenten wird der Verlauf der zu schätzenden Oberfläche entweder eher als glatt oder rau einzustufen sein. Ersterer Fall tritt auf, wenn ein niedriger Exponent gewählt wird, da in diesem Fall alle Nachbarn nahezu gleichförmig und ungeachtet ihrer Distanz in die Berechnung mit einfließen. Je höher der Exponent gewählt wird, desto

rauer wird die Oberfläche sein, da nun das Gewicht der Nachbarn einen deutlich größeren Einfluss auf die Interpolation hat.

Ein wesentlicher Vorteil der inversen Distanzwichtung liegt in der schnellen Berechnung. Die Berücksichtigung der jeweiligen Einflüsse auf die Schätzung abhängig von den unterschiedlichen Distanzen der Messpunkte ist ebenso vorteilhaft, da nähere Punkte eher den Geländeverlauf widerspiegeln werden, als dies für entfernte Messpunkte der Fall ist. Darüber hinaus ist durch die freie Wahl des Exponenten der Einfluss der Distanzen noch zusätzlich steuerbar. Hierdurch kann die Gewichtung gut an das jeweilige Gelände angepasst werden.

Eine richtungsabhängige Gewichtung ist hingegen ausgeschlossen, sodass markante Geländestrukturen nicht explizit berücksichtigt werden können. Beispielsweise werden Höhenpunkte entlang eines Bergrückens nicht als Struktur erkannt, wodurch diese Geländestruktur gegebenenfalls verloren gehen kann.

3 Datensätze

In den folgenden Kapiteln werden Untersuchungen in Wattbereichen mit verschiedenen Datensätzen hinsichtlich des Aufnahmetyps sowie des zeitlichen Aspekts durchgeführt. Wesentliches Augenmerk wird auf die Veränderung der Priele in Hinblick auf dessen Verlagerung, Verschmälerung und Formveränderung über eine gewisse Zeitspanne gelegt. Hierfür stehen drei Datensätze aus dem flugzeuggestützten Laserscanning sowie terrestrische GPS-Messungen zur Verfügung.
Die Laserscannerdaten wurden in den Jahren 2010, 2012 und 2013 erhoben. Somit weisen sie einen hohen Aktualitätsgrad auf und sind deshalb für den heutigen Küstenschutz (Monitoring) von großem Interesse. Das gleiche Aufnahmeverfahren und Genauigkeitsniveau sind ebenfalls von Bedeutung, da so aussagekräftige und flächendeckende Vergleiche möglich sind. Basis für die Untersuchungen liefern digitale Geländemodelle, welche aus den Laserscannerdaten generiert werden.
Die GPS-Messungen wurden 2013 im Rahmen einer Messkampagne des WIMO-Verbundprojektes (Wissenschaftliche Monitoringkonzepte für die deutsche Bucht) durchgeführt. Diese Datensätze ermöglichen anders als die Laserscannerdaten keine flächenhafte Erfassung des Wattenmeeres, da die Punktdichte der GPS-Daten im Vergleich zu der der Laserscannerdaten gering ist. Somit ist die Erstellung eines digitalen Geländemodells nicht möglich. Die GPS-Daten liegen in keinem regelmäßigen Raster vor und können aus diesem Grund mit den Laserscannerdaten nur punktweise verglichen werden. Da von beiden Aufnahmearten Daten aus dem Jahr 2013 vorliegen, ist ein Vergleich zwischen den Laserscannerdaten und den GPS-Daten aus dieser Epoche sinnvoll.

Innerhalb dieser Arbeit werden Gebiete des Wattenmeeres südlich der ostfriesischen Insel Norderney und nördlich des niedersächsischen Festlandes betrachtet. Abbildung 3.1 zeigt diesen Bereich und soll einen Überblick verschaffen. Die Testgebiete, auf die sich alle weiteren Untersuchungen beschränken werden, sind in Kapitel 3.3 genauer veranschaulicht. In den zwei folgenden Kapiteln 3.1 und 3.2 werden die Laserscannerdatensätze der drei verschiedenen Epochen und die GPS-Daten beschrieben.

Abbildung 3.1: Übersichtskarte
[Google Maps, © 2013 Google]

3.1 Datensätze aus Laserscannermessungen

Der älteste Datensatz wurde im Zeitraum vom 18.03 bis 17.06.2010 mit dem Lasersystem „Harrier 56“ der Firma TopoSys/Trimble mittels Polygonscanner erhoben. Die Positionsbestimmung erfolgte mittels DGPS in Kombination mit einer IMU. Insgesamt wurden 41 Flüge durchgeführt und davon 40 bei der Auswertung berücksichtigt. Die hierdurch erfasste Fläche umfasst 1.602 km², welche auch den im Folgenden zu untersuchenden dargestellten Bereich (Abb. 3.1) mit einschließt [Inphoris, 2012].

Die Befliegung für den zweiten Datensatz fand am 06.05.2012 in zwei Flugsessions durch die Firma MILAN Geoservice GmbH statt. Verwendet wurde der Laserscanner „LMS-Q 560“. Auftraggeber war der NLWKN (Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz) [MILAN, 2012].

Die aktuellsten Laserscannerdaten wurden an zwei Tagen in drei Sessions erfasst. Die Befliegung des Auftragsgebietes wurde am 26.03 und 27.03.2013 durchgeführt. Verwendung fand der Laserscanner „LMS-Q 680i“. Auftraggeber und –nehmer sind identisch zur Befliegung von 2012 [MILAN, 2013].

Die Datensätze sind in Form von 3D-Koordinaten im ASCII-Format vorhanden.

Tabelle 3.1 zeigt einige wesentliche Parameter der drei Befliegungen.

	Datensatz 2010	Datensatz 2012	Datensatz 2013
Fluggeschwindigkeit [km/h]	198	259	259
Flughöhe [m]	400	650	650
Pulswiederholungsrate [kHz]	150	100	≤ 266
Öffnungswinkel [°]	45	30-60	30-60
Scanmethode	rot. Polygon-Spiegel	rot. Polygon-Spiegel	rot. Polygon-Spiegel

Tabelle 3.1: Wesentliche Parameter der Laserscannerdaten im Überblick

Weitere Größen können bei Bedarf dem Bericht „Inphoris, 2012“ bzw. den Dokumentationen „MILAN, 2012“ und „MILAN, 2013“ entnommen werden.

3.2 Daten aus GPS-Messungen

Die Erfassung der GPS-Daten erfolgte mittels RTK Anfang Juni 2013 an zwei unterschiedlichen Tagen, da der Messzeitraum durch die Tiden stark beeinträchtigt wird. Trotz Ebbe war es nicht möglich, die tiefen, dauerhaft mit Wasser gefüllten Priele, zu vermessen. Bei kleineren Prielen, die aufgrund der Ebbe teilweise trocken fielen, traten hingegen keine Probleme auf. Eigens für dieses Projekt wurde eine spezielle „Schlittenkonstruktion“ entwickelt, welche eine schnelle und geeignete Möglichkeit zur Datenerfassung darstellt (Abb. 3.2).

Abbildung 3.2: GPS-Messung mittels “Schlitten“

Hierbei wird der Schlitten mit einem Seil über das Watt gezogen und jede halbe Sekunde eine Messung automatisch ausgelöst. Der GPS-Empfänger kann in einem Rucksack transportiert werden. Somit eignet sich dieses Verfahren gut, um interessante Bereiche des Wattenmeeres zu erfassen bzw. zu verdichten, da eine Befliegung sehr kostspielig und aufwendig ist.
Die gewonnenen Rohdaten wurden für die Weiterverarbeitung aus dem NMEA-Format ausgelesen und in das Bezugssystem der Laserscannerdaten überführt.

3.3 Testgebiete

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei verschiedene Testgebiete ausgewählt.
Hierbei wurde darauf geachtet, dass zum einen interessante Bereiche, wie zum Beispiel Priele, betrachtet werden, in welchen Veränderungen zu erwarten sind. Zum anderen decken die vorhandenen Datensätze nicht allesamt das gesamte Gebiet südlich Norderneys ab, sodass die Auswahl von möglichen Testgebieten eingeschränkt ist. Da es aus Sicht des Monitorings von großer Bedeutung ist, gleiche Gebiete im Laufe der Jahre zu beobachten und gegebenenfalls Veränderungen in diesen festzustellen, fällt die Auswahl der Testgebiete auf zwei Bereiche, von denen sowohl die Laserscannerdaten der drei Epochen als auch GPS-Daten von Teilbereichen der Testgebiete vorhanden sind.
Abbildung 3.3 gibt einen Überblick des Wattenmeeres, in rot sind die zwei Testgebiete dargestellt. Das Prielsystem erstreckt sich im Wesentlichen von Westen nach Osten, mit einigen größeren Ausläufern in Richtung des südlich gelegenen Festlandes. Nördlich des Hauptarms befindet sich die Insel Norderney.

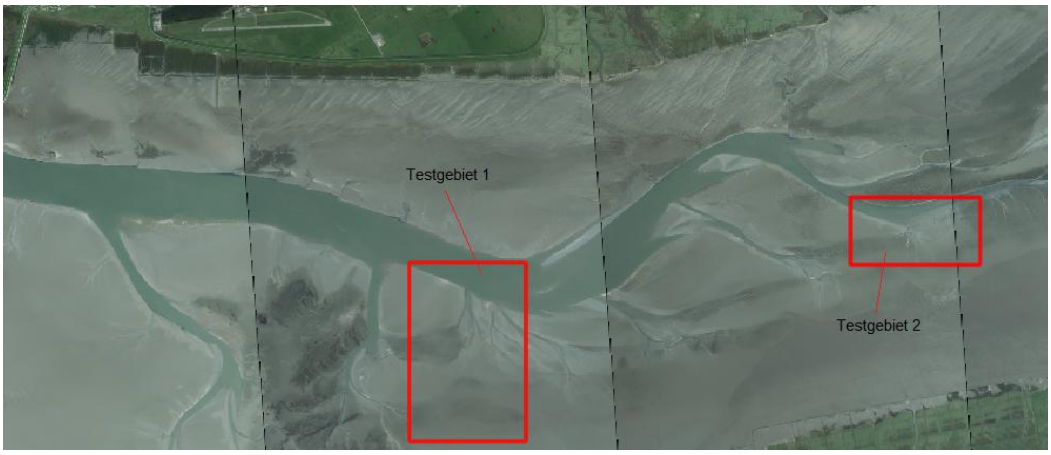

Abbildung 3.3: Überblick des Prielsystems zwischen Norderney und dem Festland rot: ausgewählte Testgebiete

Das erste Testgebiet beinhaltet kleinere Ausläufer südlich des Hauptarms. Im unteren Bereich sind im Wesentlichen keine Ausläufer vorhanden, sodass hier nur geringe Veränderungen der Topographie vermutet werden. Testgebiet 2 befindet sich fast am Ende des Hauptarms und enthält ebenfalls viele kleine Ausläufer in südlicher Richtung.
Die Datensätze der Laserscannerdaten (ALS) und der GPS-Daten (GPS) in den entsprechenden Testgebieten sind in Tabelle 3.2 dargestellt. Anzumerken ist, dass die GPS-Daten nur in bestimmten Bereichen des Testgebietes vorhanden sind und deshalb auf die Angabe der Punktdichte in der Tabelle verzichtet wird. Wie sich die Messpunkte im jeweiligen Messgebiet verteilen, kann Abbildung 3.5 und 3.7 entnommen werden. Weiterhin werden in Abbildung 3.4 und 3.6 exemplarisch die Laserscannerdatensätze aus dem Jahr 2013 für beide Testgebiete dargestellt.

		Testgebiet 1	**Testgebiet 2**
Ausdehnung in [m]	Nord-Süd	1373	516
	Ost-West	897	997
Fläche [km²]		1,23	0,51
Anzahl der Messpunkte ALS [Millionen]	2010	3,2	1,6
	2012	4,9	2,9
	2013	5,0	2,9
Punktdichte [Punkte/m²]	2010	2,6	3,1
	2012	4,0	5,7
	2013	4,1	5,7
Anzahl der Messpunkte GPS [Tausend]	2013	20,2	15,4

Tabelle 3.2: Testgebiete mit den jeweiligen Kenngrößen für die Datensätze

Testgebiet 1 weist generell eine geringere Punktdichte als Testgebiet 2 auf. Dies kann auf Bereiche zurückgeführt werden, bei denen das ausgesandte Signal nicht zum Laserscanner zurückgekehrt ist. Hauptsächlich wird dies bei wasserbedeckten Gebieten der Fall sein.
Die Bereiche, in denen kein Signal erfasst wurde, sind gut in schwarz den Abbildungen 3.4 und 3.6 zu erkennen.

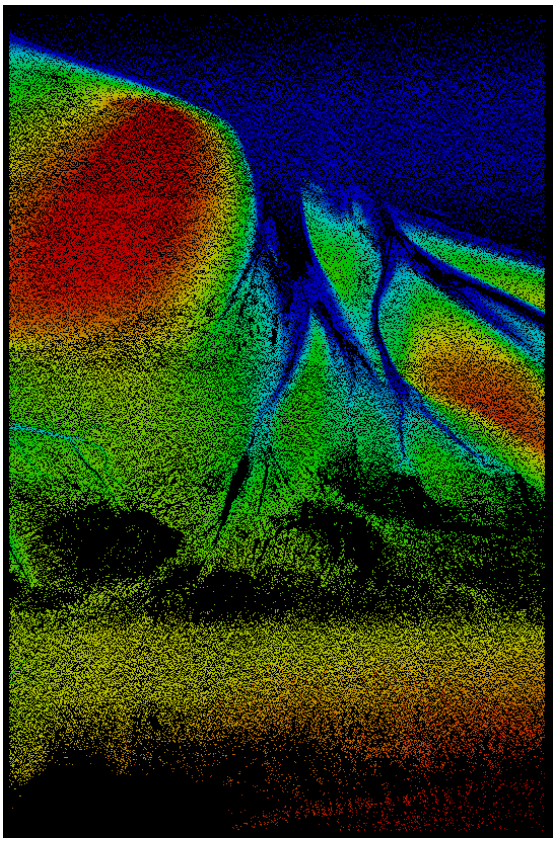

Abbildung 3.4:
Testgebiet 1 – Höhencodierte Punktwolke des Laserscannerdatensatzes von 2013

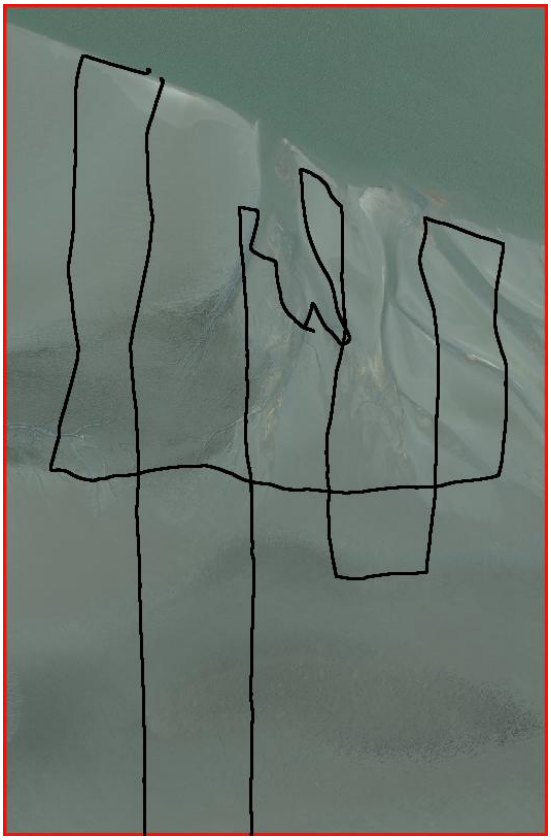

Abbildung 3.5:
Testgebiet 1 – Luftbild mit GPS-Track (schwarz)

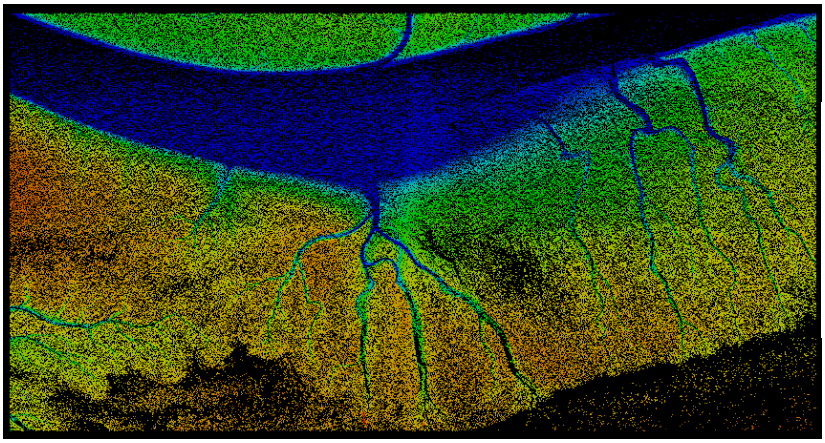

Abbildung 3.6:
Testgebiet 2 - Höhencodierte Punktwolke des Laserscannerdatensatzes von 2013

Abbildung 3.7:
Testgebiet 2 - Luftbild mit GPS-Track (schwarz)

4 Methodik

Die in Kapitel 3 vorgestellten Datensätze sollen im Folgenden hinsichtlich eines Monitorings für die gewählten Testgebiete untersucht werden. Hierfür erfolgt zunächst eine DGM-Generierung aus den Laserscannerdaten (Kap. 4.1). Auf Grundlage der digitalen Geländemodelle werden im Wesentlichen drei verschiedene Untersuchungen durchgeführt.
Kapitel 4.2 beschäftigt sich mit der Differenzbildung der Geländemodelle, aus denen Höhenänderungen abgeleitet werden können. Desweiteren erfolgt die Suche nach Kanten mithilfe eines Kantenoperators (Kap. 4.3). Die Untersuchung ist insbesondere für die Veränderung von Prielen interessant. Diese und die Analyse aus Kapitel 4.2 geben Informationen im Hinblick auf Veränderungen der Topographie im Wattenmeer über eine Zeitspanne von drei Jahren. In Kapitel 4.4 werden die GPS-Daten untersucht und mit den ALS-Daten verglichen.

4.1 DGM-Generierung aus Laserscannerdaten

Zunächst liegen die ALS-Datensätze in Form einer rohen Punktwolke vor. Die Daten weisen zu diesem Zeitpunkt noch keine regelmäßige Punkteverteilung in Rasterform auf.

Vor der eigentlichen Erstellung der digitalen Geländemodelle wurden die vorhandenen Laserscannerdatensätze um Ausreißer korrigiert. Hierbei wird die Annahme getroffen, dass die Differenz zwischen zwei benachbarten Punkten (das heißt für jede Zeile wird die Differenz eines Punktes zu seinem vorherigen und nachfolgenden Punkt verglichen) einen frei gewählten Wert nicht über- bzw. unterschreiten darf. Dieser Schwellwert wurde nach Analyse der Laserscannerdaten auf 0,3 m gesetzt und alle Messwerte, deren Betrag größer als der Schwellwert ist, aus dem Datensatz entfernt. Auf diese Weise werden Punkte, die nicht dem Gelände entsprechen und beispielsweise durch die Reflexion an Vögeln hervorgerufen werden, eliminiert.

Für die Generierung eines Rasters wird die Interpolationsmethode „Inverse Distance to a Power“ verwendet. Die Funktionsweise dieses Interpolationsverfahrens ist in Kapitel 2.2.1 beschrieben.

Die eben genannte Methode zur Interpolation ist in der freien Software GDAL (Geospatial Data Abstaction Library) vorhanden [GDAL, 2013]. Hierbei handelt es sich um eine Programmbibliothek, welche die Verarbeitung von räumlichen Rasterdaten ermöglicht. Über die Kommandozeile können die notwendigen Parameter des Interpolationsverfahrens enstprechend eingestellt werden. Als Gitterweite wird dabei ein Pixelabstand von 1 m festgelegt. Ein weiterer einzustellender Parameter ist der in Kapitel 2.2.1 beschriebene Exponent zur Gewichtung der Distanz, welcher für die Berechnung auf zwei gesetzt wurde. Dieser Wert entsprach der Voreinstellung und wurde beibehalten. Aufgrund der Geländebeschaffenheit wird der Einfluss dieses Parameters auf die Ergebnisse als gering angesehen und nicht näher untersucht. Desweiteren sind das Ausgabeformat und der –typ der Daten anzugeben.

Das Ergebnis der Berechnungen ist ein DOM. Da es sich innerhalb der Testgebiete um offenes Gelände handelt, das heißt Vegetation und Häuser nicht vorhanden sind, ist das DOM identisch mit dem DGM. Deshalb wird im Folgenden von einem DGM gesprochen. Das berechnete DGM wird in Form eines Bildes ausgegeben.

Abbildungen 4.1 und 4.2 zeigen exemplarisch die für die zwei Testgebiete generierten digitalen Geländemodelle der Laserscannerdaten aus dem Jahr 2013. Das Koordinatensystem für die Lage ist das DHDN, Gauß-Krüger-Abbildung (3. Streifen), für die Höhe das DHHN92.

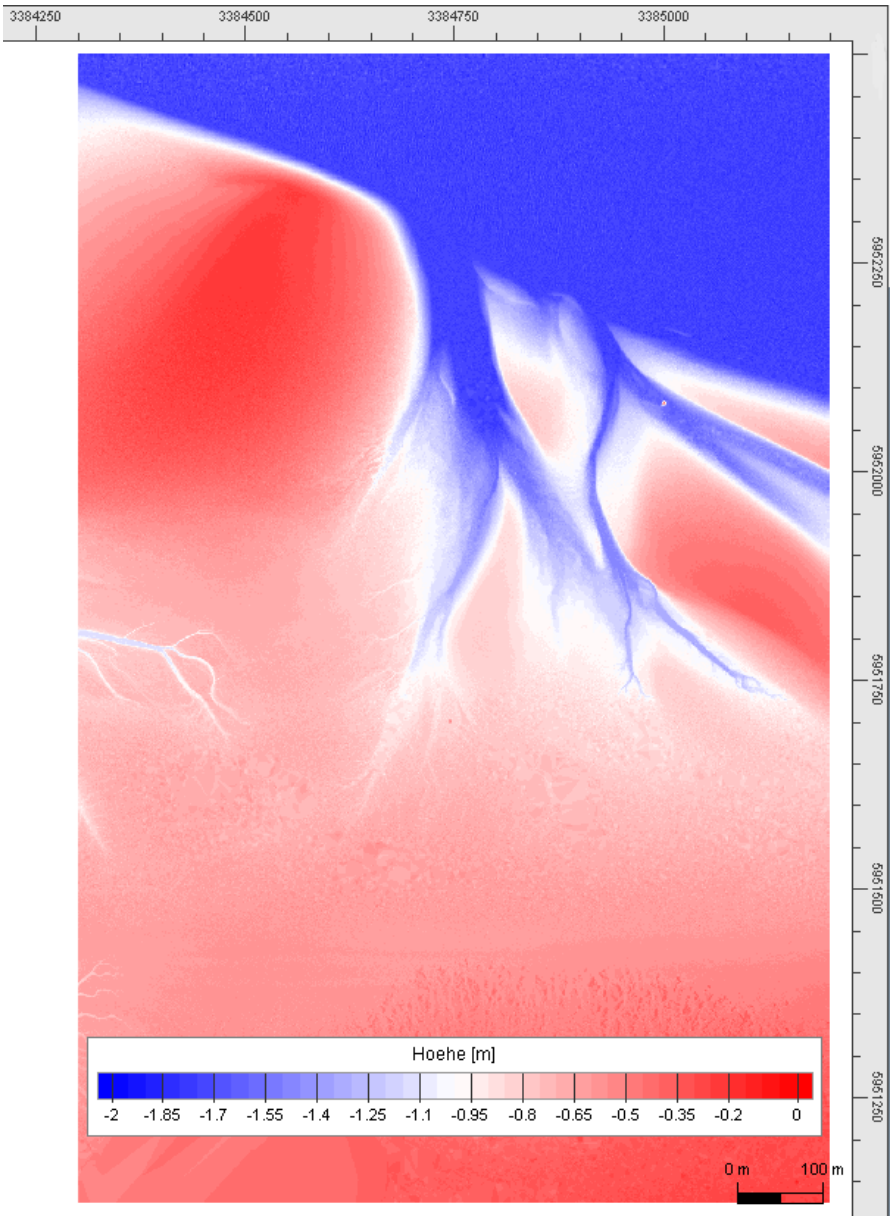

Abbildung 4.1: Testgebiet 1 - DGM aus dem Laserscanner-datensatz von 2013

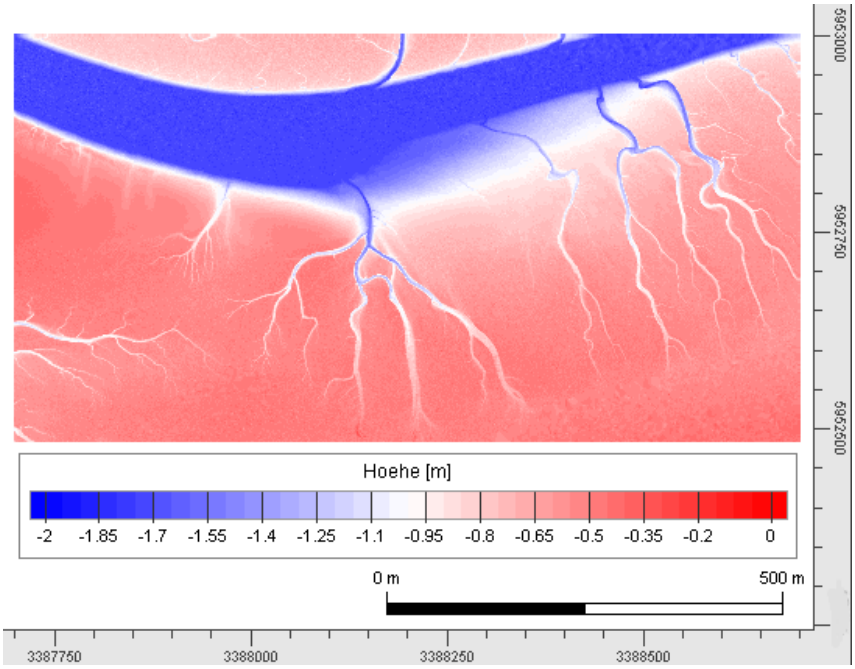

Abbildung 4.2: Testgebiet 2 - DGM aus dem Laserscanner-datensatz von 2013

4.2 Höhenänderungen aus Differenzen-DGMs

Die Höhenmodelle sollen für ein Monitoring des Watts verwendet werden. Zielsetzung dabei ist es, das Gelände zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu erfassen und auf mögliche Änderungen zu untersuchen. Damit die Laserscannerdaten bzw. die generierten digitalen Geländemodelle verglichen werden können, werden die Datensätze zunächst in ein einheitliches Koordinatensystem transformiert. Für alle weiteren Analysen der ALS-Daten ist das Koordinatensystem für die Lage das DHDN, Gauß-Krüger-Abbildung (3. Streifen), für die Höhe das DHHN92. Durch die übereinstimmenden Gitterweiten sowie die identischen Ausdehnungen der zwei Testgebiete, ist eine „einfache“ Differenzbildung der jeweiligen Geländemodelle möglich. Hierfür wird jeweils der ältere von dem neueren Datensatz subtrahiert, um Änderungen der Topographie zu detektieren. Auf diese Weise ist es möglich, flächendeckend Änderungen in der Höhe zu detektieren und das Gelände hinsichtlich Sedimentation und Erosion zu untersuchen.

Es liegen insgesamt drei Datensätze aus dem flugzeuggestützten Laserscanning mit einer maximalen Zeitspanne von drei Jahren vor. Somit lassen sich zwar keine langfristigen Änderungen ableiten, jedoch sind in einem Gebiet wie dem Wattenmeer auch über recht kurze Dauer deutliche Unterschiede in der Topographie zu erwarten. Mithilfe der Datensätze ist es möglich, nicht nur Informationen über die Änderung zwischen den Jahren 2010 und 2013 zu erhalten, sondern auch die Entwicklung inmitten der zwei Epochen im Jahr 2012 kann weitere Aufschlüsse liefern. Darüber hinaus kann auch geschaut werden, in welchem Zeitabschnitt die Änderungen minimal bzw. maximal sind.

4.3 Anwendung eines Kantenoperators

Eine weitere Möglichkeit, markante Geländestrukturen zu detektieren, bieten bildbasierte Kantenoperatoren. Durch die Anwendung eines Hochpassfilters auf die Geländemodelle werden Kanten gewonnen. In Wattgebieten werden diese insbesondere durch Prielkanten repräsentiert. Diese sind Änderungen unterworfen und daher für ein Monitoring von besonderem Interesse. Über den Vergleich zu unterschiedlichen Zeitpunkten können Aussagen bezüglich Verlagerungen der Priele getroffen werden.

Die Analysen auf Grundlage eines Kantenoperators erfolgen mit dem Sobel-Operator. Dieser Filter detektiert Kanten, indem die erste Ableitung der Bildpunkt-Helligkeitswerte gebildet und zusätzlich orthogonal zur Richtung der Ableitung geglättet wird. Innerhalb des Wattenmeeres wird es hauptsächlich im Bereich von Prielkanten zu großen Grauwertunterschieden

kommen. Dies ist der Fall, da die Priele tiefer als die Umgebung sind, sodass diese im Bild im Vergleich zur Nachbarschaft dunkler dargestellt werden.

Innerhalb dieser Arbeit wird der Sobel-Operator, wie er in Matlab implementiert ist, verwendet. Dieser verfügt zusätzlich noch über einen Schwellwert, welcher auf das Gradientenbild angesetzt wird. Alle Pixel oberhalb dieses Schwellwertes werden als Ergebnis in einem Binärbild ausgegeben. Je niedriger der Schwellwert gewählt wird, desto mehr Kanten werden im Bild gefunden. Für die nachfolgenden Untersuchungen wird dieser jeweils angepasst, sodass die wichtigsten Prielstrukturen erkannt werden können. Wird der Schwellwert zu niedrig gewählt, so werden neben den erwünschten Prielkanten auch noch viele weitere Kanten, die nicht von Prielen stammen, detektiert. Entsprechend liefert die Wahl eines zu niedrigen Schwellwertes zu wenige Kanten. Aus diesem Grund gilt es, diesen Wert entsprechend der Geländebeschaffenheit zu wählen, was im Folgenden manuell für die jeweiligen Geländeausschnitte durchgeführt wird.

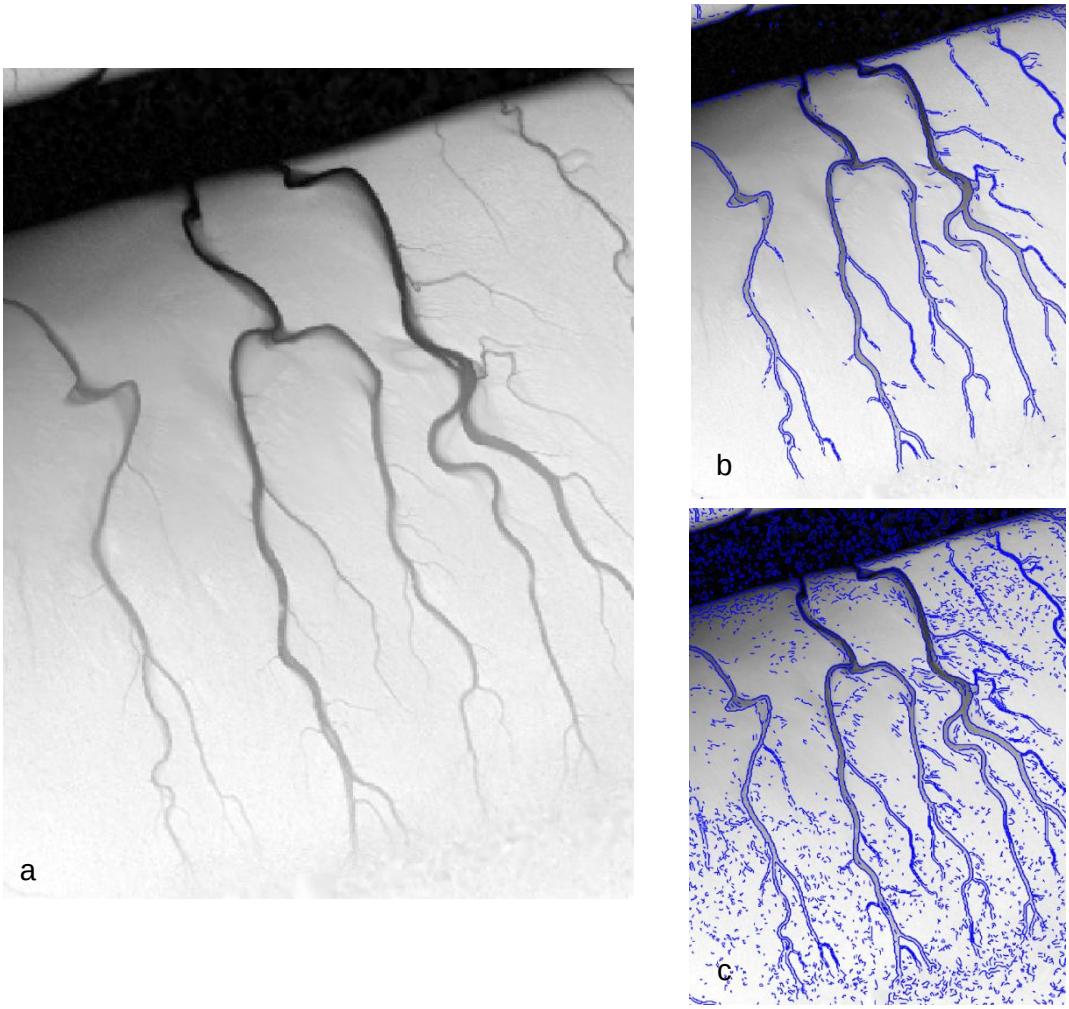

Abbildung 4.3:
Detektierte Kanten (blau) des Sobel-Operators
(a: Übersicht des Gebietes, b: hoher Schwellwert, c: niedriger Schwellwert)

Abbildung 4.3 zeigt die vom Sobel-Operator detektierten Kanten für ein frei gewähltes Gebiet und soll den Einfluss des unterschiedlich gewählten Schwellwertes auf die gefundenen Kanten verdeutlichen. Abbildung 4.3a ist ein DGM, welches gut die dunkleren Priele im Vergleich zur helleren Umgebung hervorhebt. Für Abbildung 4.3b wurde ein hoher Schwellwert gewählt. Gegenübergestellt ist Abbildung 4.3c mit einem vergleichsweise niedrigen Schwellwert. Folglich werden in letzterer Abbildung deutlich mehr Kanten gefunden und auch solche, die nicht explizit zu Prielstrukturen gehören und für Untersuchungen von Prielveränderungen nicht von Bedeutung sind.
Aus den detektierten Kanten und den Differenzbildungen der einzelnen digitalen Geländemodelle (Kap. 4.2) lassen sich flächenhafte Rückschlüsse aus etwaigen Veränderungen im Wattenmeer ziehen. Zu diesen zählen zum Beispiel die Verlagerung der Prielverläufe und auch Ab- bzw. Zunahmen des Sedimentes im Watt, welche wiederum für das Monitoring von Bedeutung sind.

4.4 Untersuchungen von GPS-Daten

Die GPS-Daten liegen als weitere Höheninformation zu einem vierten Zeitpunkt vor. Da die Punktdichte dieser Daten verglichen mit der der Laserscannerdaten gering ist, kann das Wattenmeer, anders als bei den ALS-Daten, nicht flächenhaft erfasst werden und die Generierung eines digitalen Geländemodells ist nicht möglich. Ein Vergleich mit den Laserscannerdaten ist aus diesem Grund nur punktuell realisierbar, sodass Analysen im Hinblick auf mögliche Änderungen der Wattenmeertopographie aus den punkthaften Vergleichen abzuleiten sind.
Generell erfolgt auch hier eine Analyse der GPS-Daten auf Grundlage von Differenzbildungen, wobei die GPS-Höhen von den ALS-Höhen subtrahiert werden. Da die GPS-Messungen jedoch nur punktuell und nicht in einem regelmäßigen Raster vorliegen, fallen die Gitterpunkte des digitalen Geländemodells in der Regel nicht mit den Positionen der GPS-Daten zusammen. Aus diesem Grund werden die Höhenwerte des digitalen Geländemodells mittels bilinearer Interpolation bestimmt, sodass für jede GPS-Messung eine Höhe aus den Laserscannerdaten an der jeweiligen Position vorhanden ist. Bei der bilinearen Interpolation werden Zwischenwerte (Höhen) einen regulären, zweidimensionalen Rasters (DGM) bestimmt. Sie stellt eine Erweiterung der linearen Interpolation dar. Abhängig von der Position des gesuchten Punktes innerhalb des Rasters bekommt dieser einen neuen Wert, welcher sich aus den vier Nachbarhöhen der Gitterpunkte bestimmen lässt. Je näher

sich der zu interpolierende Punkt an einem Punkt des Rasters befindet, umso stärker wird die Höhe dieses Rasterpunktes ins Gewicht fallen (Abb. 4.4).

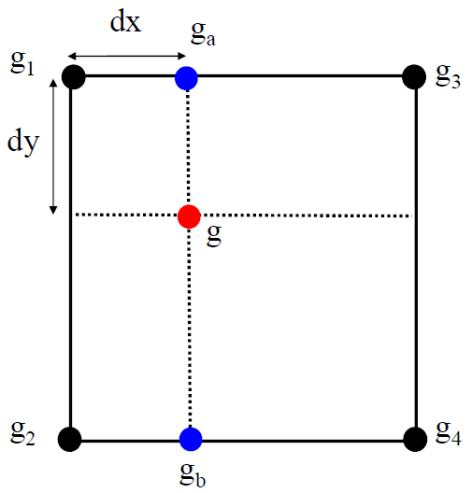

Abbildung 4.4: Prinzip der bilinearen Interpolation [Sörgel, 2013b]

Da sowohl ALS- als auch GPS-Daten aus dem Jahr 2013 vorliegen, ist ein Vergleich zwischen den beiden Aufnahmearten aus dieser Epoche sinnvoll, da die Wahrscheinlichkeit topographischer Änderungen im Wattenmeer mit dem Alter der ALS-Daten zunimmt. Hierfür werden die GPS-Messungen von den interpolierten Laserscannerdaten subtrahiert.

5 Analyse der Ergebnisse

Im Folgenden werden die in Kapitel 4 dargestellten Methoden auf die Datensätze aus Kapitel 3 angewendet.
Dabei erfolgt zunächst eine Analyse der Laserscannerdaten. Ausgehend von den aus den ALS-Daten generierten digitalen Geländemodellen werden Differenzbildungen durchgeführt und ein Kantenoperator zur Detektion der Kanten angewendet. Im Anschluss wird die Auswertung der GPS-Daten durchgeführt.

In den zwei folgenden Kapiteln 5.1 und 5.2 werden Untersuchungen für die Testgebiete 1 und 2 vorgestellt.
Die Kapitel 5.1.1 bis 5.1.4 beziehen sich ausschließlich auf Analysen des ersten Testgebietes im Hinblick auf Differenzbildungen zwischen den Epochen. Die Untersuchungen sind hier sehr ausführlich dargestellt. Kapitel 5.1.5 beschäftigt sich mit den Epochenvergleichen auf Grundlage des Sobel-Operators. Kapitel 5.1.6 fasst die wesentlichen Ergebnisse, die aus den Untersuchungen gewonnen wurden, übersichtlich zusammen.
Die Analysen für Testgebiet 2 werden nicht in dem Umfang, wie es für Testgebiet 1 geschehen ist, durchgeführt. Hier werden die wesentlichen Veränderungen kürzer, aber ebenfalls auf Grundlage der Differenzbildungen und dem Kantenoperator, untersucht. Kapitel 5.2.1 und 5.2.2 beschäftigen sich mit den Epochenvergleichen, wobei diese bei ersterem Kapitel auf Grundlage der Differenzbildungen durchgeführt werden. In Kapitel 5.2.2 erfolgt die Betrachtung mithilfe eines Kantenoperators. Eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse des zweiten Testgebietes gibt Kapitel 5.2.3.

Die Analyse der GPS-Daten wird im Kapitel 5.3 beschrieben. Hier werden ebenfalls beide Testgebiete gesondert voneinander betrachtet (Kap. 5.3.1 und 5.3.2). Eine Zusammenfassung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 5.3.3.

5.1 Testgebiet 1

5.1.1 Epochenvergleich 2012-2010

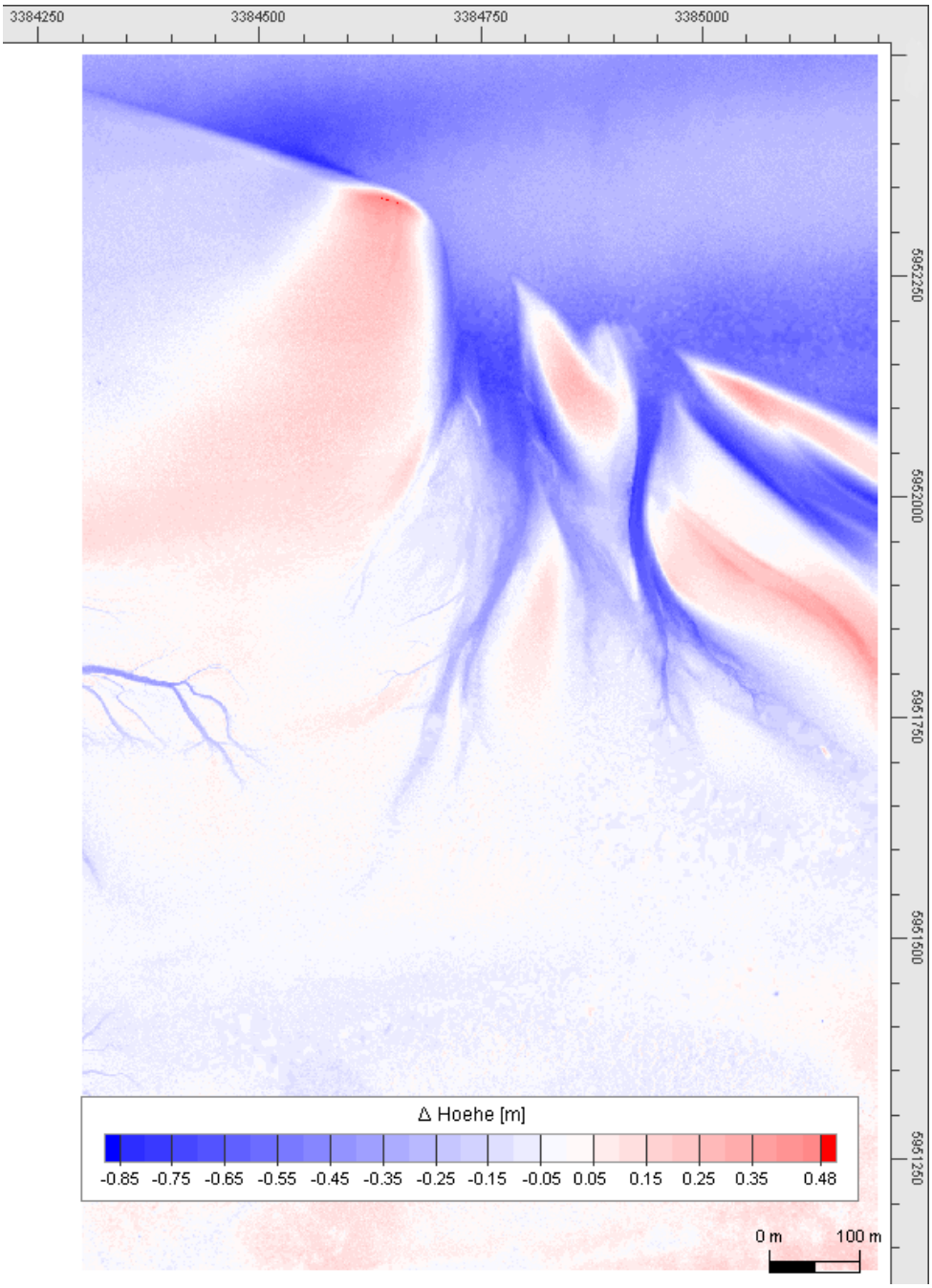

Abbildung 5.1:
Höhendifferenzen zwischen den Epochen 2012 und 2010

Abbildung 5.1 zeigt die Differenzen in der Höhe zwischen dem Laserscannerdatensatz von 2012 und dem von 2010. Die Farbcodierung ist von blau über weiß nach rot gewählt. Die Farbe Weiß steht für keine Änderung in der Höhe. Je dunkler der Blauton wird, desto stärker ist die Höhen- bzw. Volumenabnahme. Rot steht für eine Volumenzunahme.

Die maximale Höhenzunahme beträgt 0,48 m und die maximale Höhenabnahme -0,85 m. Im Mittel kommt es zu einer Abnahme in der Höhe von -0,10 m.
Tabelle 5.1 fasst die wesentlichen Größen zusammen.

Höhenänderung Δh [m]	
Maximum	0,48
Minimum	-0,85
Mittelwert	-0,10

Tabelle 5.1:
Kenngrößen der Differenzbildung 2012-2010

Die größte Zunahme in der Höhe von fast 0,50 m ist vor dem ersten Ausläufer des Hauptarms an dessen südlicher Prielkante auf einer Länge von knapp 100 m festzustellen. Auch der Bereich südlich dieser Stelle und westlich vom ersten Ausläufer zeichnet sich durch eine Sedimentzunahme aus. Ausgehend vom Maximum der Höhenänderung in südlicher Richtung nimmt diese zunächst recht schnell ab und liegt für den restlichen „roten“ Bereich in der Größenordnung von ca. 0,15 m. Insgesamt erstreckt sich dieser im Testgebiet dargestellte Bereich auf eine Fläche von ca. 0,1 km². Weitere Sedimentzunahmen sind zwischen dem ersten und zweiten Ausläufer und östlich des zweiten Ausläufers südlich des Hauptarms vorhanden. Der hiervon südlich gelegene Bereich weist auf einer ca. 20 m breiten Spur, welche von Nordwesten nach Südosten verläuft, Höhenwerte von 0,30 bis 0,40 m auf. Eine weitere, etwas kleinere Sedimentzunahme mit bis zu 0,15 m ist südlich zwischen den zwei Nebenarmen des ersten Ausläufers vorhanden.
Der zweite Ausläufer unterteilt sich in einen nach Südost und einen in südliche Richtung verlaufenden Nebenarm. Auffällig sind die starken Höhenabnahmen von bis zu -0,85 m für den nach Südosten verlaufenden Nebenarm (insbesondere im südlichen Bereich auf einer Länge von 150 m). Ähnlich verhält es sich auch mit dem anderen Nebenarm. Auf einer Länge von 200 m, kurz nach der Aufteilung des Ausläufers, sind Änderungen der Höhe im Bereich von -0,70 m festzustellen. Dies und die Tatsache, dass in beiden Fällen Sedimentzunahmen nordöstlich bzw. östlich der eben beschriebenen Höhenabnahmen auftreten, lässt vermuten, dass es jeweils zu einer Prielverlagerung in Richtung der negativen Höhenänderung gekommen ist.
Weiterhin sind geringe Sedimentabnahmen in der Größenordnung von ca. -0,10 bis -0,25 m im nordwestlichen Bereich der 0,1 km² großen Fläche vorhanden. Auch zu erkennen sind die immer kleiner werdenden Höhenabnahmen zum Ende der Ausläufer und den davon

abgehenden Armen hin. Dieses zeigt sich auch bei den kleineren Seitenarmen, die westlich in das Testgebiet „einfließen“.

5.1.2 Epochenvergleich 2013-2012

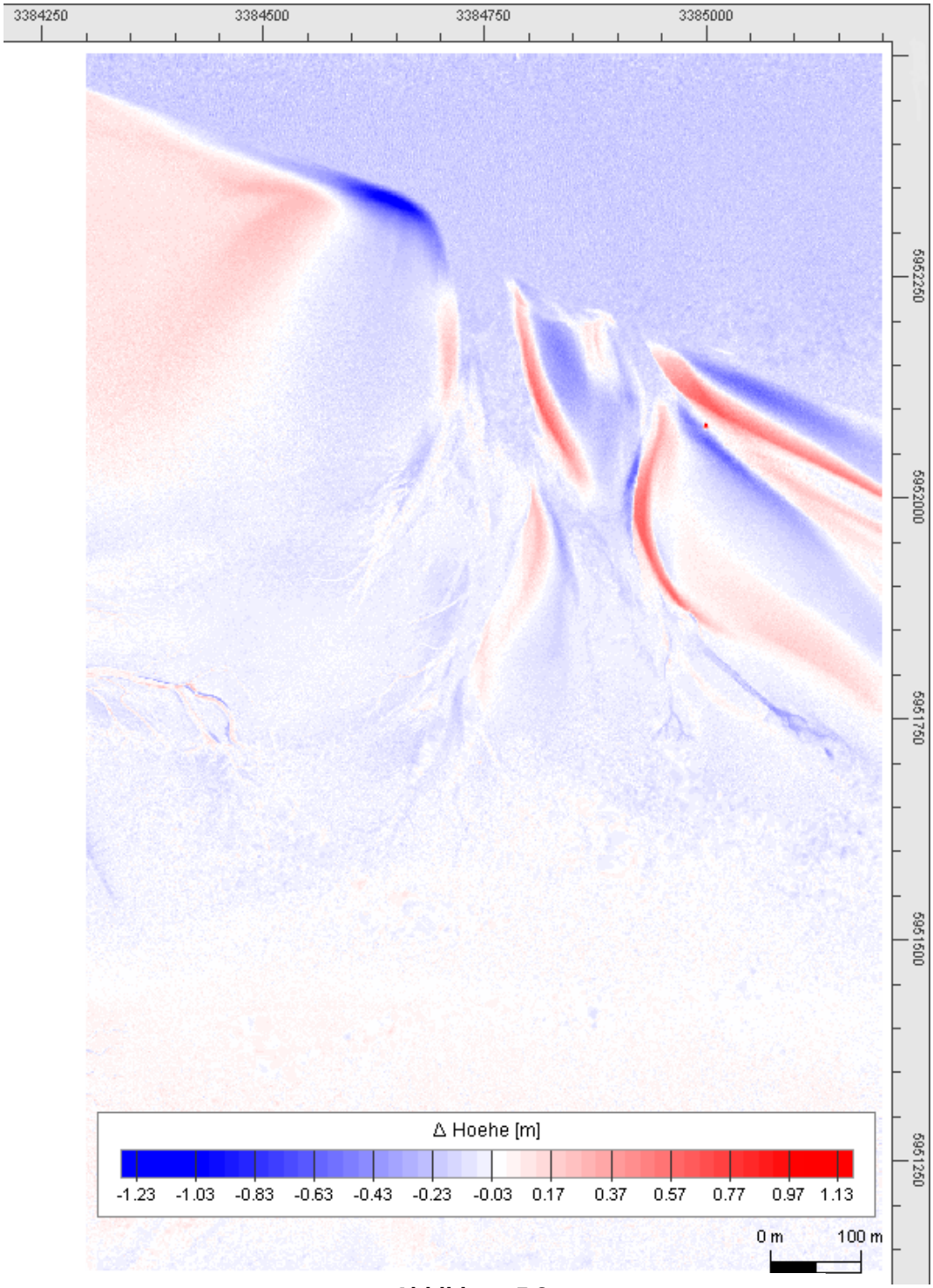

Abbildung 5.2:
Höhendifferenzen zwischen den Epochen 2013 und 2012

Abbildung 5.2 stellt die Differenzbildung der Datensätze aus den Laserscanneraufnahmen zwischen den Epochen 2013 und 2012 dar. Die Farbcodierung wurde analog zu Kapitel 5.1.1 gewählt. Der tiefste Blauton steht für die stärkste Höhenabnahme. Die größte Zunahme in der Höhe wird durch das kräftigste Rot ausgedrückt.

Es ist eine maximale Höhenzunahme von 1,13 m zu verzeichnen. Anzumerken ist, dass dieser Wert sich nicht auf Veränderungen der Wattenmeeroberfläche bezieht. Abbildung 5.2 zeigt einen kleinen Bereich, in welchem die maximalen Höhenänderungen auftreten. Dieser befindet sich im östlicheren Ausläufer des Hauptarms und hier in dem Nebenarm, der sich in südöstliche Richtung ausbreitet knapp oberhalb eines Bereiches von starker Höhenabnahme. Hierbei handelt es sich möglicherweise um ein kleines Schiff, jedoch lässt sich dies nur vermuten. Wird dieser Bereich nicht berücksichtigt, ergibt sich ein Wert von 0,67 m.

Für die Höhenabnahme liegt der maximale Wert bei -1,23 m. Die mittlere Änderung beträgt für diese Untersuchung -0,04 m. Somit ist insgesamt eine leichte Abnahme in der Höhe festzustellen (Tabelle 5.2).

Höhenänderung Δh [m]	
Maximum	(1,13) 0,67
Minimum	-1,23
Mittelwert	-0,04

Tabelle 5.2:
Kenngrößen der Differenzbildung 2013-2012

Wird das gesamte Testgebiet betrachtet, so kommt es zu geringeren Variationen in der Höhe. Hiermit sind nicht die maximalen bzw. minimalen Höhenänderungen gemeint, sondern es existieren mehr Flächen, in denen keine oder nur sehr geringe Änderungen von $\pm$0,10 m auftreten. Da die hier betrachtete Differenzbildung eine Zeitspanne von weniger als einem Jahr abdeckt, ist im Allgemeinen von weniger Veränderungen im Wattenmeer auszugehen. Dies wird auf der einen Seite bestätigt, auf der anderen Seite fallen die vereinzelt sehr großen Änderungen der Höhe sowohl in positiver als auch in negativer Richtung auf.

Drei Bereiche zeichnen sich durch eine starke Sedimentzunahme in der Größenordnung von bis zu 0,67 m mit je einer Tiefe von ungefähr 15 m aus. Das erste Gebiet befindet sich an der östlichen Prielkante des westlicheren Ausläufers und weist eine süd(östliche) Ausdehnung über eine Distanz von mehr als 200 m auf. Der nächste Bereich liegt ebenfalls östlich des zweiten Ausläufers mit einer südöstlichen Ausrichtung. Letzter Bereich breitet sich hauptsächlich von Norden nach Süden auf einer Länge von ebenfalls 250 m aus und ist

zwischen den zwei Nebenarmen des zweiten Ausläufers zu finden. Anhand dieser Information lässt sich vermuten, dass es westlich vom ersten Bereich zu einer Verschmälerung des ersten Ausläufers gekommen ist. Auch auf der westlichen Seite kann eine geringe Höhenzunahme erfasst werden, sodass der Ausläufer auf beiden Seiten vermutlich schmaler geworden ist. Durch die Gebiete starker Höhenabnahme, die sich für den zweiten und dritten Bereich südlich bzw. südwestlich mit selbiger Orientierung befinden, kann vermutet werden, dass es in Richtung der Höhenabnahme primär zu einer Prielverlagerung, gegebenenfalls zusätzlich auch noch zu einer Verschmälerung gekommen ist. Die vermutete Verlagerung läge für das zweite Gebiet in der Größenordnung von 20 m für den nördlicheren Bereich und bis zu 60 m für den südlicheren Bereich. Für den dritten Bereich würde diese mit rund 20 m geringer ausfallen. Bereits für den Epochenvergleich der zwei vorherigen Jahre konnte dieser Trend der Prielverlagerung insbesondere für den zweiten Bereich beobachtet werden (Abb. 5.1).

Ebenfalls hat die Differenzbildung der Epochen 2012 und 2010 bereits gezeigt, dass es zwischen den zwei Nebenarmen des östlicheren Ausläufers im südlicheren Bereich zu einer Sedimentzunahme kommt. Auch diese Entwicklung kann für die Differenzbildung 2013-2012 beobachtet werden. Desweiteren lässt die Sedimentzunahme in Form einer „Spitze“ südlich zwischen den zwei Nebenarmen des ersten Ausläufers, welche auch in Kapitel 5.1.1 festzustellen ist, vermutlich auf schmaler werdende Priele schließen.

Bereiche, in denen sich der Trend der zwei Vorjahre nicht fortgesetzt hat, sind vor allem westlich des ersten Ausläufers und nördlich zwischen den Ausläufern zu finden. Im Wesentlichen haben sich hier die „Entwicklungen“ der beiden großen Flächen westlich des ersten Ausläufers hinsichtlich der Höhenabnahme bzw. –zunahme umgekehrt. Die ca. 0,1 km² große Fläche weist nun Höhenabnahmen von -0,10 m auf, der nordwestlich hiervon befindliche Bereich Höhenzunahmen von 0,10 bis 0,25 m. Auch das Gebiet nördlich zwischen den beiden Ausläufern zeigt nun eine Höhenabnahme.

Der Bereich an der südlichen Prielkante westlich des ersten Ausläufers unterliegt in dieser Epoche der stärksten Höhenabnahme von bis zu -1,23 m bei einer Ausdehnung von guten 100 m.

5.1.3 Epochenvergleich 2013-2010

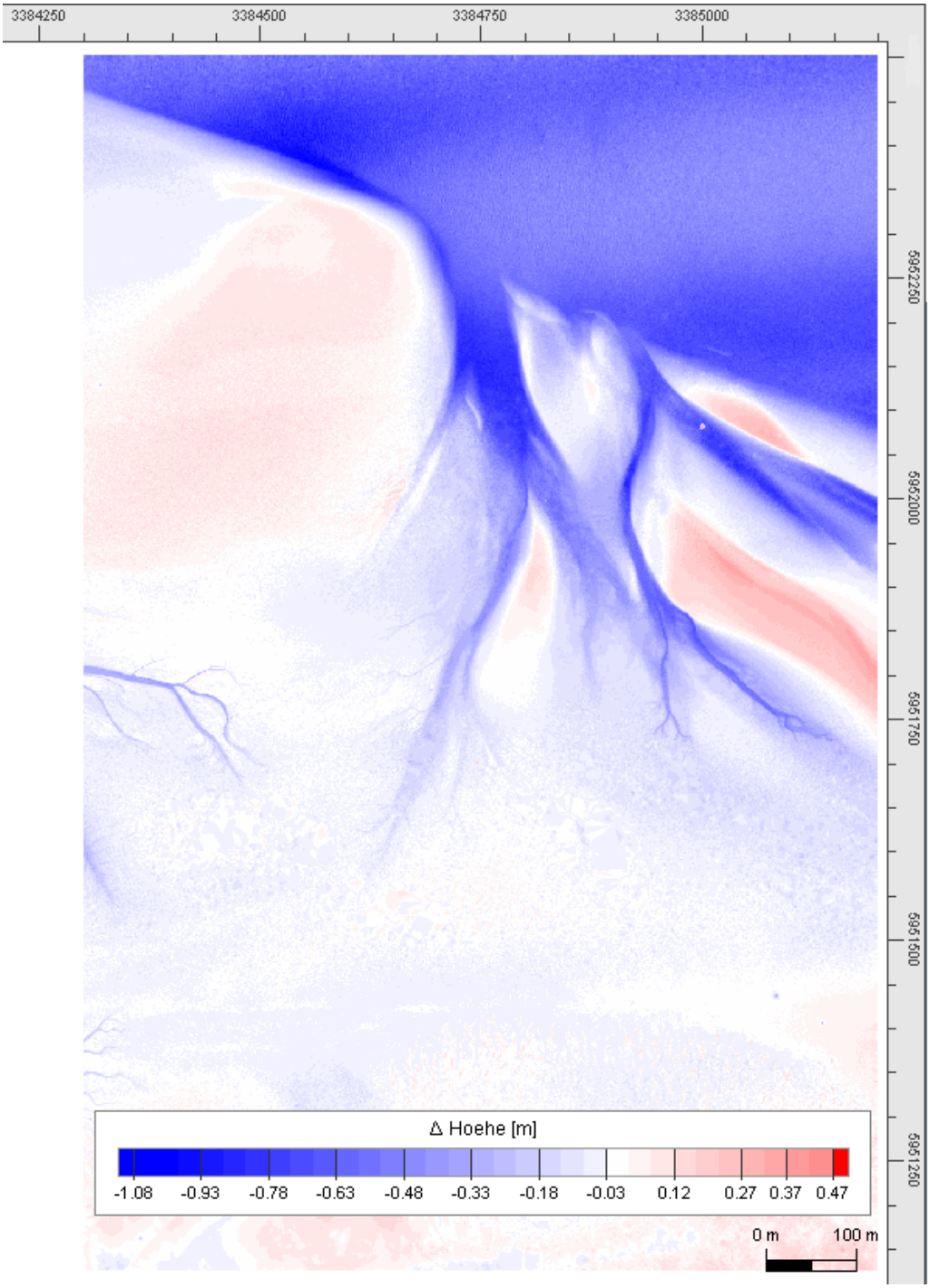

Abbildung 5.3:
Höhendifferenzen zwischen den Epochen 2013 und 2010

Abbildung 5.3 stellt die Höhendifferenzen der Epochen 2013 und 2010 dar. Die Farbcodierung wurde wie bei den zwei Betrachtungen zuvor von blau über weiß nach rot gewählt.

Die maximale Höhenzunahme beträgt 0,47 m und die maximale Höhenabnahme -1,08 m. Wie in Kapitel 5.1.2 muss die maximale Höhenänderung wegen des kleinen Bereiches

innerhalb des südöstlich verlaufenden Nebenarms des zweiten Ausläufers auf 0,41 m korrigiert werden. Im Mittel ist eine Abnahme in der Höhe von -0,14 m zu verzeichnen.
Tabelle 5.3 zeigt die statistischen Kenngrößen.

Höhenänderung Δh [m]	
Maximum	(0,47) 0,41
Minimum	-1,08
Mittelwert	-0,14

Tabelle 5.3:
Kenngrößen der Differenzbildung 2013-2010

Da bei dieser Betrachtung die gesamte Zeitspanne von drei Jahren betrachtet wird, stellt Abbildung 5.3 im Wesentlichen die Entwicklung von 2010 über 2012 zur Epoche 2013 zusammenfassend dar.
Gebiete, die in den beiden vorherigen Differenzbildungen eine ähnliche Entwicklung gezeigt haben, werden diese auch hier aufweisen. Das heißt Bereiche mit stetiger Sedimentzunahme bzw. –abnahme werden auch bei diesem Epochenvergleich selbiges Verhalten aufweisen. Abhängig von der Stärke der Höhenvariation zwischen den zwei Betrachtungen in Kapitel 5.1.1 und 5.1.2 werden die jeweiligen Bereiche in Abbildung 5.3 „eingefärbt“ sein.
Zu Sedimentzunahmen ist es vor allem in drei Bereichen über den gesamten Betrachtungszeitraum gekommen. Zwar haben sich Größe und Form verändert, jedoch lassen sich das Gebiet südlich des ersten Ausläufers zwischen den beiden Nebenarmen und die Bereiche nördlich und südlich des südöstlich verlaufenden Nebenarms des zweiten Ausläufers, wiedererkennen.
Der westliche Bereich des ersten Ausläufers zeigt auf einer Fläche von 0,12 km² überwiegend leichte Höhenzunahmen in der Größenordnung von bis zu 0,10 m. Das Gebiet zwischen den Ausläufern, welches bei der Betrachtung der Höhendifferenzen von 2012-2010 eine Sedimentzunahme und im darauffolgenden Jahr eine Sedimentabnahme erfahren hat, zeigt nun ebenfalls Abnahmen auf.
Die Vermutungen hinsichtlich Prielverschmälerungen oder –verlagerungen werden in Kapitel 5.1.4 auf Basis der Differenzbildungen näher untersucht.

5.1.4 Detaillierte Betrachtung der Prielveränderungen

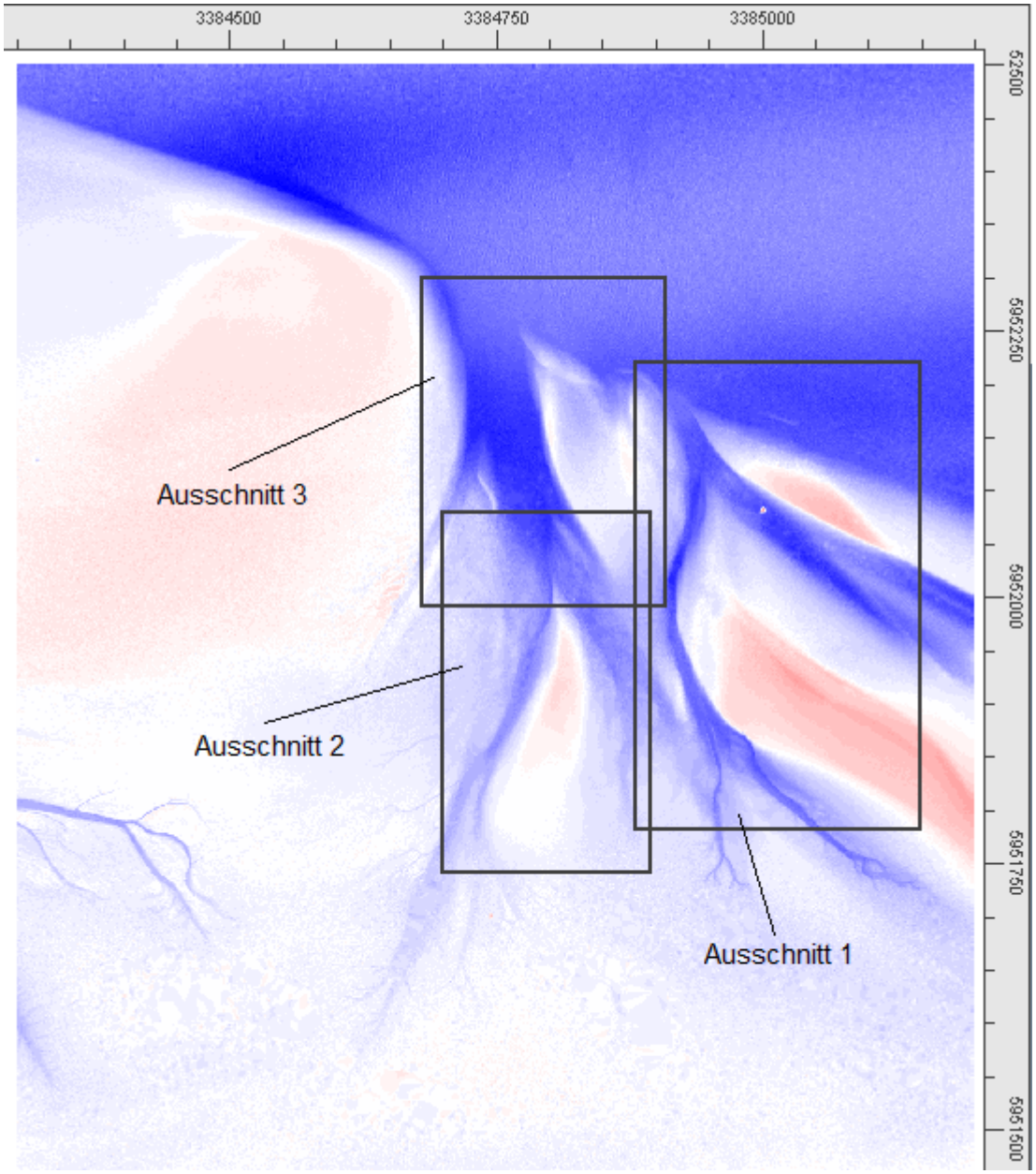

Abbildung 5.4:
Überblick aller Ausschnitte

Abbildung 5.4 gibt einen Überblick der Gebiete, in denen auf Veränderungen der Priele auf Grundlage der zuvor analysierten Ergebnisse zu schließen ist. Es handelt sich hierbei um die Darstellung der Differenzen zwischen den Epochen 2013 und 2010, wobei diese lediglich exemplarisch gewählt wurde. Bei den Veränderungen wird es sich entweder um Prielverlagerungen oder um Prielverschmälerungen handeln.

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Ausschnitte für alle Differenzbildungen dargestellt und verglichen. Bereits der visuelle Vergleich der Ausschnitte ermöglicht es, Informationen über mögliche Änderungen zu gewinnen. Eine Überlagerung zweier Differenzbildungen liefert weitere Aufschlüsse.

5.1.4.1 Ausschnitt 1

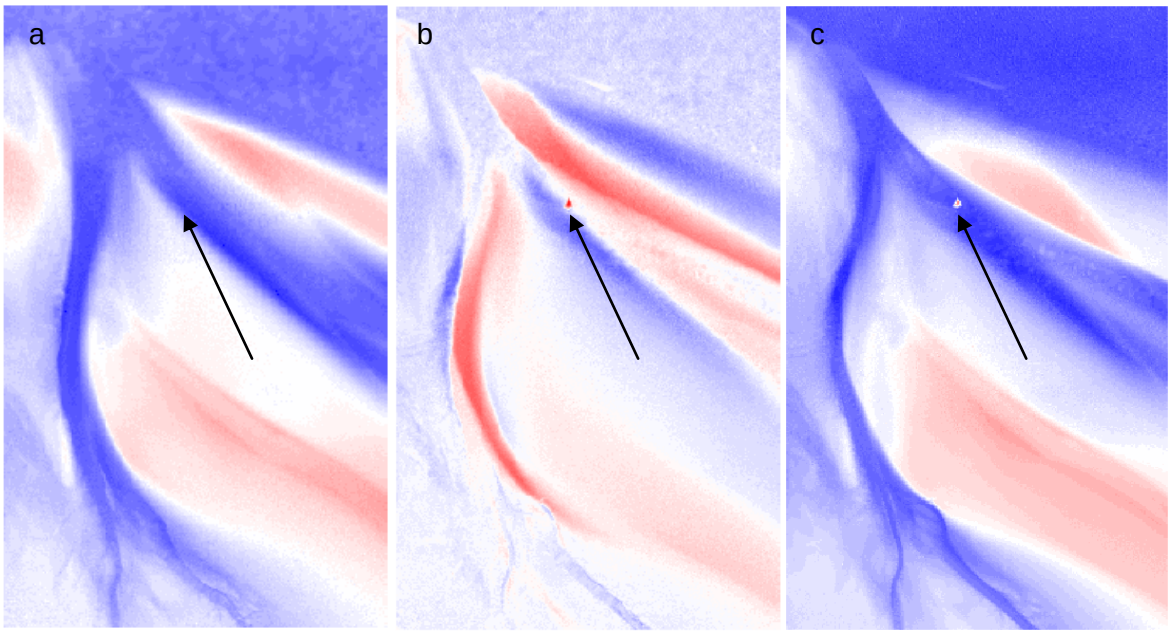

Abbildung 5.5:
Ausschnitt 1 des Testgebietes für Differenzbildungen zwischen den Epochen
(a: Epoche 2012-2010, b: Epoche 2013-2012, c: Epoche 2013-2010)

Abbildung 5.5 zeigt Ausschnitte des Testgebietes für die Differenzbildungen aus Kapitel 5.1.1 bis 5.1.3 in selbiger Reihenfolge.

Der visuelle Vergleich der drei Teilabbildungen lässt auf die angesprochenen Prielverlagerungen und Verschmälerungen schließen. Insbesondere die Verlagerung in westliche Richtung und die gleichzeitige Verschmälerung sind deutlich erkennbar. Auch die Verlagerung des zweiten Nebenarms in südöstliche Richtung ist vorhanden. Diese ist unter anderem anhand der schwarzen Pfeile zu erkennen, welche auf eine koordinatenmäßig gleiche Position zeigen. Als Anhaltspunkt diente hierbei die starke Höhenzunahme, die in Abbildung 5.5b durch den „rötlichen Punkt“ gekennzeichnet ist.

Abbildung 5.6 stellt die Überlagerung der Abbildungen 5.5a und 5.5c dar, wobei die Farbcodierung für letztere Abbildung nun von schwarz (tief) nach weiß (hoch) gewählt und teilweise transparent dargestellt wurde. Somit ist es in Teilbereichen gut möglich, die Verlagerung und Verschmälerung des Ausläufers festzustellen. Auffällig ist der Bereich östlich des Ausläufers, bevor sich dieser in die zwei Nebenarme aufteilt. Die Verschmälerung beträgt hier 50 m auf einer Distanz von ca. 70 m. In Abbildung 5.5b ist dieser Bereich durch eine starke Sedimentzunahme geprägt, sodass sich die Vermutung bestätigt. Das Gebiet der Höhenzunahme setzt sich in südöstliche Richtung fort. Insbesondere im ersten Teil des zweiten Nebenarms ist die Verlagerung in südöstliche Richtung von bis zu 20 m zu erkennen

(schwarzer Bereich). Der zuvor eher „gerade“ verlaufende westliche Nebenarm macht nun einen Knick nach Westen. Die Verlagerung ist im Bereich des Knickes, wie auch in Abbildung 5.6 zu erkennen, maximal. Sie beträgt ca. 15 m, wobei sich der Knick im Wesentlichen über eine Strecke von rund 80 m erstreckt. Verschmälerungen liegen in der Größenordnung von einigen Metern entlang des Nebenarms. Auf dem gesamten Bereich des Nebenarms sind große Höhenzunahmen zu verzeichnen (Abb. 5.5b), was die vermuteten Veränderungen ebenfalls bestätigt.

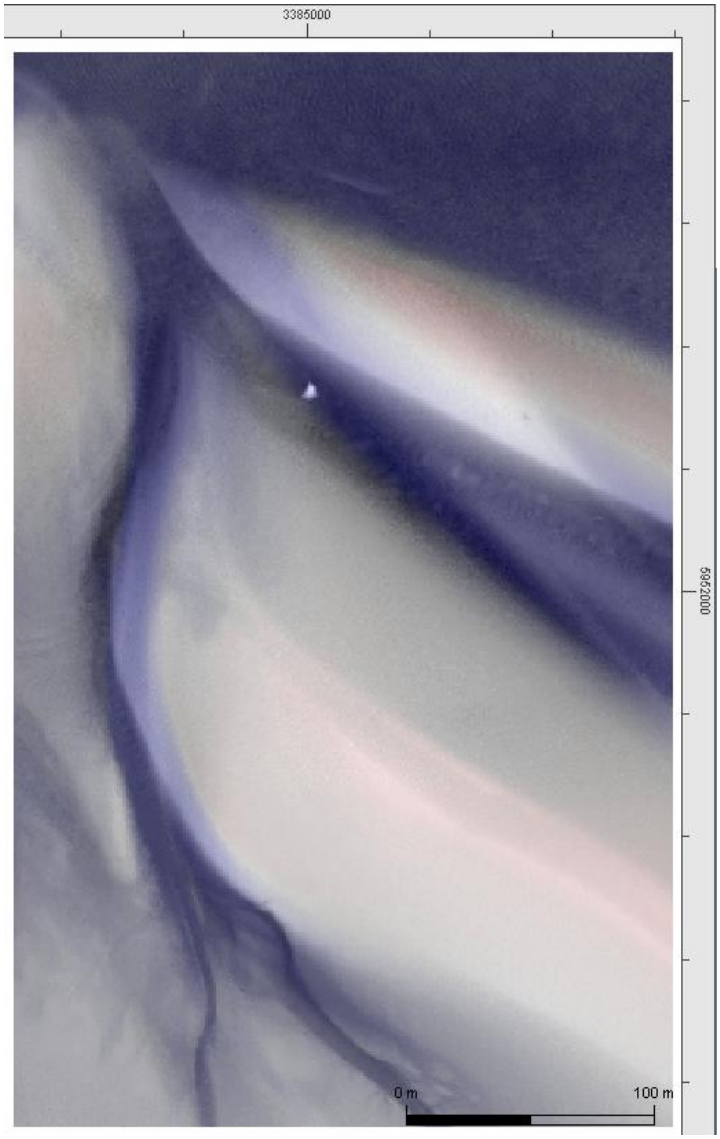

Abbildung 5.6:
Überlagerung der Differenzbildungen 2013-2010 mit 2012-2010

5.1.4.2 Ausschnitt 2

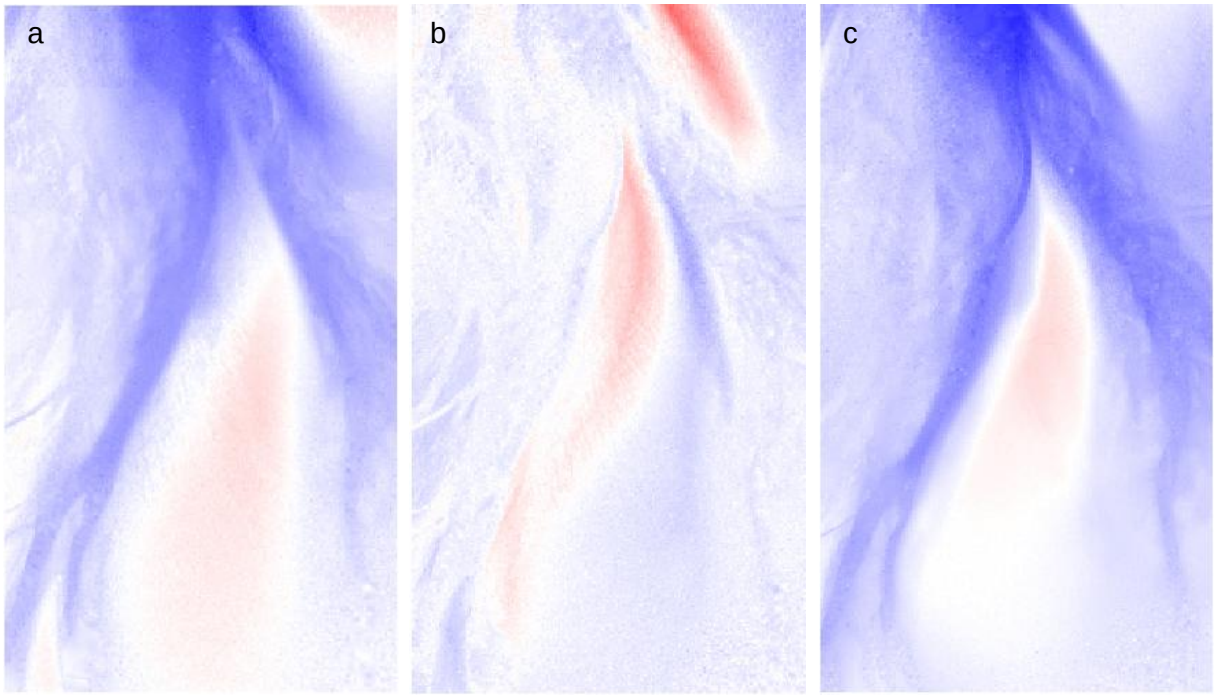

Abbildung 5.7:
Ausschnitt 2 des Testgebietes für Differenzbildungen zwischen den Epochen
(a: Epoche 2012-2010, b: Epoche 2013-2012, c: Epoche 2013-2010)

Abbildung 5.7 zeigt Ausschnitte des Testgebietes für die Differenzbildungen aus Kapitel 5.1.1 bis 5.1.3 in selbiger Reihenfolge.
Die Verlagerung der Sedimentzunahme in nördliche Richtung ist beim Vergleich der Abbildungen 5.7a und 5.7c deutlich zu erkennen. Somit handelt es sich hierbei hauptsächlich um eine Verlagerung und keine Verschmälerung, wie in Kapitel 5.1.2 vermutet. Jedoch wird es durch die in Richtung Norden größer werdende Sedimentzunahme im Bereich der Auftrennung des Ausläufers in zwei Nebenarme gewissermaßen zu einer Verschmälerung kommen.

In Abbildung 5.8 sind die Abbildungen 5.7a und 5.7c überlagert dargestellt. Die Farbgebung der Abbildung 5.7c verläuft analog zu Abbildung 5.5c von schwarz nach weiß. Wie weit sich der Bereich der Sedimentzunahme in Richtung Norden verlagert hat, ist der Überlagerung schwer zu entnehmen. Der weiße Bereich zwischen den Nebenarmen, in welchem eher im östlichen Bereich die Höhenzunahmen von 2010 bis 2012 zu erkennen sind (rötliches Gebiet), steht hier für die Sedimentzunahme. Die Verlagerung bewegt sich in der Größenordnung von 50 m.

Abbildung 5.8:
Überlagerung der Differenzbildungen 2013-2010 mit 2012-2010

5.1.4.3 Ausschnitt 3

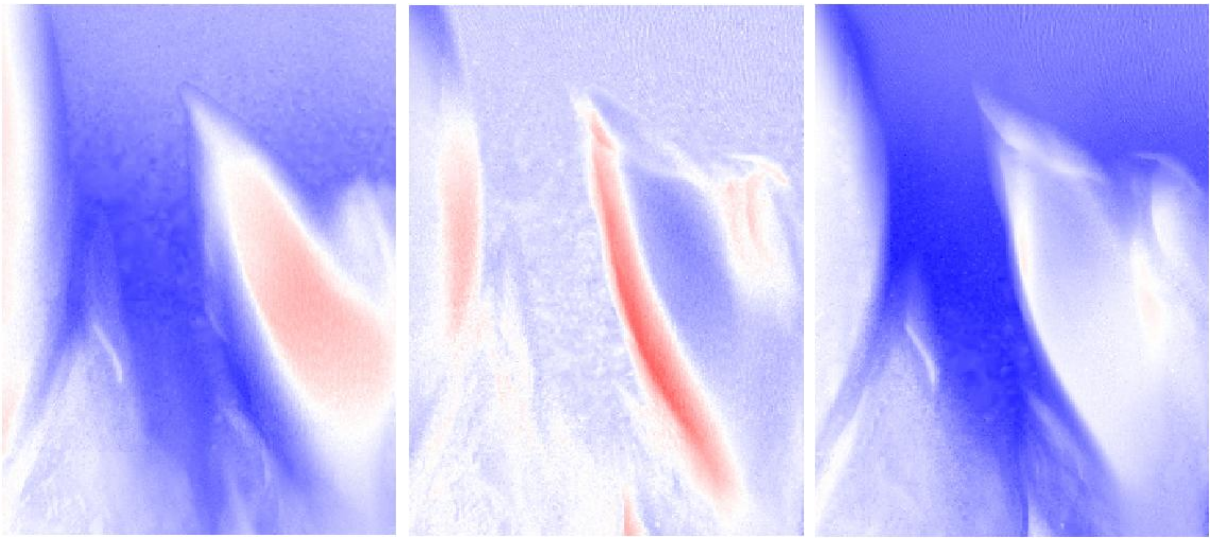

Abbildung 5.9:
Ausschnitt 3 des Testgebietes für Differenzbildungen zwischen den Epochen
(a: Epoche 2012-2010, b: Epoche 2013-2012, c: Epoche 2013-2010)

Abbildung 5.9 zeigt Ausschnitte des Testgebietes für die Differenzbildungen aus Kapitel 5.1.1 bis 5.1.3 in selbiger Reihenfolge.
Bereits der visuelle Vergleich der drei Teilabbildungen zeigt, dass es durch die Sedimentzunahmen auf beiden Seiten des Ausläufers (Abb. 5.9b) zu dessen Verschmälerung kommt. Diese wird im östlichen Bereich größer ausfallen, da hier die Fläche der Sedimentzunahme eine stärkere Nord-Süd-Ausdehnung aufweist.

Abbildung 5.10 zeigt die Überlagerung der Abbildungen 5.9a und 5.9c. Die Farbcodierung ist analog zu der aus den zwei vorherigen Kapiteln 5.1.4.1 und 5.1.4.2 gewählt. Gut zu erkennen ist der Bereich an der östlichen Ausläuferkante (bläulich), welcher aus der Differenzbildung 2012-2010 resultiert. Dieses Gebiet entspricht im Wesentlichen den Ausmaßen der Sedimentzunahme aus Abbildung 5.9b, das eine Länge von mehr als 200 m bei einer Tiefe von ungefähr 20 m aufweist. Neben dieser ist auch auf der westlichen Seite des Ausläufers die Verschmälerung zu erkennen. Sie besitzt eine Länge von guten 100 m mit einer Tiefe im Bereich von 15 m. Somit bestätigen sich die Vermutungen hinsichtlich der Verschmälerung des Ausläufers.

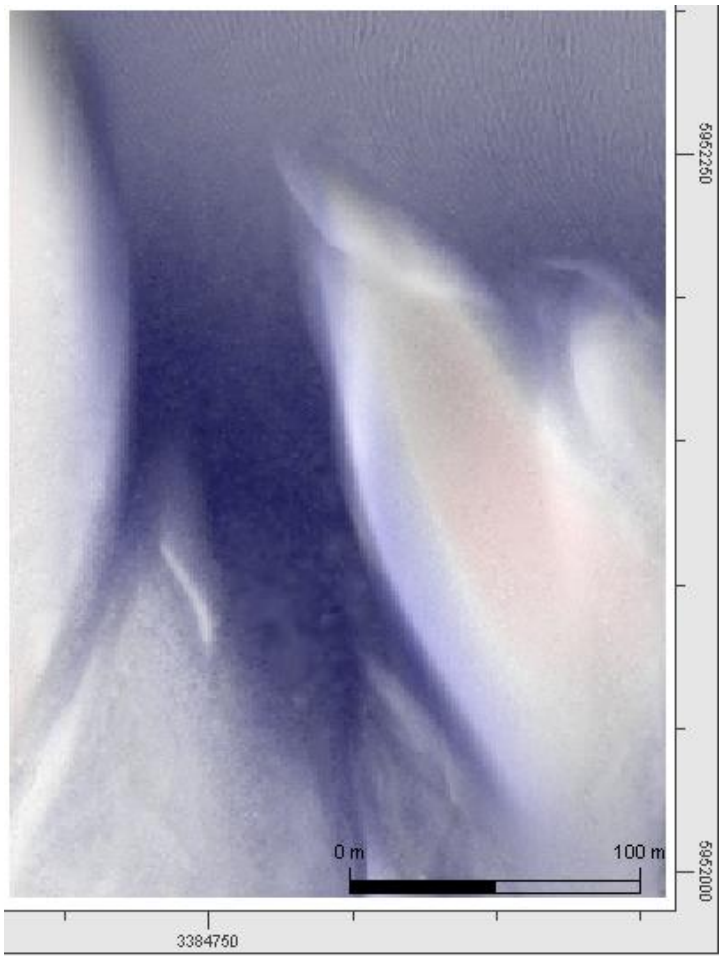

Abbildung 5.10:
Überlagerung der Differenzbildungen 2013-2010 mit 2012-2010

5.1.5 Epochenvergleiche mittels Kantenoperator

Der hier vorgestellte Ansatz stellt eine weitere Möglichkeit dar, Veränderungen im Wattenmeer zu detektieren. Durch die Anwendung eines Hochpassfilters auf die Geländemodelle werden Kanten gewonnen. Hierdurch kann die Lage der Kanten mit den Ergebnissen aus den vorherigen Kapiteln verglichen und etwaige Unterschiede und Gemeinsamkeiten ermittelt werden.

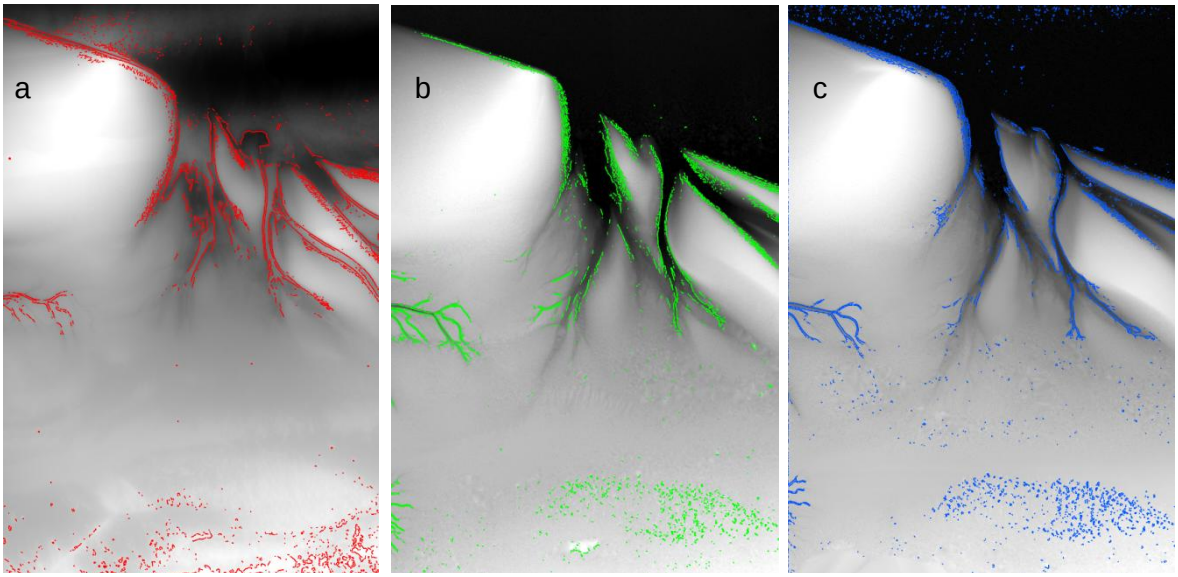

Abbildung 5.11:
Detektierte Kanten der digitalen Geländemodelle zu den drei Zeitpunkten
(a: Epoche 2010, b: Epoche 2012, c: Epoche 2013)

Abbildung 5.11 zeigt die jeweiligen Geländemodelle als Bilder mit denen vom Sobel-Operator detektierten Kanten für die entsprechenden Zeitpunkte und soll einen Überblick geben.

Es ist zu erkennen, dass mithilfe des Sobel-Operators einige wesentliche Kanten der Priele erkannt wurden - im Bereich des Hauptarms sowie bei dessen Ausläufern trifft dieses vorwiegend zu. Jedoch zeigt sich auch, dass zum Ende der Nebenarme keine oder nur sehr wenige Kanten detektiert worden sind und auch im südlichen Bereich des Testgebietes Kanten gefunden wurden, die nicht von Prielen stammen.

Der Schwellwert wurde für alle Abbildungen entsprechend dem Gelände variiert. Für Abbildung 5.11a ist ein kleinerer Schwellwert verwendet worden, während die Kantendetektion in den beiden anderen Abbildungen mithilfe eines größeren Schwellwertes durchgeführt wurde. Dies lässt im Allgemeinen auf stärkere Grauwertsprünge für die Abbildungen 5.11b und 5.11c im Bereich der detektierten Kanten der Priele schließen, da diese bereits bei der größeren Einstellung des Schwellwertes erkannt worden sind.

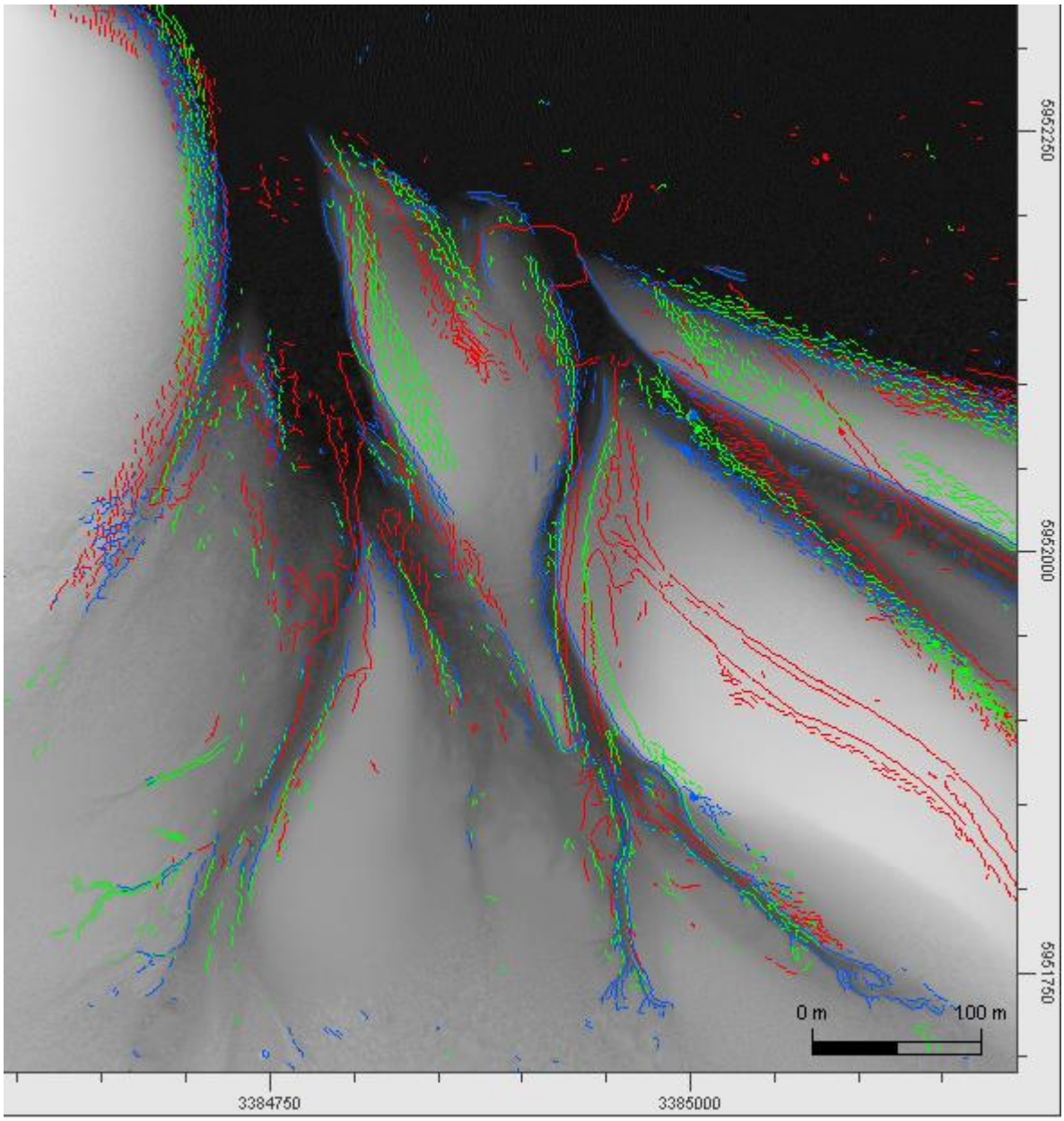

Abbildung 5.12:
Überlagerung der zu den drei Zeitpunkten detektierten Kanten

Abbildung 5.12 zeigt einen Ausschnitt des Testgebietes, welcher im Wesentlichen die in Kapitel 5.1.4 näher untersuchten Ausschnitte abdeckt. Die detektierten Kanten sind analog zu Abbildung 5.11 farbig dargestellt. Rot entspricht der Kantendetektion von 2010, Grün der von 2012 und Blau der Detektion von 2013. Das Hintergrundbild ist das DGM aus dem Jahr 2013, wobei die Farbcodierung von schwarz nach weiß gewählt worden ist.

Auffällig ist der im Jahr 2010 andere Verlauf des östlicheren Nebenarms des zweiten Ausläufers, welcher der Differenzbildung in dieser Form nicht entnommen werden konnte. Zwischen den zwei Nebenarmen desselben Ausläufers wurden Kanten detektiert, welche von der Form her einem weiteren Nebenarm mit südöstlicher Ausdehnung entsprechen. Ein Orthophoto aus selbigem Jahr bestätigt dies. Die entsprechende Differenzbildung zeigte hier

einen Bereich starker Sedimentzunahme, die nicht unmittelbar auf einen versandeten Priel schließen ließ.
Im Wesentlichen werden die in den Kapiteln 5.1.1 bis 5.1.3 geäußerten Vermutungen hinsichtlich der Prielveränderungen auch hier bestätigt. Die Entwicklung der Prielverschmälerung für den zweiten Nebenarm des östlicheren Ausläufers ist gut zu erkennen. Gleichzeitig ist die Verlagerung in westliche Richtung zu beobachten. Auch die Verlagerung des ersten Nebenarms um ca. 15 m in westliche Richtung im Bereich des „Knickes“ ist Abbildung 5.12 zu entnehmen. Die Verschmälerung des ersten Ausläufers im nördlichen Bereich lässt sich nur teilweise bestätigen, da insbesondere die Kantendetektion von 2012 keine eindeutigen Kanten liefert. Der Trend zu einem schmaler werdenden Ausläufer lässt sich dennoch feststellen. Die Verlagerung des Gebietes starker Sedimentzunahme in nördliche Richtung zwischen den zwei Nebenarmen des ersten Ausläufers ist in Abbildung 5.12 nicht zu erkennen.

5.1.6 Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse von Testgebiet 1

Insgesamt konnten die Veränderungen, welche das Wattenmeer über eine kurze Zeitspanne von drei Jahren erfahren hat, zuverlässig erkannt werden. Wesentliche Prielverschmälerungen wurden in den nördlichen Bereichen der zwei Ausläufer in einer Größenordnung von bis zu 50 m detektiert. Neben der Verschmälerung des zweiten Ausläufers im nördlichen Bereich konnte eine gleichzeitige Verlagerung in westliche Richtung erfasst werden. Auch weiter südlich waren Verschiebungen über Distanzen von 250 m zu erkennen.
Die größten Änderungen in der Höhe sind bei der Differenzbildung 2013-2012 von knapp zwei Metern (-1,23 m bis 0,67 m) aufgetreten. Im Mittel ist eine Höhenabnahme von -0,14 m über die drei Jahre zu verzeichnen.

5.2 Testgebiet 2

Die grundlegenden Ideen, wie Veränderungen erkannt werden können, wurden für das erste Testgebiet umfangreich vorgestellt. Die Untersuchungen für Testgebiet 2 werden aus diesem Grund nicht in der Ausführlichkeit vorgenommen, wie dies für Kapitel 5.1 getan worden ist. Es werden lediglich wesentliche Aspekte analysiert.

5.2.1 Epochenvergleiche mittels Differenzbildung

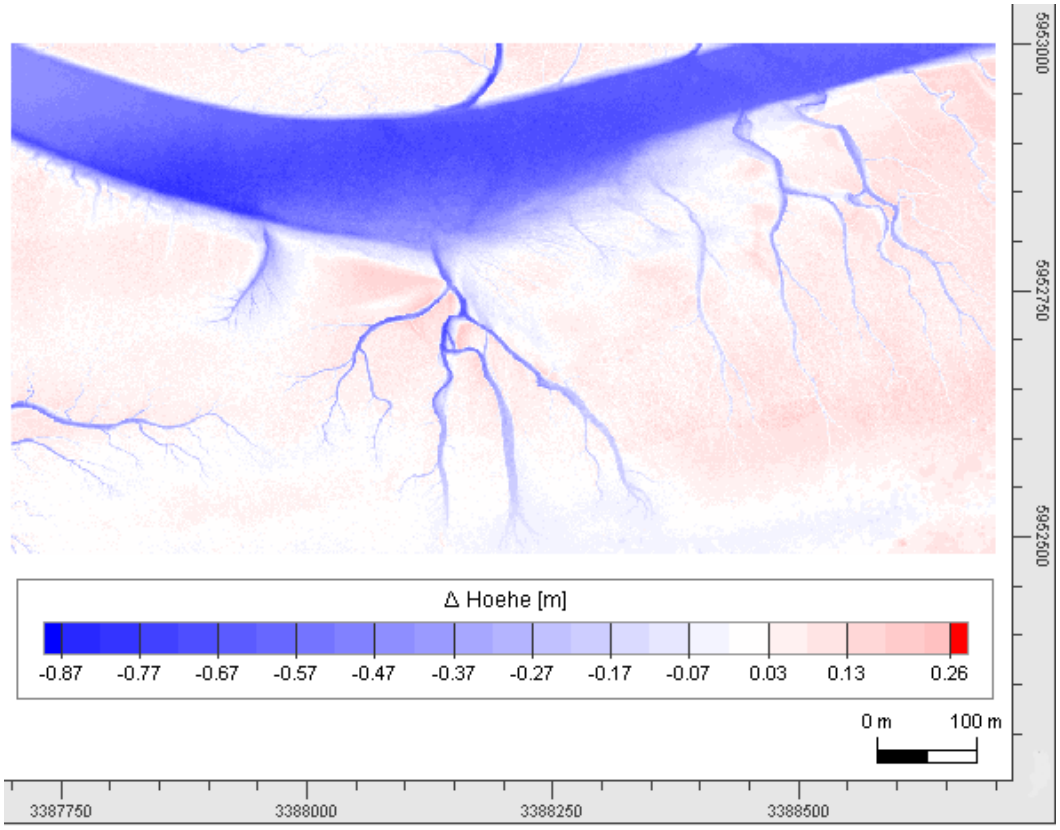

Abbildung 5.13:
Höhendifferenzen zwischen den Epochen 2012 und 2010

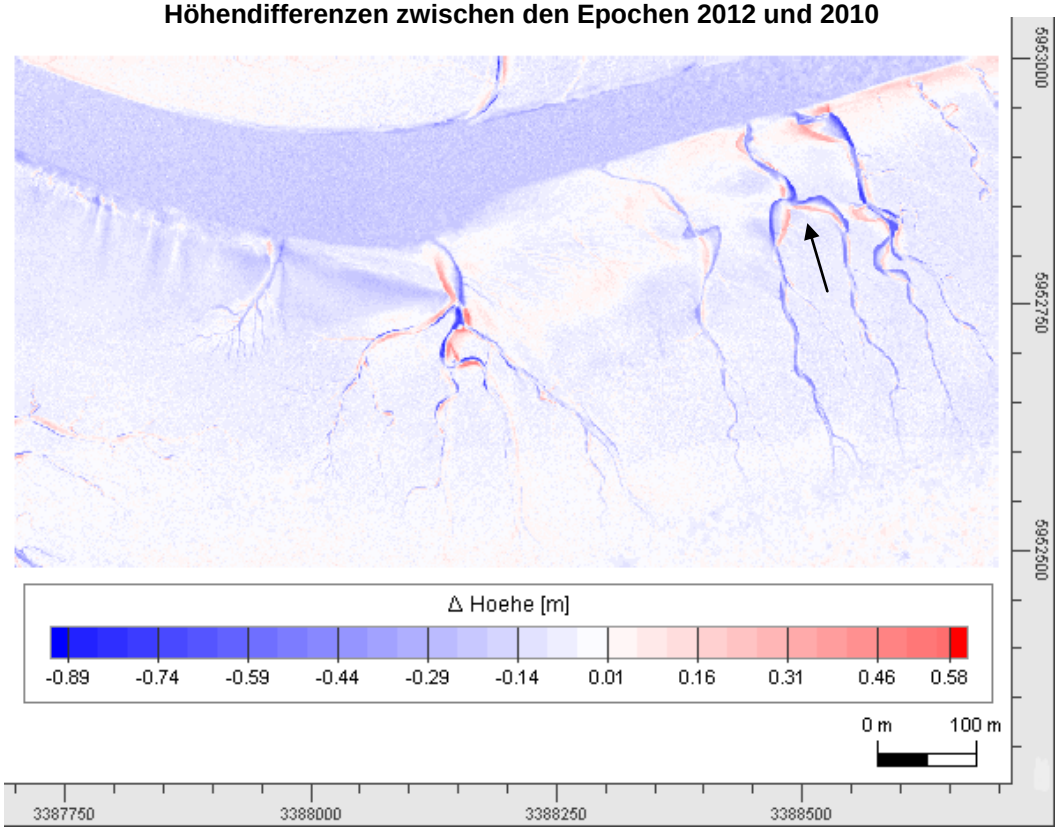

Abbildung 5.14:
Höhendifferenzen zwischen den Epochen 2013 und 2012

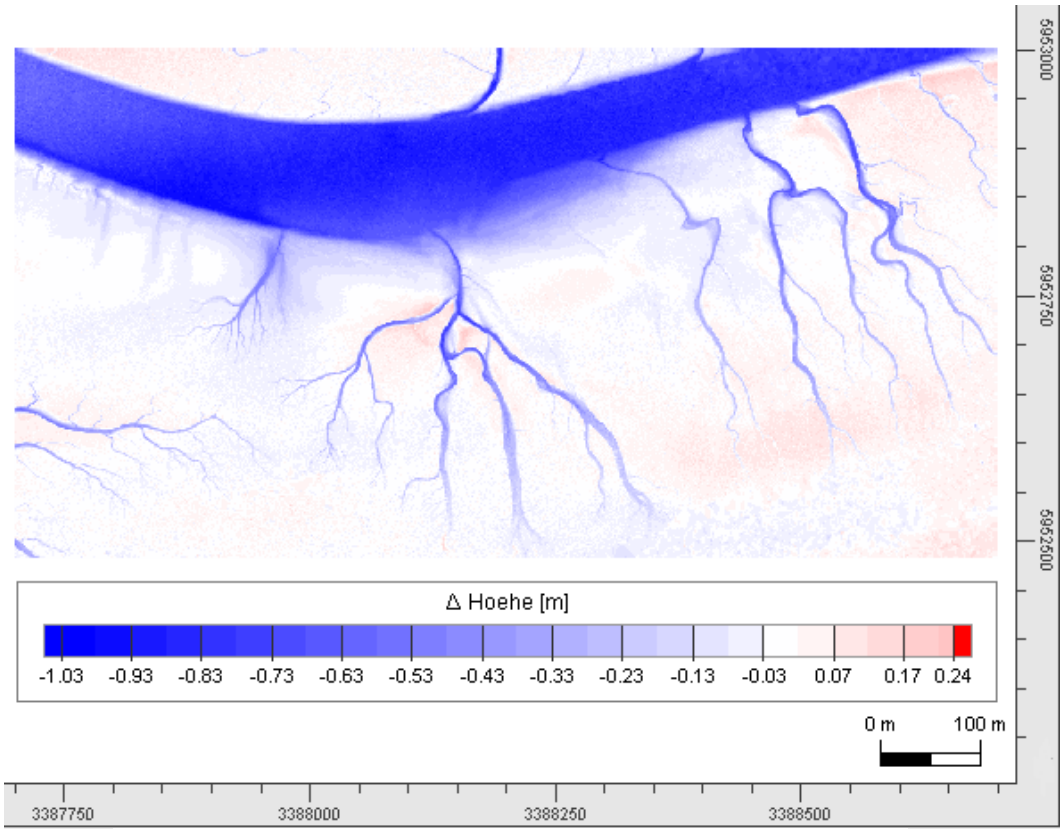

Abbildung 5.15:
Höhendifferenzen zwischen den Epochen 2013 und 2010

Abbildungen 5.13 bis 5.15 zeigen die drei Differenzbildungen der Höhen von den verschiedenen digitalen Geländemodellen, welche aus den Laserscannerdatensätzen generiert worden sind. Die Farbcodierung ist für die drei Abbildungen gleich gewählt. Sie verläuft von blau über weiß nach rot.

Tabelle 5.4 stellt die maximale Höhenzunahme und –abnahme sowie die Mittelwerte der jeweiligen Differenzbildung dar.

Differenzbildung	**Höhenänderung Δh [m]**		
	Maximum	Minimum	Mittelwert
2012-2010	0,26	-0,87	-0,09
2013-2012	0,58	-0,89	-0,06
2013-2010	0,24	-1,03	-0,16

Tabelle 5.4:
Kenngrößen der drei Differenzbildungen

Anders als bei Testgebiet 1 werden hier kleinere Priele bzw. Ausläufer mit dessen Nebenarmen betrachtet. Die maximalen Höhenunterschiede fallen für dieses Testgebiet

insgesamt gesehen geringer aus. Weiterhin sind aufgrund der feineren Struktur in Bereichen der Ausläufer und Nebenarme stärkere Variationen in Bezug auf Verlagerungen und Verschmälerungen, bis hin zum Versanden einiger Nebenarme, zu vermuten. Auch die Form wird sich stärker verändern, als dies bei größeren Prielen der Fall ist.

Wie auch für das erste Testgebiet liegen die größten Sedimentzunahmen von bis zu 0,58 m bei der Differenzbildung 2013-2012 vor. In Abbildung 5.14 sind diese nördlich des Hauptarms bei einem Ausläufer und südlich an mehreren Stellen, im Wesentlichen im Bereich von vier Ausläufern, zu erkennen. Hier kann für jedes Gebiet einer Sedimentzunahme eine Verlagerung in Richtung der Höhenabnahme festgestellt werden. So zeigt sich zum Beispiel für den Ausläufer, der in Abbildung 5.14 mit einem schwarzen Pfeil gekennzeichnet ist, eine Verlagerung der beiden Nebenarme nach Norden bzw. entsprechend dem Verlauf der Sedimentabnahme.

Weitere Bereiche, die eine Höhenzunahme erfahren haben, sind schwach bei den im Westen des Testgebietes „einfließenden“ Nebenarmen zu beobachten. Auch an der südlichen Prielkante des Hauptarms, im äußersten Nordosten des Testgebietes, zeigt sich auf einer Strecke von mehr als 150 m bei einer Tiefe von 10 m, welche in nordöstliche Richtung stetig zunimmt, eine Sedimentzunahme, die sicherlich auch eine Ausdehnung über das Testgebiet hinaus erfährt. Hier ist zu vermuten, dass es zu einer Verschmälerung des Hauptarms für diese Fläche kommt. Die Vermutung wird zusätzlich dadurch bekräftigt, dass sich dieser Bereich des Testgebietes nahe am Ende des Hauptarms befindet und deshalb über kurz oder lang eine Versandung zu erwarten ist (Abb. 3.3).

Generell sind bei der Gegenüberstellung der Abbildungen 5.13 und 5.15 die Wesentlichen Veränderungen zu erkennen, die hauptsächlich auf die Sedimentzunahmen aus der Differenzbildung 2013-2012 zurückzuführen sind. Beispielweise ist für den westlichsten Ausläufer eine Verlagerung und gleichzeitige Formveränderung nach Osten in der Größenordnung von bis zu 15 m festzustellen.

5.2.2 Epochenvergleiche mittels Kantenoperator

Analog zu Kapitel 5.1.5 werden die Kanten aus den digitalen Geländemodellen mithilfe des Sobel-Operators extrahiert, sodass die und weitere im vorherigen Kapitel festgestellten Veränderungen im Wattenmeer näher untersucht werden können.

Abbildung 5.16 gibt einen Überblick der vom Kantenoperator detektierten Kanten für die entsprechenden Zeitpunkte.

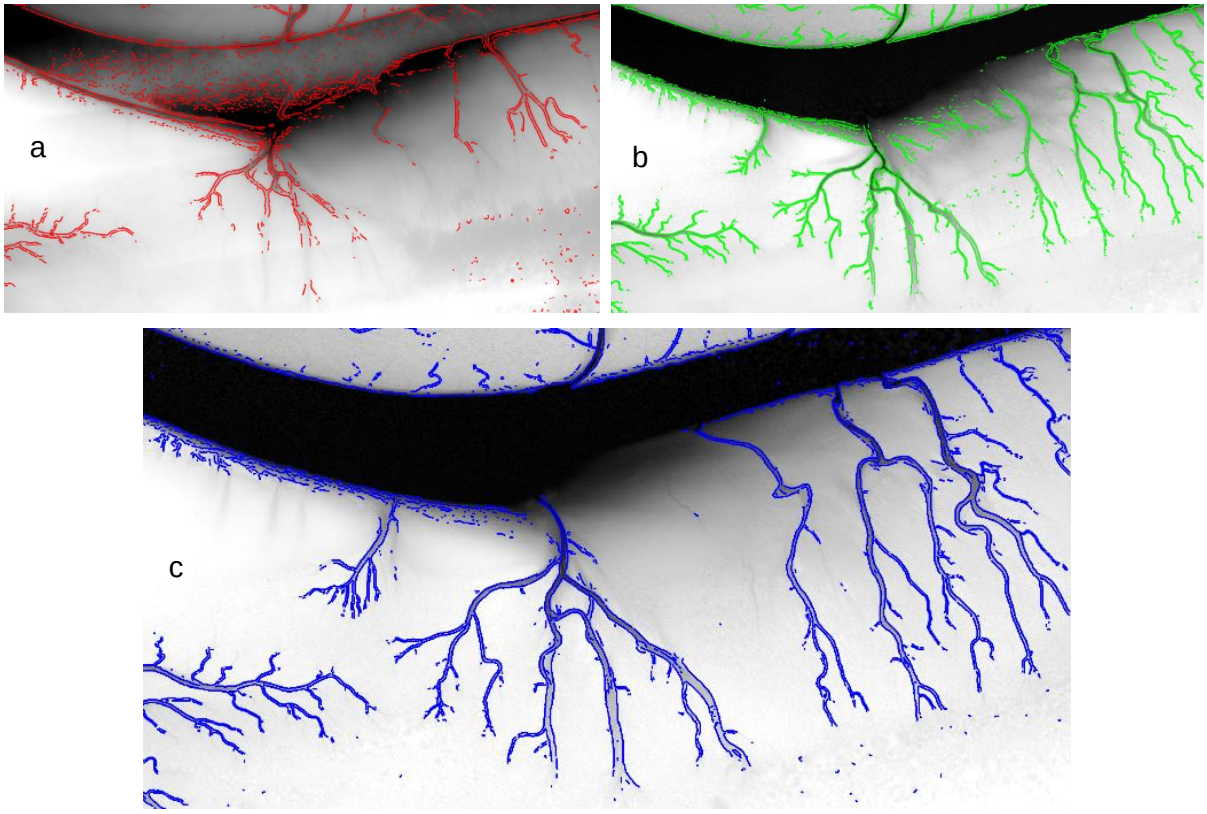

Abbildung 5.16:
Detektierte Kanten der digitalen Geländemodelle zu den drei Zeitpunkten
(a: Epoche 2010, b: Epoche 2012, c: Epoche 2013)

Es ist zu erkennen, dass die Kanten im Allgemeinen gut detektiert worden sind. Selbst die feinen Strukturen der vielen Nebenarme sind überwiegend gut erfasst worden. Die Abbildungen 5.16b und 5.16c zeigen, dass sich südlich des Hauptarms östlich vom ersten großen Ausläufer im Laufe der zwei Jahre ein neuer Ausläufer mit vielen kleineren Nebenarmen gebildet hat. Nur an wenigen Stellen wurden keine Kanten gefunden – hier waren die Grauwertdifferenzen zu gering für den eigestellten Schwellwert. Die nicht detektierten Kanten in Abbildung 5.16a sind vermutlich auf die zu niedrigen Differenzen der Grauwerte zurückzuführen.

Abbildung 5.17 zeigt fast den gesamten Ausschnitt des zweiten Testgebietes, wobei im Westen ein Teil abgeschnitten wurde, damit die Veränderungen im restlichen Teil besser zu erkennen sind; zumal die Variationen der im Westen „einfließenden“ Nebenarme über die Jahre eher gering ausfallen. Die detektierten Kanten des digitalen Geländemodells von 2010 sind rot dargestellt, die von 2012 in grün und die von 2013 in blau. Das Bild im Hintergrund ist das DGM aus dem Jahr 2013 mit einer Farbcodierung von schwarz nach weiß.
Die in Kapitel 5.2.1 angesprochenen Veränderungen im Wattenmeer sind auch hier in vielen Teilen zu beobachten. Auffällig sind die teilweise stark abweichenden Prielverläufe hinsichtlich Form und Lage des Jahres 2010 im Vergleich zu 2012 und 2013. Insbesondere

in den nördlichen Bereichen der Ausläufer, bei denen die Kanten aus 2010 noch gut detektiert worden sind, können deutliche Unterschiede in der Größenordnung von mehreren Zehnermetern festgestellt werden (in Abb. 5.17 durch schwarze Pfeile gekennzeichnet).

Der Trend der Form- und Lageveränderung setzt sich in der Zeitspanne von 2012 bis 2013 fort, jedoch fallen hier die Variationen, in der Regel von einigen Metern, geringer aus. Vor allem die Gebiete, die in Abbildung 5.14 durch eine starke Sedimentzunahme geprägt sind, können in Abbildung 5.17 wiedererkannt werden. Einige Gebiete sind in Abbildung 5.17 mithilfe von orangen Pfeilen hervorgehoben.

Die vermutete Verschmälerung des Hauptarms im Nordosten des Testgebietes bestätigt sich ebenfalls. Die kontinuierliche „Wanderung“ der Prielkante in nordwestliche Richtung ist zu erkennen, wobei diese von 2010 zu 2012 ungefähr doppelt so groß ausfällt wie von 2012 nach 2013. Im äußersten Nordosten beträgt die Verschmälerung über die drei Jahre bis zu 15 m.

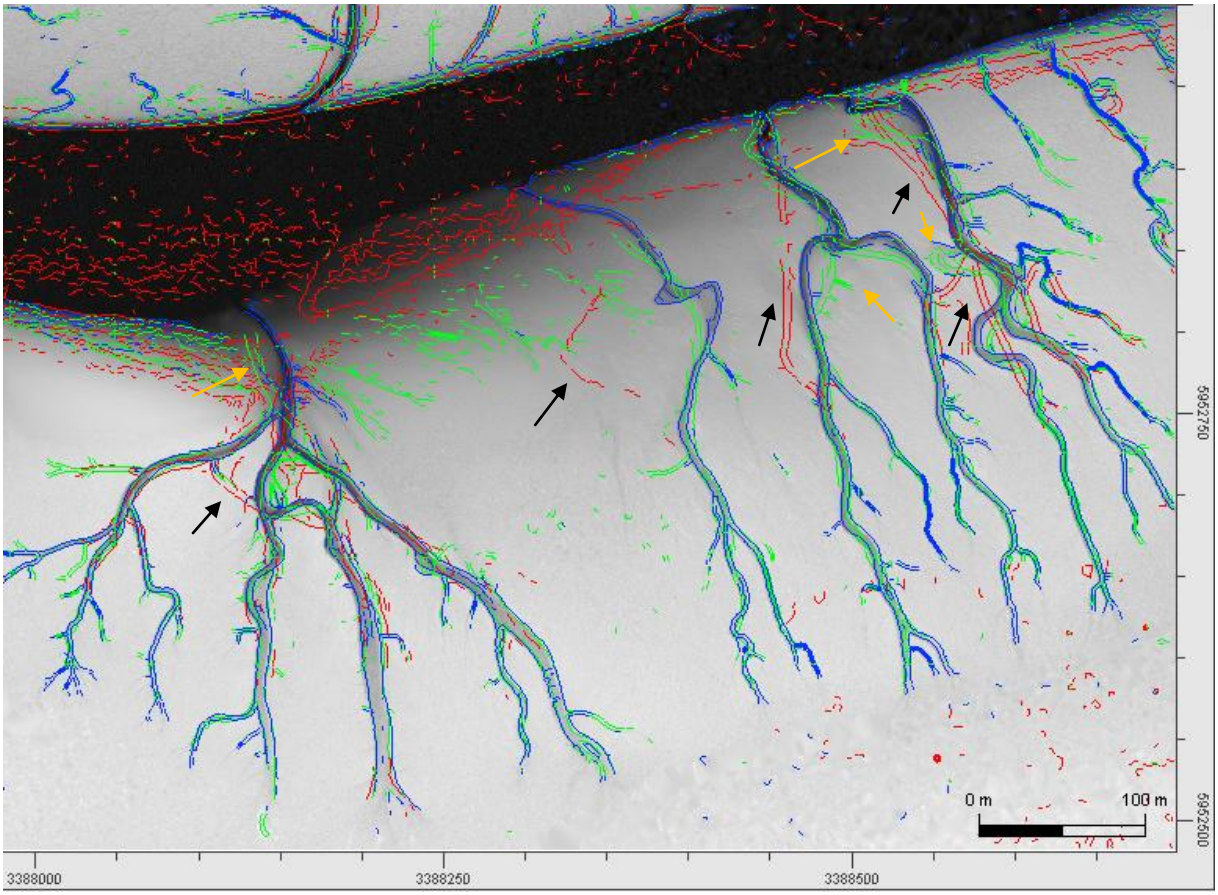

Abbildung 5.17:
Überlagerung der zu den drei Zeitpunkten detektierten Kanten

5.2.3 Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse von Testgebiet 2

Auch für das zweite Testgebiet konnten die Variationen der Prielverläufe innerhalb des Wattenmeeres anhand der Differenzbildung und Katendetektion zuverlässig erkannt werden. Es hat sich gezeigt, dass die kleineren Ausläufer starken Veränderungen in Hinblick auf Form und Lage unterliegen. Selbst über die recht kurze Zeitspanne von drei Jahren treten Verlagerungen von mehreren Zehnermetern auf und die Formen der Priele ändern sich wesentlich.

Die größten Sedimentzunahmen sind bei der Differenzbildung 2013-2012, die größten Höhenabnahmen bei der von 2013-2010 aufgetreten. Die Änderungen bewegen sich in der Größenordnung von -1,03 m bis 0,58 m. Im Mittel ergibt sich über die Zeitspanne von drei Jahren eine Höhenabnahme von -0,16 m.

5.3 Untersuchungen der GPS-Daten

Für die Analysen der GPS-Daten liegen punktuell Messungen, in Form von Tracks, innerhalb der zwei ausgewählten Testgebiete vor (Abb. 3.5 und 3.7). Aufgrund der ausgeprägten morphologischen Veränderungen des Wattenmeeres, insbesondere im Bereich der Priele, erfolgt eine Untersuchung auf Grundlage der Differenzbildung der GPS- und ALS-Daten aus der Epoche 2013. Anzumerken ist, dass bei dieser Betrachtung die Aufnahmezeitpunkte gute zwei Monate auseinanderliegen und somit bereits Veränderungen der Topographie stattgefunden haben können.

Eigens für die GPS-Messungen wurde die in Kapitel 3.1.2 beschriebene „Schlittenkonstruktion“ verwendet. Ein wesentlicher Unterschied dieser Erfassungsmethode gegenüber der Befliegung ist, dass sie Höhen liefert, die sich auf den Wattboden unterhalb der Wasseroberfläche in den noch teilweise mit Wasser gefüllten Prielen beziehen. Der Laserscanner gibt hier die Höhe der aktuellen Wasseroberfläche wieder. Daher sollten die GPS-Höhen in der Regel unterhalb der ALS-Höhen in den nicht vollständig trocken gefallenen Prielen liegen.

Diese und andere Untersuchungen werden in den Kapiteln 5.3.1 und 5.3.2 für die beiden Testgebiete vorgestellt. Kapitel 5.3.3 gibt eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

5.3.1 Testgebiet 1

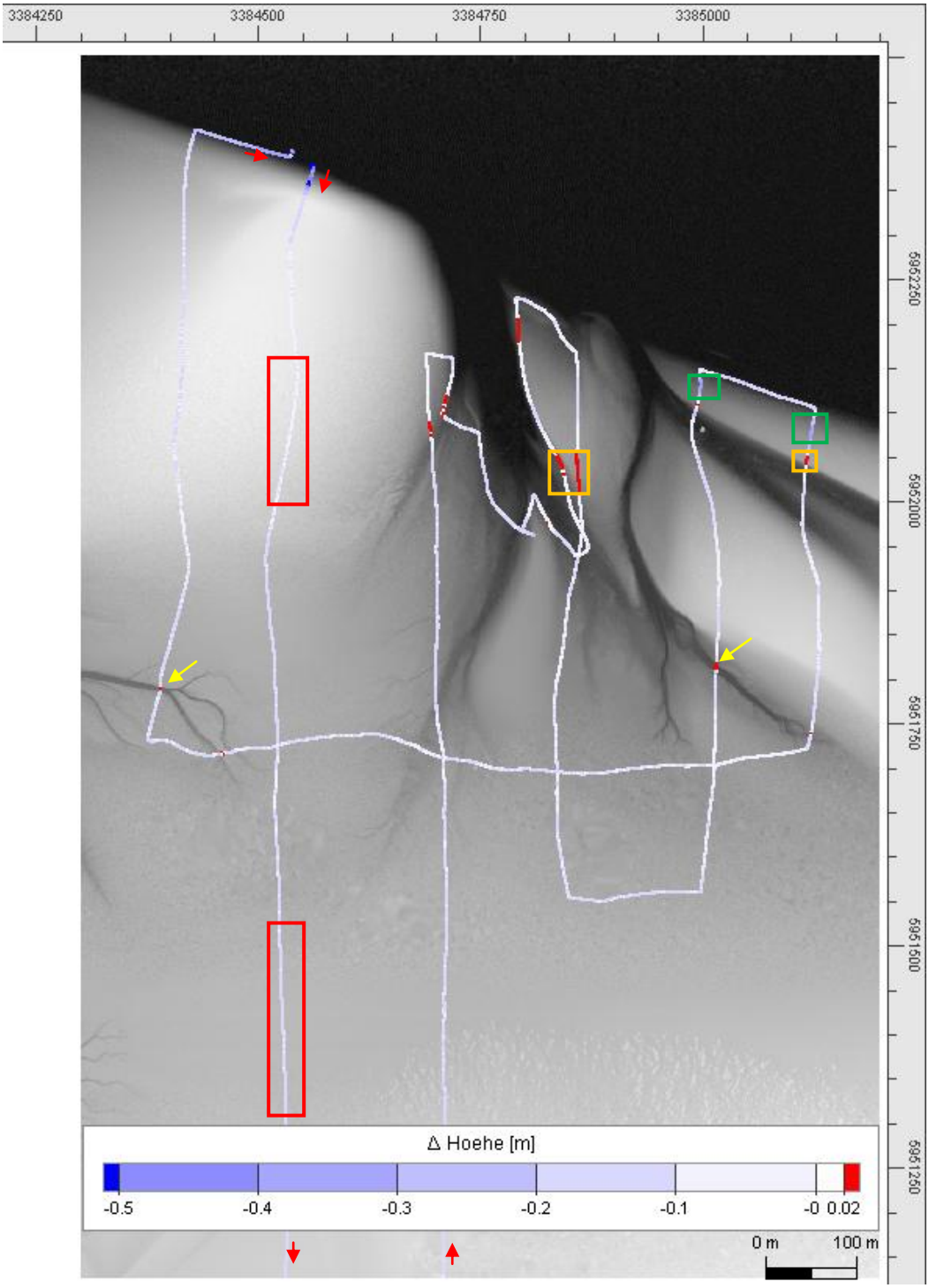

Abbildung 5.18:
Höhendifferenzen ALS-GPS

Abbildung 5.18 zeigt die Differenzen in der Höhe zwischen den GPS-Messungen und den interpolierten ALS-Daten. Hierbei wurde der GPS-Datensatz von dem der Laserscanneraufnahme subtrahiert. Die Farbcodierung ist von blau über weiß nach rot gewählt, wobei Weiß für keine Änderung in der Höhe steht. Keine Höhenänderung heißt hier,

dass beide Datensätze für die jeweilige Position identische Höhenwerte aufweisen. Je dunkler der Blauton wird, desto stärker ist die Höhenabnahme bzw. umso höher ist die GPS-Höhe im Vergleich zur interpolierten ALS-Höhe. Die größte Zunahme in der Höhe wird durch das kräftigste Rot ausgedrückt. Zur besseren Visualisierung der Höhendifferenzen wird nicht der gesamte Bereich der Differenzen entsprechend der Höhe eingefärbt, sondern Werte, die außerhalb der gewählten Begrenzungen liegen, sind mit dem kräftigsten Rot bzw. Blau dargestellt. Das Hintergrundbild ist das DGM aus dem Jahr 2013, wobei die Farbcodierung von schwarz nach weiß gewählt worden ist. Auch der Verlauf der GPS-Aufzeichnung ist in Abbildung 5.18 durch rote Pfeile gekennzeichnet, wobei ein Teil der GPS-Messungen am südlichen Ende aus dem Testgebiet herausfällt.

Die maximale Höhenzunahme beträgt 0,22 m und die maximale Höhenabnahme -2,07 m. Letzterer Wert und auch die anderen starken Abnahmen in der Höhe treten zu Beginn und am Ende der Messung auf. Da die „Schlittenkonstruktion“ auf einem kleinen Schiff zum Messgebiet transportiert worden ist, kann der zu frühe Beginn bzw. das zu späte Stoppen der Aufzeichnung der GPS-Daten ein möglicher Grund für die GPS-Höhen, die deutlich oberhalb der ALS-Höhen liegen, sein. Im Mittel ist eine Höhenabnahme von -0,12 m zu verzeichnen.

Tabelle 5.5 fasst die wesentlichen Größen zusammen.

Höhenänderung Δh [m]	
Maximum	0,22
Minimum	-2,07
Mittelwert	-0,12

Tabelle 5.5:
Kenngrößen der Differenzbildung

Anhand von Abbildung 5.18 ist zu erkennen, dass sich die GPS-Höhen in vielen Bereichen entlang des Tracks geringfügig von den ALS-Höhen unterscheiden. So weisen zum Beispiel die beiden parallel verlaufenden Tracks im südlichen Bereich des Testgebietes, der untere Teil östlich hiervon und viele weitere Gebiete geringe negative Differenzen auf. Diese bewegen sich in der Größenordnung um den Mittelwert von -0,12 m, teilweise liegt die Höhenabnahme noch darüber (-0,20 m). Somit fallen die Abnahmen der Höhen im Mittel geringfügig höher aus, als es in dem Zeitraum von zwei Monaten zwischen beiden Datenerfassungen zu erwarten ist. Hier wären weitere Untersuchungen vor Ort von Interesse.

Gut zu erkennen sind die positiven Differenzen (rot) in einigen Abschnitten des Tracks entlang und innerhalb der Ausläufer bzw. Nebenarme, welche vor allem im Bereich um den ersten Ausläufer vorhanden sind. Somit bestätigt sich die in Kapitel 5.3 getätigte Aussage zumindest teilweise, dass die GPS-Höhen im Bereich der Priele unterhalb der ALS-Höhen liegen. Für dieses Testgebiet können die Höhenunterschiede gut bei zwei Nebenarmen festgestellt werden, welche durch gelbe Pfeile gekennzeichnet sind. Diese bewegen sich in der Größenordnung von bis zu 0,18 m. Für den Bereich östlich des ersten Ausläufers, welcher positive Differenzen aufweist, kann vermutet werden, dass sich der Priel verbreitert hat und das Gebiet zur Zeit der Befliegung überflutet war. Die Tendenz einer Prielverbreiterung kann den extrahierten Kanten entnommen werden (Abb. 5.12). Ähnliches ist nördlich des zweiten Ausläufers für den nach Südosten verlaufenden Nebenarm zu beobachten. Auch hier liegen an zwei Stellen im Bereich der nördlichen Kante des Nebenarms die GPS- unterhalb der ALS-Höhen. Hier wird das Maximum der Höhenzunahme von 0,22 m erreicht. Somit kann auch hier die Vermutung hinsichtlich einer Verbreiterung getroffen werden.

Weiterhin sind an zwei Abschnitten des Tracks nördlich des östlichen Nebenarms des zweiten Ausläufers Höhenabnahmen festzustellen. Da hier die GPS- unterhalb der ALS-Höhen liegen, ist dieser Bereich durch eine Sedimentzunahme geprägt. Die Ausmaße lassen sich anhand des punkthaften Tracks nicht ableiten, jedoch konnten bereits in Kapitel 5.1 für diesen Bereich Zunahmen des Sedimentes beobachtet werden.

Abbildung 5.19 zeigt den Vergleich der GPS- mit den ALS-Höhen, wobei auf der Rechtsachse die laufende GPS-Nummer und auf der Hochachse die Höhendifferenz aufgetragen ist. Anhand des Differenzplots können die oben beschrieben interessanten Bereiche ebenfalls erkannt werden. Zur besseren Veranschaulichung sind einige der Abschnitte der Tracks in der jeweils gleichen Farbe durch Rechtecke in den Abbildungen 5.18 und 5.19 gekennzeichnet. Darüber hinaus werden ein paar Messwerte mit großen Höhenabnahmen, die zu Beginn und zum Ende der Messung vorhanden sind, nicht dargestellt, da so die Übersichtlichkeit der Differenzbildung verloren ginge.

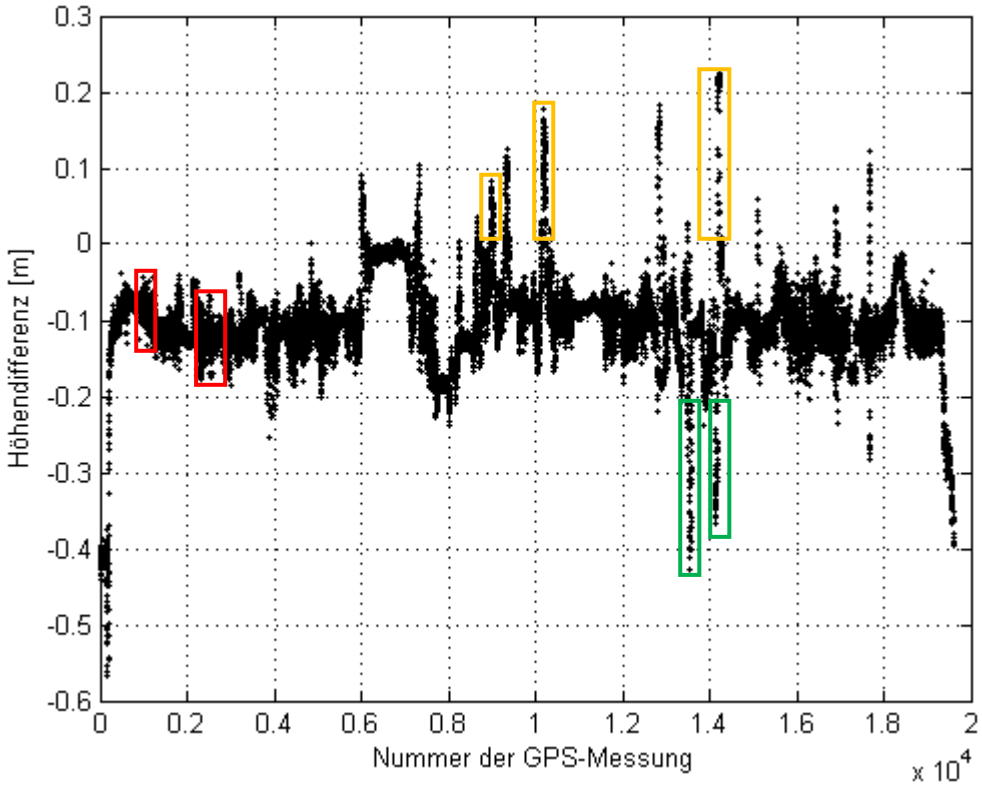

Abbildung 5.19:
Plot der Höhendifferenzen ALS-GPS

5.3.2 Testgebiet 2

In Abbildung 5.20 sind die Höhendifferenzen zwischen den GPS-Messungen und den interpolierten ALS-Daten dargestellt. Analog zu Abbildung 5.18 erfolgte eine Subtraktion der GPS-Höhen von den ALS-Höhen und auch die Farbcodierung wurde entsprechend von blau über weiß nach rot gewählt. Ebenso wie in Kapitel 5.3.1 wird auch hier nicht der gesamte Bereich der Differenzen entsprechend der Höhe eingefärbt, sondern Werte, die außerhalb der gewählten Begrenzungen liegen, sind mit dem kräftigsten Rot bzw. Blau dargestellt. Auf diese Weise können die Höhendifferenzen besser erkannt werden. Das Bild im Hintergrund ist das DGM von 2013 des zweiten Testgebietes mit einer Farbcodierung von schwarz nach weiß. Weiterhin ist in Abbildung 5.20 der Verlauf der GPS-Datenaufzeichnung mithilfe von roten Pfeilen dargestellt. An mehreren Stellen läuft der GPS-Track am untersten Ende aus dem Testgebiet heraus und im Anschluss wieder herein.

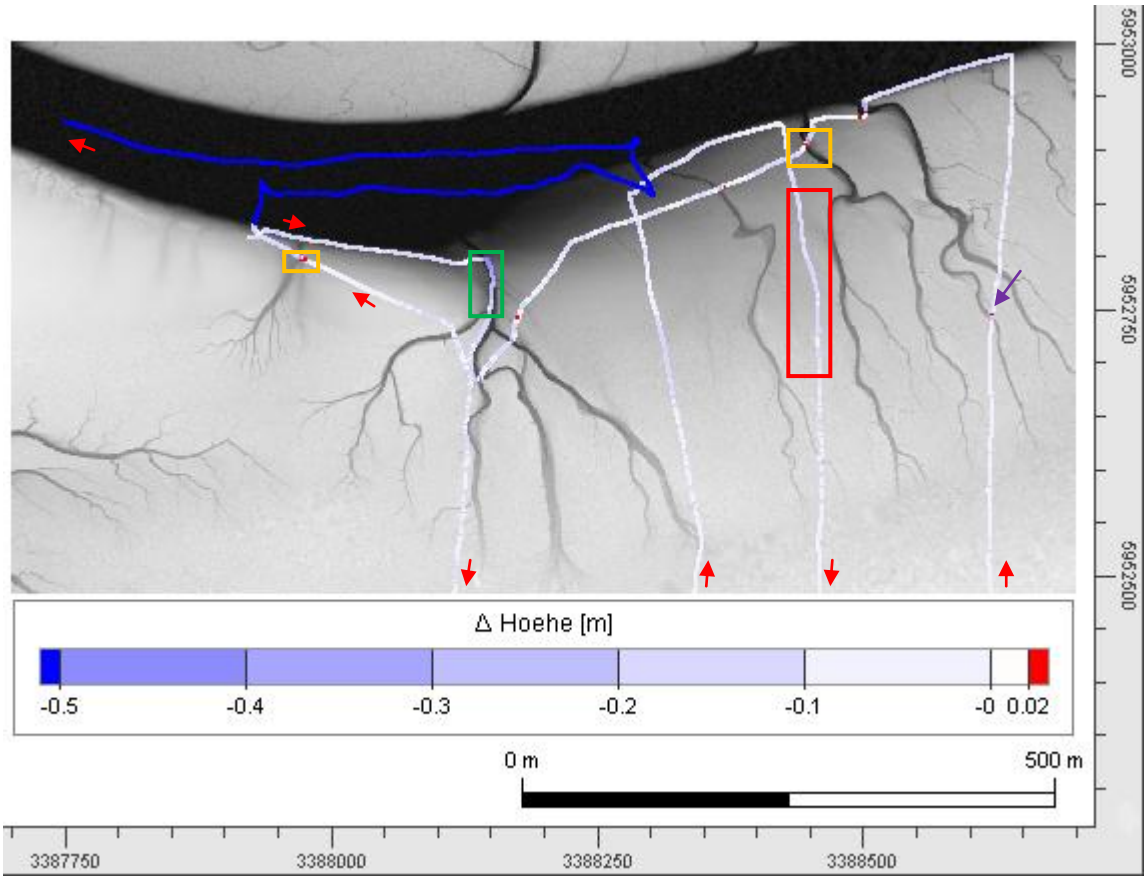

Abbildung 5.20:
Höhendifferenzen ALS-GPS

Für die Höhenzunahme ergibt sich ein Wert von 0,26 m. Für die Höhenabnahme liegt dieser bei -1,89 m. Insgesamt ist eine Abnahme in der Höhe von -0,30 m festzustellen. Werden die in Abbildung 5.20 in dunkelblau dargestellten GPS-Messungen nicht berücksichtigt, so ergibt sich ein Mittelwert von -0,11 m. Diese sind im Bereich des Hauptarms dadurch entstanden, dass die Aufzeichnung nicht gestoppt worden ist. Die „Schlittenkonstruktion“ wurde hier auf ein kleines Schiff geladen und erst nach einer gewissen Zeit der GPS-Empfänger ausgeschaltet. Die überwiegend negativen Höhendifferenzen können einerseits auf den zur dieser Zeit deutlich angestiegenen Meeresspiegel und die Lagerung der GPS-Antenne auf dem Schiff zurückgeführt werden (Tabelle 5.6).

Höhenänderung Δh [m]	
Maximum	0,26
Minimum	-1,89
Mittelwert	-0,30 (-0,11)

Tabelle 5.6:
Kenngrößen der Differenzbildung

Der Vergleich des Mittelwertes der Höhenänderungen (ohne die Höhen, die auf dem Schiff gemessen worden sind) weist mit -0,11 m einen nahezu identischen Wert wie der des ersten Testgebietes auf. Auch hier zeigen die nicht von Prielen geprägten Bereiche des Wattenmeeres geringe Höhenvariationen auf. Negative Differenzen von bis zu -0,20 m treten auf, wobei sich die meisten Höhen in der Größenordnung des Mittels bewegen. Insgesamt gesehen fallen wie für Kapitel 5.3.1 die Abnahmen der Höhen im Mittel geringfügig höher aus, als dies bei einer Zeitspanne von zwei Monaten zwischen den Datenerfassungen zu erwarten ist. Aus diesem Grund wären auch hier weitere Untersuchungen vor Ort von Interesse.

Dieses Testgebiet weist generell feinere Prielstrukturen auf. Aus diesem Grund werden, wie in Kapitel 5.2 bereits gezeigt, deutlich mehr Veränderungen in der Form und der Lage der Priele auftreten. Anhand von Abbildung 5.20 ist zu erkennen, dass die kurzen Abschnitte der Tracks, welche positive Differenzen aufweisen, etwas versetzt zur Prielkante, die aus dem DGM im Hintergrund erkannt werden kann, vorkommen. So scheint sich beispielsweise der kleine östlichste Ausläufer des Nebenarms, der seit 2012 vorhanden ist, in Richtung der positiven Höhendifferenz, das heißt nach Osten, zu verlagern. Ziemlich im Nordosten des Testgebietes (oranges Viereck) scheint sich ebenfalls eine Veränderung abzuzeichnen. So zeigt sich einerseits bei den Differenzbildungen aus Kapitel 5.2 in Abbildung 5.14 sowie in Abbildung 5.17 bei der Kantendetektion aus selbigem Kapitel, dass dieser Bereich starken morphologischen Änderungen unterliegt. Entgegen der Entwicklung von 2012 zu 2013 kann hier eine Verlagerung in südwestliche Richtung beobachtet werden. Jedoch ist es nicht möglich, die Veränderung in der Umgebung des Tracks aus den Daten abzuleiten. Nordöstlich hiervon treten ebenfalls Höhenzunahmen auf, sodass auch hier eine Verlagerung des Priels zu diesen vermutet werden kann.

Der ziemlich zu Beginn der Messung südlich des Hauptarms gelegene Abschnitt des Tracks, welcher sich von Norden nach Süden erstreckt, ist durch starke Höhenabnahmen von bis zu -0,45 m geprägt (grünes Viereck). Da die Messungen im Wesentlichen an der linken Prielkante des Ausläufers entlang verlaufen und die GPS-Höhen deutlich höher sind als die der interpolierten Laserscannerdaten, kann hier über die Zeitspanne von zwei Monaten eine Verlagerung des Ausläufers vermutet werden. Folgt man der Tendenz aus den Vorjahren 2012 und 2013 (Abb. 5.17), so wird sich der Teil des Ausläufers weiter nach Osten bewegt haben.

Analog zu Kapitel 5.3.1 werden in den Abbildungen 5.20 und 5.21 einige interessante Abschnitte der Tracks in der jeweils gleichen Farbe durch Rechtecke hervorgehoben. Abbildung 5.21 zeigt den Vergleich der GPS- mit den ALS-Höhen, wobei auf der Rechtsachse die laufende GPS-Nummer und auf der Hochachse die Höhendifferenz aufgetragen ist. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf die Darstellung der GPS-Höhen,

die im Bereich des Hauptarms auf dem Schiff aufgezeichnet wurden, verzichtet. Die Ansammlung von positiven Höhendifferenzen (lila Pfeil in Abb. 5.20 und 5.21) ist auf einen längeren Aufenthalt an nahezu derselben Stelle zurückzuführen. Auch im Bereich des grünen Vierecks erfolgten teilweise viele Messungen an einer ähnlichen Stelle. Aufgrund dessen ist die Ausdehnung des Vierecks im Vergleich zur recht kurzen Messstrecke (Abb. 5.20) verhältnismäßig groß.

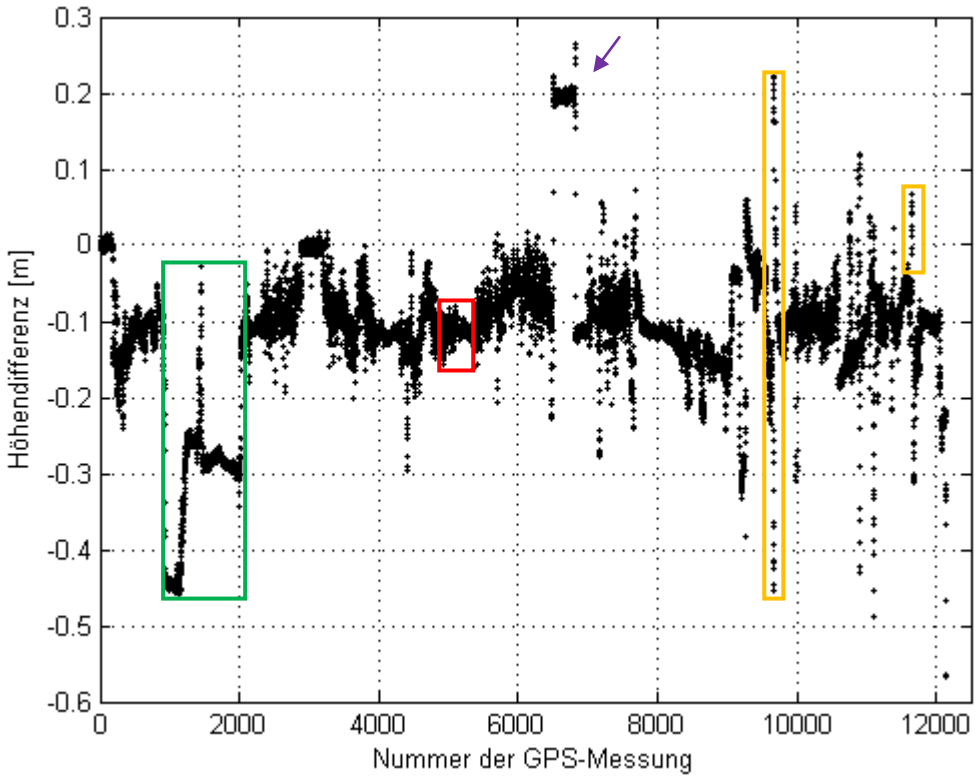

Abbildung 5.21:
Plot der Höhendifferenzen ALS-GPS

5.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Insgesamt zeigen die ALS- und die GPS-Daten eine gute Übereinstimmung, was die Eignung der Verfahren für topographische Aufnahmen von Wattbereichen verdeutlicht. Bei der Erfassung zu unterschiedlichen Zeitpunkten können zudem punktuell Änderungen, insbesondere im Bereich der Priele, detektiert werden. Die Verlagerungen sind hier teilweise gut zu erkennen, zumal die Höhenunterschiede innerhalb der Prielbereiche im gesamten Gebiet am stärksten ausfallen. So können in einigen Bereichen, wie dies in den Abbildungen 5.20 und 5.21 (grünes Viereck) zu erkennen ist, Verlagerungen nachvollzogen werden. Hier

wurde die Prielkante während der GPS-Messung direkt abgelaufen und kann mit den im DGM detektierten Kanten verglichen werden.

Andere Bereiche, in denen der Track kurze Abschnitte eines Priels durchläuft, lassen im Wesentlichen nur Vermutungen hinsichtlich topographischer Veränderungen zu. Die punktuell vorliegenden Daten liefern hier keine Informationen über genauere Änderungen des Prielverlaufes. Auch die Dimensionen der negativen Höhendifferenzen des ersten Testgebietes, welche im Umkehrschluss mit einer Sedimentzunahme über die zwei Monate einhergehen, können nur vermutet werden. Ein systematisches Ablaufen der Prielkanten und des Bereiches der Sedimentzunahme, gegebenenfalls zu mehreren Zeitpunkten, würde nähere Informationen im Hinblick auf topographische Änderungen geben.

Weiterhin sind die verschiedenen Höhen innerhalb der teilweise mit Wasser gefüllten Priele in einigen Bereichen in Abbildung 5.18 gut zu erkennen (gelbe Pfeile). Mithilfe der „Schlittenkonstruktion“ können die Höhen des Wattbodens unterhalb der Wasseroberfläche erfasst werden. Dies stellt gegenüber der Erfassung mittels ALS einen Vorteil dar, da so keine Informationen über die aktuelle Wasserhöhe benötigt werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die Priele begehbar sind.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb dieser Arbeit werden verschiedene Datensätze des niedersächsischen Wattenmeeres, die zu unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten erfasst worden sind, analysiert. So ist es möglich, Veränderungen des Wattgebietes aufzuzeigen und zu verifizieren. Der wesentliche Teil der Daten wurde mittels flugzeuggestütztem Laserscanning zu den Epochen 2010, 2012 und 2013 erhoben. Weiterhin liegt auch ein aktueller GPS-Datensatz von 2013 vor. Mithilfe der Daten werden zwei Gebiete südlich der ostfriesischen Insel Norderney mit der Zielsetzung eines Monitorings untersucht.
Die Analysen der ALS-Datensätze werden auf Grundlage von generierten digitalen Geländemodellen durchgeführt, wobei Differenzbildungen und Kantendetektionen zwischen den Epochen Vergleiche der Geländemodelle in Hinblick auf topographische Veränderungen der Nordseeküste erlauben. Durch das hierbei verwendete gleiche Aufnahmeverfahren können flächendeckende Untersuchungen des Wattenmeeres erfolgen.
Anders als bei den ALS-Daten liegen die GPS-Daten nur punktuell, in Form von Tracks, vor, sodass keine flächenhaften Informationen vorhanden sind. Zu Untersuchungszwecken werden die GPS-Daten von den interpolierten ALS-Daten subtrahiert.

Die Analysen der ALS-Daten der zwei Testgebiete zeigen, dass es zu Veränderungen der Prielverläufe im Wattenmeer kommt. Durch die drei verschiedenen Epochen der Datensätze und die zusätzlich kurze Zeitspanne zwischen den Befliegungen, lassen sich kurzfristige Verlagerungen, Verschmälerungen und Formveränderungen der Priele über drei Jahre beobachten. Während für das erste Testgebiet Betrachtungen größerer Priele im Vordergrund stehen, liegt das Augenmerk des zweiten Testgebietes auf kleineren, feineren Strukturen. Somit eignen sich die verwendeten Vergleichsmethoden, um ein zuverlässiges Monitoring für verschiedene Prielgrößen (Hauptarme, Ausläufer und Nebenarme) sowie Sedimentzunahmen bzw. –abnahmen zu gewährleisten. Von den verwendeten Methoden stellt die Kantendetektion eine gute Möglichkeit dar, um die Informationen aus den Differenzbildungen zu bekräftigen und zu ergänzen. Während sich die Differenzbildungen insbesondere zur Feststellung von Höhenänderungen zwischen den Epochen eignen, können aus den gewonnenen Kanten die Änderungen der Priele abgeleitet werden.

Für das erste Testgebiet sind Verschmälerungen der Ausläufer von bis zu 50 m festzustellen. Auch Verlagerungen der Nebenarme, die häufig mit einer gleichzeitigen Formveränderung und Verschmälerung einher gehen, können über Distanzen von 250 m erkannt werden. Die aus den Differenzbildungen gewonnen Höhenänderungen bewegen sich im Bereich von knapp zwei Metern (-1,23 m bis 0,67 m). Im Mittel ist eine Höhenabnahme von -0,14 m zu verzeichnen, wobei dieser Wert die aktuelle Wasserhöhe des jeweiligen Aufnahmezeitpunktes nicht mit berücksichtigt. Die durchgeführten Kantenextraktionen bestätigen die Ergebnisse der Differenzbildungen.
Das zweite Testgebiet weist starke Veränderungen im Hinblick auf Form und Lage für die kleineren Ausläufer auf. Es treten Verlagerungen von mehreren Zehnermetern auf und die Formen der Ausläufer bzw. Nebenarme verändern sich wesentlich. Die Differenzbildungen zeigen Höhenänderungen von guten 1,60 m, im Bereich von -1,03 m bis 0,58 m, auf. Im Mittel ergibt sich über die Zeitspanne von drei Jahren eine Höhenabnahme von -0,16 m, wobei auch hier die aktuelle Wasserhöhe des entsprechenden Aufnahmezeitpunktes im Mittelwert nicht beachtet worden ist. Ebenso werden für dieses Testgebiet die Ergebnisse der Differenzbildungen durch die Kantenextraktionen bestätigt.

Die Untersuchungen der GPS-Daten zeigen, dass es teilweise möglich ist, aus den punkthaft, in Form eines Tracks, vorliegenden Daten Veränderungen der Topographie des Wattenmeeres festzustellen. Jedoch ist es schwierig, aus den gewonnenen Informationen konkrete Aussagen im Hinblick auf Veränderungen zu treffen. Wie sich beispielsweise ein Priel verlagert hat oder welche Dimensionen eine Sedimentzunahme besitzt, kann nur vermutet werden. Aus diesem Grund ist ein Vergleich von Laserscannerdaten aus verschiedenen Epochen deutlich besser geeignet. Jedoch bieten die GPS-Daten den Vorteil, dass sie sich in wasserbedeckten Prielbereichen auf die Höhen des Wattbodens unterhalb der Wasseroberfläche beziehen und daher im Gegensatz zu den ALS-Daten, welche die Wasseroberfläche wiedergeben, dem tatsächlichen Geländeverlauf entsprechen. Durch die Differenzbildung, bei der die GPS-Daten von den ALS-Daten subtrahiert werden, kann zudem die aktuelle Wasserstandshöhe der Priele abgeleitet werden.

Generell zeichnen sich die untersuchten Testgebiete im Wattenmeer durch starke Veränderungen der Topographie aus. Die Untersuchungen zeigen, dass bereits über die Zeitspanne von einem Jahr Verschmälerungen der Priele von bis zu 50 m festzustellen sind.
Im Hinblick auf zukünftige Untersuchungen sind für die durchgeführten Differenzbildungen Volumenberechnungen im Bereich der Sandbänke denkbar, um so Sedimentzunahmen bzw. –abnahmen mithilfe von Zahlenwerten zu verifizieren. Das Verfahren der Kantendetektion, welches eine geeignete Möglichkeit zur Bestimmung der Verlagerungen der Priele bietet,

könnte zudem erweitert werden. So ist es denkbar, eine Kantenausdünnung mit Hilfe des Verfahrens der Non-maximum supression durchzuführen. Geschlossene Prielkanten könnten gefunden werden, wenn in Richtung eines Kantenstückes nach einer weiteren Kante gesucht und beide miteinander verbunden werden. Weiterhin ist in diesem Zusammenhang eine automatisierte Detektion der Verlagerung des Priels sinnvoll, beispielsweise in der Form, dass für jedes Kantenpixel ein Verschiebungsvektor zwischen den einzelnen Epochen berechnet wird.

Um das Monitoring zu verbessern und mögliche Konsequenzen frühzeitig erkennen und entgegenwirken zu können, sind weitere Befliegungen und die Auswertung zusätzlicher Datensätze sinnvoll. Durch die Analyse längerer Zeitreihen kann zuverlässig abgeleitet werden, in welchen Zeitabständen starke Änderungen der Topographie auftreten und inwiefern sich hierbei der Einfluss von Extremereignissen, z.B. in Form von Sturmfluten, auswirkt. Weitere Einflussgrößen, wie der durch die Gezeiten beeinflusste Wasserstand, Wind und Temperatur, könnten zudem bei der Analyse der Morphologie gemeinsam mit dem Geländemodell in eine Modellrechnung einfließen. Neben weiteren Befliegungen sind häufigere GPS-Messungen für kleinere Bereiche sinnvoll, um zum Beispiel die Entwicklung von Muschelbänken zu verfolgen. Hierfür wäre es von Vorteil, die Muschelbänke systematisch abzulaufen, damit dessen Form besser nachvollziehbar ist. Auch können auf diese Weise direkt Informationen über die Tiefe des noch teilweise mit Wasser bedeckten Priels gewonnen werden.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass das flugzeuggestützte Laserscanning ein geeignetes Verfahren zur flächenhaften Aufnahme des Wattenmeeres mit dessen Prielen darstellt. Die aus den Befliegungen gewonnenen Daten ermöglichen vielerlei Anwendungen. Gebiete, die einer starken morphologischen Dynamik unterliegen, können zusätzlich durch GPS-Messungen kostengünstiger und bei Bedarf in kürzeren Zeitabständen erfasst werden.

Literaturverzeichnis

[Beraldin et al., 2010] Beraldin, J.-A., Blais, F., Lohr, U. (2010): Laser Scanning Technology; In: Airborne and Terrestrial Laser Scanning ed. by Vosselman, G. und Maas, H.-G., Whittles Publishing, Dunbeath, 2010

[Briese, 2010] Briese, C. (2010): Extraction of Digital Terrain Models; In: Airborne and Terrestrial Laser Scanning ed. by Vosselman, G. und Maas, H.-G., Whittles Publishing, Dunbeath, 2010

[CWSS, 2010] Common Wadden Sea Secretariat (2010): Wadden Sea Plan, Eleventh Trilateral Governmental Conference on the Protection of the Wadden Sea. Wilhelmshaven, Germany, 2010

[GDAL, 2013] GDAL, September 2013. http://www.gdal.org/

[GDAL Grid Tutorial, 2008] GDAL, September 2013. GDAL Grid Tutorial: Inverse Distance to a Power, search ellipse. http://www.gdal.org/grid_tutorial.html, Stand: 30.05.2008

[GITTA, 2011] GITTA (Geographic Information Technology Training Alliance), September 2013. GITTA: Distanz-basierte Interpolation. http://www.gitta.info/ContiSpatVar/de/html/ Interpolatio_learningObject2.xhtml, Stand: 25.11.2011

[Heipke, 2010] Heipke, C. (2010): Airborne Laser Scanning part I, Vorlesungsskript zur Veranstaltung „Methoden der Photogrammetrie und Fernerkundung“ des 1. Mastersemesters Geodäsie und Geoinformatik an der Leibniz Universität Hannover, Wintersemester 2010/2011

[Heipke, 2012] Heipke, C. (2012): Luftbildphotogrammetrie, Vorlesungsskript zur Veranstaltung „Photogrammetrie und Fernerkundung II“ des 5. Bachelorsemesters Geodäsie und Geoinformatik an der Leibniz Universität Hannover, Wintersemester 2012/2013

[ImTG, 2009] Milbradt, P., Dorow, C., Asche, C. (2009): Identifikation morphologischer Tendenzen und Geschwindigkeiten im Küstenbereich (ImTG), Abschlussbericht, Institut für Bauinformatik, Leibniz Universität Hannover

[Inphoris, 2012] Abschlussbericht der Firmen Inphoris und smile consult GmbH, Thema: Flugzeuggestütztes LIDAR- und MS-Datenerfassung der Unter- und Außenems 2010, Oberhaching, 2012

[Kraus, 2004] Kraus, K. (2004): Photogrammetrie, Band 1: Geometrische Information aus Photographien und Laserscanneraufnahmen, 7. vollständig bearbeitete und erweiterte Auflage, Walter de Gruyter GmbH & Co KG, Berlin, 2004

[MILAN, 2012] Projekt-Dokumentation der Firma MILAN Geoservice GmbH, Thema: Airborne-Laser-Scanning – Gebiet Ostfriesische Inseln, Kamenz, 2012

[MILAN, 2013] Projekt-Dokumentation der Firma MILAN Geoservice GmbH, Thema: Airborne-Laser-Scanning – Gebiet Ostfriesisches Küstenvorfeld ALS 2013-03, Spremberg, 2013

[Niemeyer, 2009] Niemeyer, I. (2009): Aufnahmesysteme in der Fernerkundung, Vorlesungsskript zur Veranstaltung „Fernerkundung I“ des Instituts für Marktscheidewesen und Geodäsie an der TU Bergakademie Freiberg, Sommersemester 2009

[Pfeifer, 2003] Pfeifer, N. (2003): Oberflächenmodelle aus Laserdaten, Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 91. Jahrgang, 4; 18-21

[Pfeifer et al., 2004] Pfeifer, N., Gorte, B. und Elberink, S.O. (2004): Influences of vegetation on laser altimetry – analysis and correction approaches. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Scienes, 36(Part8/W2), 283-287

[Ressl, 2007] Ressl, C. (2007): Airborne Laserscanning: Theorie und Anwendung, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.), Technische Universität Wien

[Sithole und Vosselman, 2004] Sithole, G. und Vosselman, G. (2004): Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 59(3-4), 202-224

[Sithole, 2005] Sithole, G. (2005): Segmentation and Classification of Airborne Laser Scanner Data, Dissertation, TU Delft, Publications on Geodesy of the Netherlands Commission of Geodesy, vol.59

[Sörgel, 2013a] Sörgel, U. (2013): Flugzeuglaserscanning, Vorlesungsskript zur Veranstaltung „Fernerkundung“ des 6. Bachelorsemesters Geodäsie und Geoinformatik an der Leibniz Universität Hannover, Sommersemester 2013

[Sörgel, 2013b] Sörgel, U. (2013): Bildverarbeitung, Vorlesungsskript zur Veranstaltung „Fernerkundung“ des 6. Bachelorsemesters Geodäsie und Geoinformatik an der Leibniz Universität Hannover, Sommersemester 2013

[Wagner et al., 2003] Wagner, W., Ulrich, A., Briese, C. (2003): Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche, Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 91. Jahrgang, 4; 223-235

[Wagner, 2009] Wagner, W. (2009): Measurement Principle and Physical Fundamentals, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing (I.P.F.), Vienna University of Technology

[Würländer et al., 2005] Würländer, R., Reiger, W., Drexel, P., Briese, C. (2005): Landesweite Datenerhebung mit ALS: Technologische Herausforderungen und vielseitige GIS-Anwendungen, Angewandte Geoinformatik 2005, Beiträge zum 17. AGIT-Symposium, Salzburg, S. 800-805

[Würländer und Wenger-Oehn, 2007] Würländer, R. und Wenger-Oehn, K. (2007): Die verfeinerte Georeferenzierung von ALS-Daten – Methodik und praktische Erfahrung, Angewandte Geoinformatik 2007, Heidelberg