

Institut für Photogrammetrie und GeoInformation
Leibniz Universität Hannover

Masterarbeit

**Auswertung von Laserscannerdaten
im Wattenmeer**

Kerstin Beermann

Betreuer

Prof. Dr.-Ing. Uwe Sörgel

M. Sc. Alena Schmidt

Hannover, 01. Dezember 2012

MASTERARBEIT

- Kandidat** B.Sc. Kerstin Beermann
- Aufgabe** Auswertung von Laserscannerdaten im Wattenmeer
- Motivation** Die Topographie des Wattenmeeres ist eine dynamische Zustandsgröße, die durch Gezeiteneffekte, klimatische und menschliche Einflüsse Änderungen unterworfen ist. Eine geeignete Methode zur großräumigen und hochgenauen Erfassung der Wattoberflächen bietet das luftgestützte Laserscanning (Airborne Laserscanning, ALS). Aus solchen Daten lassen sich hochaufgelöste Digitale Geländemodelle (DGM) zur Beschreibung der Topographie ableiten. Einen wesentlichen Bestandteil nimmt dabei die Extraktion markanter Geländestrukturen ein. Durch die Bestimmung von Strukturlinien kann in diesen Bereichen die Genauigkeit des DGM erhöht werden.
- Ansatz** Ziel der Masterarbeit ist die Untersuchung markanter Geländestrukturen im Wattenmeer aus Laserscannerdaten. Durch einen Vergleich von Daten unterschiedlicher Epochen soll zudem die Topographie auf Änderungen analysiert werden.
- Skills** Im Rahmen der Arbeit ist ein solides Grundwissen in Statistik und der Auswertung von Laserdaten 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 habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Hannover, 01. Dezember 2012

Kerstin Beermann

Kurzfassung

Das Wattenmeer unterliegt zahlreichen Einflussgrößen wie dem Seegang, der Tide, Strömungen, der Meteorologie, klimatischen Veränderungen wie auch anthropogenen Einflüssen, die eine hohe Dynamik seiner Topographie und der umliegenden Küstenbereiche verursachen. Für einen erfolgreichen Küstenschutz ist die Identifikation langfristiger Tendenzen sowie ein regelmäßiges Monitoring der Veränderungen unumgänglich. Das flugzeuggestützte Laserscanning bietet hierbei seit etwa 20 Jahren eine geeignete Methode für eine flächendeckende, konsistente und hochgenaue Datenerfassung in den schwer zugänglichen Gebieten. In kurzen Zeiträumen können die Daten großräumig und berührungslos erfasst werden. Eine Weiterverarbeitung der Laserscanningdaten in digitale Geländemodelle (DGM) ermöglicht umfangreiche Analysen der morphologischen Veränderungen und stellt damit die geeignete Grundlage für Monitoringanwendungen. Markante topographische Strukturen können aus den Laserscanningdaten extrahiert werden.

Daher werden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Datensätze unterschiedlicher Epochen der ostfriesischen Nordseeküste zu Zwecken des Monitorings untersucht. Hierdurch können Bewegungen von Strukturen im Wattenmeer und im umliegenden Küstenbereich nachgewiesen werden. Eine vorab durchgeführte Analyse eines aktuellen Laserscanningdatensatzes macht das Potential der Anwendungsmöglichkeiten deutlich. Neben der Erstellung eines Geländemodells werden Strukturlinien extrahiert. In diesem Fall handelt es sich um Prielkanten, die anschließend zur Verbesserung der DGM-Modellierung herangezogen werden.

Darauf aufbauend erfolgt der Vergleich des Laserscanningdatensatzes mit 30 Jahre zurückliegenden terrestrisch Vermessungen. Zwar müssen so Daten unterschiedlicher Aufnahmeverfahren verglichen werden, wobei die terrestrischen Daten nur punktwise vorliegen, jedoch ist so eine Analyse zur Erfassung langfristiger Trends über einen langen Zeitraum möglich.

Darüber hinaus werden zwei weitere Laserscanningdatensätze, deren Aufnahmezeitpunkte sechs Jahre auseinander liegen, unter Verwendung der Geländemodelle zur flächendeckenden Analyse auf Veränderungen untersucht.

Mit Hilfe der verwendeten Software *Exstruct* können zuverlässig Bruchkanten durch Schätzung von Flächenfunktionen in die Laserpunktewolke bestimmt werden. Markante Objekte werden aus dem Ausgangsdatensatz extrahiert und für eine Verbesserung des Geländemodells verwendet.

In der Untersuchung über einen Zeitraum von 30 Jahren werden langfristige morphologische Veränderungen der Prielverläufe, hauptsächlich Verschiebungen, nachgewiesen. Die verwendeten Datensätze sowie die angewandte Methodik sind demnach für ein Monitoring geeignet.

Für die vergleichende Analyse von Laserscanningdaten über einen kürzeren Zeitraum von sechs Jahren können die für den betrachteten Datenausschnitt der Insel Juist in der Literatur aufgeführten langfristigen Trends wie Dünenabbrüche, verstärkte Vorstrandneigung und Rückgang der Schutzdünen bestätigt werden.

Insgesamt liefert das flugzeuggestützte Laserscanning eine sehr gute Datengrundlage für ein umfangreiches Monitoring in Wattgebieten. Aufgrund der hohen morphologischen Dynamik sind jedoch zur Erfassung aller Einflussgrößen großräumigere Untersuchungen in kurzen Intervallen erforderlich. Bei den betrachteten Gebieten, welche hauptsächlich von Seegang und Gezeitenströmung beeinflusst werden, ist vor allem die Erfassung der Wasserflächen im Einzugsgebiet sinnvoll.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufgabenstellung und Ziele	2
1.3	Aufbau der Arbeit.....	2
2	Theoretische Grundlagen.....	4
2.1	Airborne Laserscanning	4
2.1.1	Sensortechnologie	4
2.1.2	Bestimmung der Laserpunktkoordinaten	6
2.2	DGM-Modellierung	8
2.2.1	Hierarchische Robuste Filterung.....	9
2.3	Strukturlinienextraktion	12
3	Datensätze und Datenverarbeitung.....	16
3.1	Daten zur ALS-Analyse und zum Vergleich von Wattstrukturen nach 30 Jahren... 17	
3.1.1	Datensätze	17
3.1.1.1	Datensatz aus Airborne Laserscanning	18
3.1.1.2	Terrestrischer Datensatz.....	19
3.1.1.3	Testgebiete	19
3.1.2	Verarbeitung der Laserscanningdaten.....	21
3.1.2.1	Bestimmung von Strukturlinien	21
3.1.2.2	DGM-Generierung	23
3.2	Daten für den Vergleich von Küstengebieten und Wattstrukturen nach 6 Jahren ... 24	
3.2.1	Datensätze	24
3.2.1.1	Testgebiete	25
3.2.2	Verarbeitung der Laserscanningdaten.....	27
3.2.2.1	DGM-Generierung	27

4	Analyse	29
4.1	Untersuchung von Strukturlinien	29
4.1.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	34
4.2	Analyse von Wattstrukturen nach 30 Jahren.....	34
4.2.1	Testgebiet 1	36
4.2.2	Testgebiet 2	39
4.2.3	Testgebiet 3	43
4.2.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	46
4.3	Analyse von Küstengebieten und Wattstrukturen nach 6 Jahren.....	47
4.3.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	57
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	58
	Literaturverzeichnis.....	60

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das Wattenmeer und seine Topographie unterliegen zahlreichen Einflussgrößen. Aufgrund seiner einzigartigen Eigenschaften, wie das täglich zweimalige Überfluten und Trockenfallen durch die Gezeiten, ist die Topographie des Wattenmeeres variabel mit der Zeit. Aber auch jahreszeitliche und klimatische Effekte sowie anthropogene Einflüsse verursachen eine dynamische Topographie. Weiterhin wirken sich diese Effekte auch auf die umliegenden Küstenflächen aus. Neben Verlagerungen der Prielverläufe kommt es durch Gezeitenströmungen zu Sedimenttransport im Wasser, welcher örtlich begrenzt positive wie auch negative Sandbilanzen verursacht. Für die ostfriesischen Inseln werden hierdurch beispielsweise küstenschutzrelevante Dünenabbrüche verzeichnet [ImTG, 2009].

Das Wattenmeer ist durch seine Bodeneigenschaften für terrestrische Messungen nur schwer zugänglich. Auch fällt der Meeresboden aufgrund der Gezeiten nur stundenweise trocken, sodass eine konsistente terrestrische Datenaufnahme dieses großräumigen Areals wegen wiederkehrender Unterbrechungen und Überflutungen nur bedingt möglich ist. Das flugzeuggestützte Laserscanning (ALS) bietet daher seit ca. 20 Jahren für die flächendeckende, konsistente und hochgenaue Datenerfassung eine geeignete Alternative zu terrestrischen Methoden. In kürzeren Zeiträumen können die Daten großräumig und berührungslos erfasst werden. Auf Grundlage dieser Daten werden digitale Geländemodelle (DGM) abgeleitet, welche zur Untersuchung der oben genannten Einflüsse auf das Wattenmeer sowie auf Strand- und Küstenflächen und dessen Topographie erforderlich sind. Die Analyse und Modellierung von morphologischen Veränderungen sind von elementarer Bedeutung im Zusammenhang mit dem Küstenschutz.

Zur Erfassung markanter topographischer Strukturen wie Prielverläufen, sowie deren Bewegungen und Veränderungen mit der Zeit ist eine Bestimmung der markanten Geländestrukturen mittels Strukturlinienextraktion nützlich.

1.2 Aufgabenstellung und Ziele

Im Rahmen dieser Arbeit sollen zu Zwecken des Monitorings verschiedene Datensätze der ostfriesischen Nordseeküste unterschiedlicher Epochen untersucht werden. Hierdurch können Bewegungen von Strukturen im Wattenmeer nachgewiesen und quantifiziert werden.

Vorab wird eine Analyse eines ALS-Datensatzes aus dem Wattenmeer im Bereich Langeoog-Spiekerooog durchgeführt, um das Potential und die Anwendungen dieses Datentyps näher zu beleuchten. Neben der Generierung eines digitalen Geländemodells erfolgt die Extraktion von markanten Geländestrukturen, bei welchen es sich in erster Linie um Prielkanten handelt.

Darauf aufbauend wird dieser aktuelle Laserscanningdatensatz mit über 30 Jahre zurückliegenden terrestrischen Vermessungen verglichen. Dies hat den Nachteil, dass Daten verschiedener Aufnahmeverfahren und Genauigkeiten miteinander verglichen werden, da das Airborne Laserscanning in Deutschland erst zu Beginn der 90er Jahre in kommerziellen Anwendungen genutzt wurde [Heipke, 2010]. Außerdem liegen die terrestrisch ermittelten Datensätze nicht flächendeckend vor, sodass nur ein punktwiser Vergleich mit dem aus dem Laserscanningdatensatz generierten Geländemodell durchgeführt werden kann. Der Vorteil ist jedoch darin zu sehen, dass die Topographie über einen langen Zeitraum auf Veränderungen untersucht werden kann.

In einer zweiten Analyse werden darüber hinaus zwei Laserscanningdatensätze miteinander verglichen, welche mit einem Abstand von sechs Jahren im Bereich der Insel Juist und der umliegenden Strand-, Watt- und Wasserflächen aufgenommen wurden. So sollen Daten gleichen Ursprungs flächendeckend auf Veränderungen analysiert werden. Auch hier erfolgt die Untersuchung auf Grundlage der aus den Laserscanningdaten erstellten digitalen Geländemodelle.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zunächst werden die für die Analyse der Laserscanningdaten und die Untersuchungen der Watt- und Küstentopographie notwendigen theoretischen Grundlagen vorgestellt (Kapitel 2). Besonders eingegangen wird hier auf das Verfahren des luftgestützten Laserscannings, der DGM-Modellierung sowie der Strukturlinienextraktion.

Kapitel 3 befasst sich mit den verwendeten Datensätzen sowie deren Verarbeitung für die nachfolgend durchzuführenden Untersuchungen.

Für die Analyse der Laserscanningdaten steht ein Datensatz von 2011 im Bereich des ostfriesischen Wattenmeers südlich der Insel Spiekeroog zur Verfügung. Dieser wird auch für den Epochenvergleich über einen Zeitraum von 30 Jahren verwendet. Hierfür wird außerdem ein terrestrisch erfasster Datensatz herangezogen. Für die Laserscanningdaten erfolgen die Strukturlinienextraktion sowie eine DGM-Berechnung.

Weiterhin sind zwei Laserscanningdatensätze von 2004 und 2010 im Bereich der Insel Juist gegeben, für die ebenfalls Geländemodelle generiert werden.

Anschließend werden die Ergebnisse der drei Teilanalysen präsentiert und ausgewertet (Kapitel 4). Bei der Strukturlinienextraktion liegt das Augenmerk auf dem Potential des Verfahrens und seiner Anwendung. Die zwei unabhängigen vergleichenden Analysen werden zum Zwecke des Monitorings durchgeführt, zum einen mit dem Schwerpunkt der langperiodischen Betrachtung von Wattflächen, zum anderen zur Untersuchung identischer Datensätze im Bereich von Strand und Dünenflächen.

Abschließend folgen in Kapitel 5 eine Ergebniszusammenfassung und ein Ausblick für zukünftige Anwendungen und Weiterentwicklungen der Verfahren.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Airborne Laserscanning

Das flugzeuggestützte Laserscanning (Airborne Laserscanning, ALS), welches alternativ auch als Light Detection and Ranging (LIDAR) bezeichnet wird, ist eine moderne Methode zur dreidimensionalen Geländeaufnahme mit Hilfe der Laser-Technologie [Kraus, 2004]. Mit der berührungslosen Aufnahme der Erdoberfläche, dem hohen Automationsgrad bei der Messung und Weiterverarbeitung der Daten sowie der Möglichkeit, große Gebiete in kurzer Zeit wirtschaftlich zu erfassen, bietet das Airborne Laserscanning zahlreiche Vorteile gegenüber der klassischen, terrestrischen Geländeaufnahme. Das Verfahren findet Anwendung bei der Erstellung von digitalen Oberflächen- (DOM), Gelände- (DGM) und Stadtmodellen sowie bei Katastrophensimulationen (z.B. Überschwemmungen) und Monitoringaufgaben, beispielsweise im Rahmen des Küstenschutzes.

Das Messprinzip des ALS basiert auf der Distanzbestimmung zur Erdoberfläche aus wiederholten Laufzeitmessungen (vom Sender zur Erdoberfläche und zurück zum Empfänger) von ausgesendeten gebündelten Laserimpulsen, wodurch nach und nach ein Abtasten der Erdoberfläche erfolgt.

Der Abstand R ergibt sich daher aus dem halben Produkt von Laufzeit t_L und Lichtgeschwindigkeit c [Kraus, 2004].

$$R = \frac{t_L \cdot c}{2} \quad (2.1)$$

2.1.1 Sensortechnologie

Beim ALS handelt es sich um ein aktives System, da Strahlung ausgesandt und unabhängig vom Sonnenlicht empfangen wird. Der verwendete Laser (Light Amplification by Stimulated

Emmission of Radar) ist stark gebündelt, näherungsweise monochromatisch (konstante, exakt definierte Frequenz) und kohärent. Im Gegensatz zu einer natürlichen Lichtquelle, welche aufgrund von spontaner Emission von Photonen Strahlung in zufälliger Phase und Richtung abgibt, kommt es beim Laser durch stimulierte Emission zu einer gerichteten, verstärkten Photonenabgabe (Abbildung 2.1) [Wagner et al., 2003].

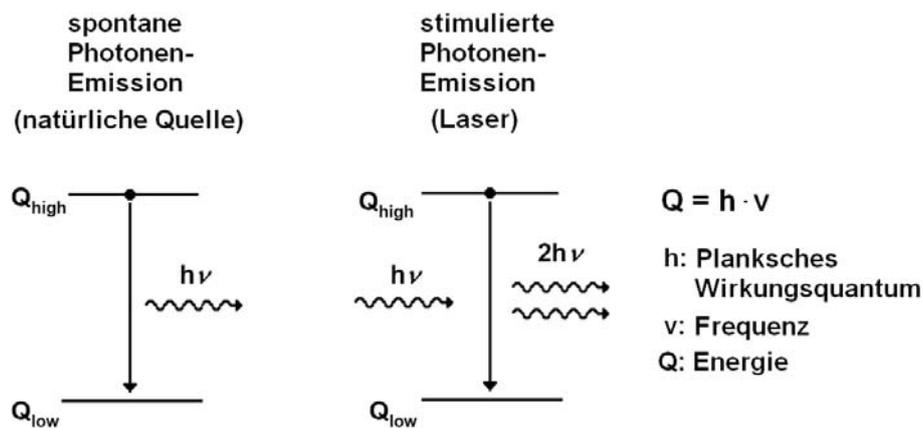


Abbildung 2.1: Vergleich von natürlicher Lichtquelle und Laser [nach Wagner et al., 2003]

Die Lasereinheit besteht aus einem Sender (dem Laser) und einem Empfänger (einer Photodiode), welche in der Regel über eine identische geometrische Position verfügen, sowie einer Kontrollmeseinheit. Die Laserpulsrate beträgt bis zu 200 kHz bei einer Pulslänge von 3-9 ns.

Für die unterschiedlichen Anwendungen stehen verschiedenen Aufnahmemodi zur Verfügung. Da der Laser aufgrund der Diffraktion in der Atmosphäre nicht als Laserpunkt, sondern in Form eines flächenhaften Footprints (Abdruck) auf die Erdoberfläche trifft, können durch einen Puls mehrere Objekte verschiedener Höhe beleuchtet werden. Dies führt zu unterschiedlichen Laufzeiten der zurückgestrahlten Teilpulse, sodass mehrere Echos aufgezeichnet werden können (z.B. first, last oder intermediate pulse). Eine Weiterentwicklung ist das Full-Waveform-Verfahren, bei dem das gesamte zurückgestrahlte Signal aufgezeichnet wird [Wagner et al., 2004].

Die Abtastung der Erdoberfläche quer zur Flugrichtung kann mithilfe verschiedener Scanningmethoden erfolgen. Die Ablenkung des Laserstrahls wird beispielsweise mit Hilfe von rotierenden oder oszillierenden Spiegeln, rotierenden Polygonspiegeln oder mit Fiberarrays erreicht.

2.1.2 Bestimmung der Laserpunktkoordinaten

Weiterhin verfügt der Laserscanner über ein dynamisches Positionierungs- und Orientierungssystem (POS), welches zur Bestimmung der Laserpunktkoordinaten erforderlich ist. Es besteht aus einem GPS-System sowie einer IMU (Inertiale Messeinheit).

In Abbildung 2.2 ist der Basiszusammenhang zwischen Referenzsystem, Flugzeugposition und aus der Laufzeit ermittelten Abstand zum Objekt dargestellt [Schenk, 2001].

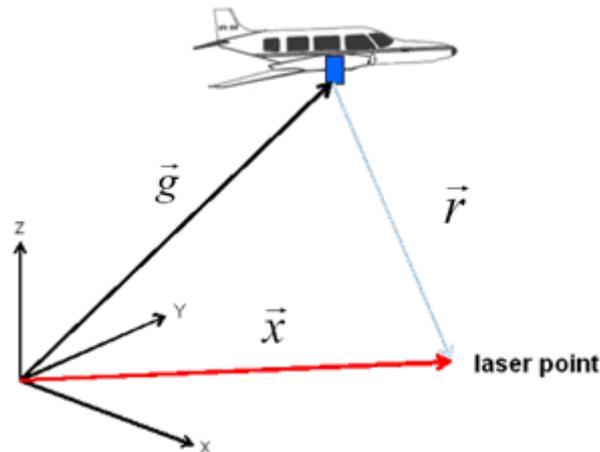


Abbildung 2.2: Bestimmung der Laserpunktkoordinaten [nach Schenk, 2001]

Vereinfacht betrachtet ergibt sich der Vektor des Objektpunktes \vec{x} im Referenzsystem aus der Summe der Vektoren vom Ursprung des Referenzsystems zur Flugzeugposition (zum Aufnahmezeitpunkt) \vec{g} sowie von der Flugzeugposition zum Objektpunkt \vec{r} .

$$\vec{x} = \vec{g} + \vec{r} \quad (2.2)$$

Das GPS-System erfasst die Position des Flugzeuges permanent mit einer Frequenz von bis zu 1 Hz. Da die Aufnahme der Laserpunkte mit einer deutlich höheren Frequenz erfolgt, muss die Position sowie Orientierung der Lasereinheit interpoliert werden. Die verwendeten Daten werden in unterschiedlichen Referenzsystemen aufgezeichnet, wie im Abbildung 2.3 zu erkennen ist.

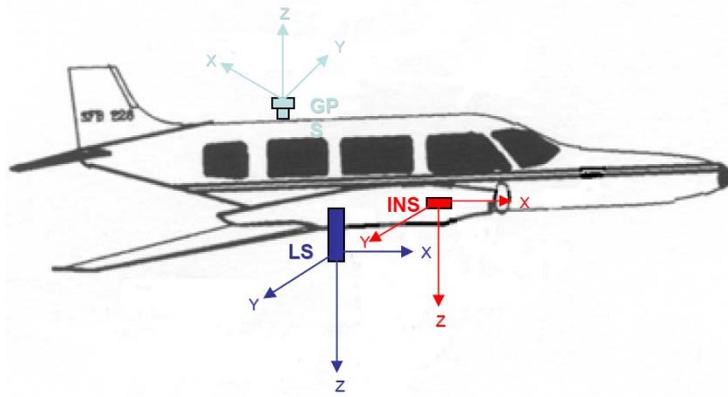


Abbildung 2.3: Verschiedene Koordinatensysteme beim Laserscanning [Schenk, 2001]

Unter Berücksichtigung des ebenfalls aufgezeichneten Scanwinkels des Laserstrahls können nun die Laserpunktkoordinaten im übergeordneten GPS-System, dem WGS84, bestimmt werden. Hierfür sind einige Transformationen erforderlich. Zunächst werden unter Verwendung der ermittelten Distanz und dem Auslenkwinkel des Laserstrahls die Koordinaten im System des Laserscanners ermittelt. Weiter erfolgt die Überführung in das lokale IMU- sowie GPS-System und anschließend in das übergeordnete Referenzsystem WGS84. Hierbei werden verschiedene Rotationsmatrizen und Transformationsparameter verwendet, welche die Lage und Orientierung der einzelnen Sensorsysteme zueinander sowie die Lage und Orientierung im übergeordneten Referenzsystem aufgrund der Flugzeugbewegungen beschreiben.

Die Exzentrizitäten der einzelnen Sensoren werden vorab durch Kalibrierung bestimmt. Projektbezogen kann dies auch mit Hilfe von ebenen, möglichst horizontalen Testflächen bekannter Höhe erfolgen. Für eine integrierte Sensororientierung können die Testflächen ebenfalls als Höheneinpasselemente verwendet werden, da es nicht möglich ist, aus der Punktmasse Passpunkte zu extrahieren. Die Streifenausgleichung erfolgt nach der Methode der kleinsten Quadrate. Abschließend können die Koordinaten mit Hilfe einer einfachen Datumstransformation in das jeweilige Landeskoordinatensystem überführt werden (z.B. Gauß-Krüger, UTM).

Insgesamt können so Genauigkeiten von bis zu ± 20 cm in der Lage und bis zu ± 15 cm in der Höhe erreicht werden. Für die Lage sind die GPS-Genauigkeit, die IMU-Orientierungsgenauigkeit sowie die Genauigkeit der Registrierung des Laserstrahl-Ablenkwinkels die limitierenden Faktoren. Die Höhengenaugkeit wird durch die GPS-Genauigkeit sowie die Genauigkeit der Laserentfernungsmesseinrichtung begrenzt. Weiterhin wirkt sich eine steigende Geländeneigung negativ auf die Höhengenaugkeit aus, da mit

steigender Geländeneigung der Footprint größere Bereiche verschiedener Höhe abdeckt. Die Flughöhe beeinflusst die erzielbare Genauigkeit ebenfalls: Zum einen sind die Genauigkeiten des Abtastwinkels sowie die der IMU höhenabhängig. Weiterhin resultiert aus einer steigenden Flughöhe ein wachsender Abtastfleck und eine Zunahme der Atmosphärenstörung, sodass die Flughöhe in der Praxis auf 0.5 – 1.5 km begrenzt ist [Kraus, 2004].

Ebenfalls relevant ist das Reflexionsverhalten der angestrahlten Objekte. Ideal ist eine raue Oberfläche, welche eine diffuse Reflexion bewirkt und sicherstellt, dass Teile der emittierten Strahlung zum Laserscanner zurückgesandt werden. An glatten Oberflächen (z.B. Wasser) können aufgrund von gerichteten Reflexionen Datenlücken entstehen, wenn der Großteil der Strahlung nicht zum Empfänger zurückgelangt. Mehrfachreflexionen (Multipath) führen zu längeren Laufzeiten und verursachen daher grobe Fehler.

2.2 DGM-Modellierung

Das digitale Oberflächenmodell (DOM) bzw. das digitale Geländemodell sind gängige Folgeprodukte der aus den Laserscanningdaten resultierenden unregelmäßigen 3D-Punktwolke. Hier liegen die Höheninformationen in einem gleichmäßigen Raster oder in Form einer Dreiecksvermaschung vor.

Das DOM beschreibt die Erdoberfläche mit allen auf ihr vorhandenen natürlichen und künstlichen Objekten, wie beispielsweise Vegetation und Gebäude. Beim DGM hingegen wird ausschließlich die Geländeoberfläche ohne die sich darauf befindenden Objekte modelliert [Kraus, 2004]. Zur DGM-Generierung aus den 3D-Laserpunkten werden die natürlichen und künstlichen Objekte auf dem Gelände eliminiert. Dies kann durch verschiedene Filterverfahren erfolgen, wie zum Beispiel auf Morphologie und Steigung basierte Filter [Vosselmann, 2002], der robusten Filterung [Kraus und Pfeiffer, 1998] oder der progressiven TIN-Verdichtung [Axelsson, 2000].

Das im Folgenden verwendete Verfahren ist die robuste hierarchische Filterung, welche auf Grundlage von [Kraus, 2004] sowie [SCOP, 2008] näher erläutert wird.

2.2.1 Hierarchische Robuste Filterung

Das Verfahren der hierarchischen robusten Filterung basiert auf linearer Prädiktion, wobei eine ausgleichende Fläche iterativ in die Laserpunkte geschätzt wird. In Abhängigkeit der Residuen erhält jeder Laserpunkt ein Gewicht. Der Gewichtung liegt die Annahme zugrunde, dass Punkte oberhalb der ausgleichenden Fläche zu Objekten gehören, während Punkte unterhalb der Fläche dem Gelände zuzuordnen sind.

Im ersten Berechnungsschritt wird die ausgleichende Fläche unter Verwendung der Höhenwerte aller Laserpunkte und identischer Gewichte bestimmt. Sie entspricht dem Mittel aus Objekt- und Geländepunkten. Im Rahmen der Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate fallen Verbesserungen v_i an. Per Definition werden Punkten unterhalb der Ausgleichsfläche positive Werte zugeordnet, während Punkte oberhalb der Fläche über negative Residuen verfügen (Abbildung 2.4). In Abhängigkeit von den zuvor ermittelten Verbesserungen werden nun unter Verwendung einer Gewichtsfunktion für jede z-Koordinate der Laserpunkte Gewichte p_i generiert. Diese fließen in die Ausgleichung im nächsten Iterationsschritt ein.

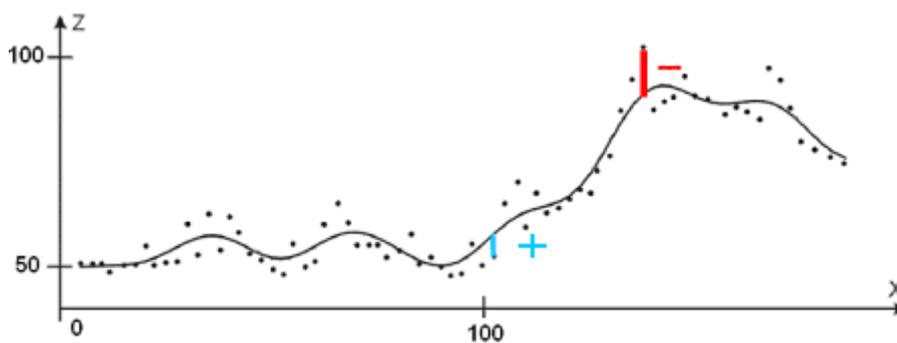


Abbildung 2.4: Definition von positiven und negativen Residuen [nach Kraus und Pfeiffer, 1998]

Bei der Wahl der Gewichtsfunktion wird die Annahme getroffen, dass das gesuchte Geländemodell unterhalb der ausgleichenden Fläche liegt. Somit werden für Laserpunkte mit positiven Verbesserungen, welche unter der ausgleichenden Fläche liegen und damit mit hoher Wahrscheinlichkeit zum Gelände gehören, größere Gewichte vergeben werden, als für die Punkte mit negativen Verbesserungen. Zudem ist eine Nullpunktverschiebung g erforderlich, da Punkte mit negativen Residuen nahe Null ein geringeres Gewicht als Punkte mit einer positiven Verbesserung erhalten sollen.

Die im Folgenden vorgestellte Gewichtsfunktion ist daher für eine DGM-Berechnung aus Airborne Laserscanningdaten geeignet (Formel 2.3, Abbildung 2.5):

$$p_i = \begin{cases} 1 & v_i \leq g \\ \frac{1}{1 + (a(v_i - g))^b} & g < v_i \leq t \\ 0 & t < v_i \end{cases} \quad (2.3)$$

mit $a = \frac{1}{h}$, $b = 4 \frac{h}{s}$

Die Parameter a und b steuern das Abklingen der Gewichtsfunktion von links nach rechts. Der Parameter h beschreibt die Halbwertsbreite der Funktion, s die Steigung im Punkt h . An der Stelle t wird die Funktion abgeschnitten, Residuen mit einem größeren Wert werden mit Null gewichtet und in den folgenden Iterationen nicht weiter berücksichtigt.

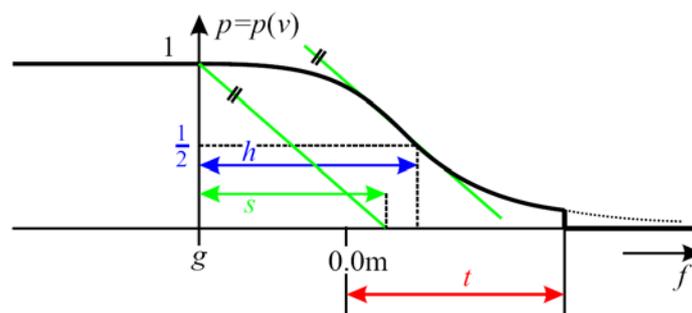


Abbildung 2.5: Einfache Gewichtsfunktion [SCOP, 2008]

In der in Abbildung 2.5 dargestellten Gewichtsfunktion werden Ausreißer nach unten, zum Beispiel durch Multipath entstehende grobe Fehler, nicht berücksichtigt. Abhilfe schafft eine Spiegelung der Gewichtsfunktion an dem Funktionswert der Nullpunktverschiebung g , wie sie auch in der Software *SCOP++* implementiert ist.

Das iterative Verfahren der Gewichtsbestimmung und erneuten Ausgleichung wird so lange wiederholt, bis sich die interpolierte Fläche nicht mehr signifikant ändert. Abschließend erfolgt eine Ausgleichung mit den verbleibenden Punkten ohne die Verwendung von Gewichten. Aus der so entstandenen mathematisch definierten Oberfläche können nun die regelmäßigen, rasterförmigen Höhenwerte für die Generierung des DGM abgeleitet werden.

Die kleinste Quadrate Ausgleichungen erfolgen nach dem Prinzip der linearen Prädiktion. Diesem Verfahren liegt die Annahme zugrunde, dass sich die Höhen aus einem Trend T , einem Signal s und einem Messfehler r zusammensetzen (Formel 2.4).

$$H = T + s + r \quad (2.4)$$

Zunächst erfolgt die Bestimmung des Trends, welcher von dem verbleibenden Signal abgespalten wird. Der Signalanteil s ist in Abhängigkeit von der Distanz der Punkte $P_i P_k$ korreliert. Auf Basis der Korrelation wird eine glockenförmige Korrelationsfunktion $C(P_i P_k)$ aufgestellt, wobei deren Parameter aus der Verteilung der Signale geschätzt werden. Das Signal wird unter Verwendung von Kovarianzen zwischen den Neu¹- und Stützpunkten c , sowie Kovarianzen zwischen den Stützpunkten C für die Neupunkte sowie für die Stützpunkte neu geschätzt [Rottensteiner, 2010] (Formel 2.5).

$$s_{neu} = c^T C^{-1} s \quad (2.5)$$

Die hierarchische robuste Filterung ergänzt den bisher beschriebenen Berechnungsablauf um eine hierarchische Annäherung mit Hilfe von Datenpyramiden, welche aus den gegebenen Laserscanningdaten erstellt werden. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt in der beschleunigten Berechnung im Vergleich zur Berechnung unter Verwendung der Originalauflösung. Die Erstellung der Datenpyramide erfolgt mit Hilfe eines gleichmäßigen Rasters, welches zunächst über den Originaldatensatz gelegt wird. Für jede Zelle wird ein Punkt ausgewählt, beispielsweise der niedrigste, mittlere, höchste oder der am nächsten am Zellenmittelpunkt gelegene. Dieses Verfahren wird bis zur größten gewünschten Auflösungsstufe wiederholt. Auf Grundlage der geringsten Auflösung wird nun eine robuste Filterung durchgeführt und ein DGM generiert. Anschließend kann das DGM mit den Laserdaten der nächst höheren Auflösungsstufe kombiniert werden. Hierfür werden die Höhendifferenzen zwischen den originalen Laserdaten und dem aktuellen DGM berechnet und bei Überschreiten eines festgelegten Grenzwertes die entsprechenden Laserpunkte aussortiert. Mit Hilfe des so entstehenden Datensatzes wird eine neue Interpolation und DGM-Berechnung durchgeführt. Der Berechnungsablauf wird wiederholt, bis die Originalauflösung erreicht ist. In der Regel sind zwei bis drei Pyramidenstufen ausreichend.

¹ Die Neupunkte entsprechen den Punkten des DGM-Rasters.

2.3 Strukturlinienextraktion

Die Strukturlinienextraktion dient der Ableitung markanter Geländestrukturen, um so eine Genauigkeitssteigerung des Geländemodells in diesen Bereichen zu erzielen. Weiterhin kann die explizite Bestimmung der Bruchkanten aus Laserscanningdaten zur Aufnahme markanter Strukturen in schwer zugänglichen oder großräumigen Gebieten sowie für Aufgaben des Monitorings und der Detektion von Veränderungen nützlich sein. In dem im Folgenden untersuchten Beispiel aus dem Küstenbereich werden die Bruchkanten von Prielverläufen der deutschen Nordseeküste betrachtet. Im Vergleich zur terrestrischen Datenaufnahme, welche durch hohen personellen und finanziellen Aufwand in der Wirtschaft nur schwer Anwendung findet, bietet die Ableitung von Strukturlinien aus Laserscannerdaten eine kostengünstige Alternative.

Hierbei können verschiedene Methoden Verwendung finden. Im Folgenden wird das Verfahren von Brzank (2008) eingesetzt, welches auf der Rekonstruktion der Geländeoberfläche mit Hilfe von geeigneten mathematischen Funktionen basiert.

Die Berechnungen der Strukturlinien erfolgen auf Grundlage der Originaldaten. So sind höhere Genauigkeiten zu erzielen als bei der Anwendung von Kanten- und Neigungsoperatoren auf das zuvor berechnete Geländemodell. Die Höhenwerte der Laserscannerpunkte fließen als Beobachtungen in die Berechnung ein, die Parameter der Flächenfunktionen werden als Unbekannte im Rahmen einer Ausgleichung geschätzt. Die 3D-Koordinaten der Strukturlinienpunkte können anschließend aus den Flächenfunktionen abgeleitet werden.

Für die Vorverarbeitung werden aus einem DGM-basierten Höhenbild Mittelachsen zwischen den Ober- und Unterkanten der zu extrahierenden Strukturen als Näherungswerte für die nachfolgenden Berechnungen bestimmt. Aus der Laserpunktwolke werden mit Hilfe eines Puffers um die Mittelachsen Punkte ausgeschnitten und somit die zur Weiterverarbeitung erforderliche Datenmenge reduziert. Die ausgeschnittenen Punkte werden in kleinere Berechnungsabschnitte, sogenannte Patches, unterteilt und anschließend eine Fläche auf Grundlage der Tangens hyperbolicus Funktion in die Laserscanningpunkte jedes Patches geschätzt. Die Koordinaten der Strukturlinien können dann als Funktionswerte aus den tanh-

Funktionen abgegriffen werden. Der Berechnungsablauf ist in Abbildung 2.6 schematisch zusammengefasst.

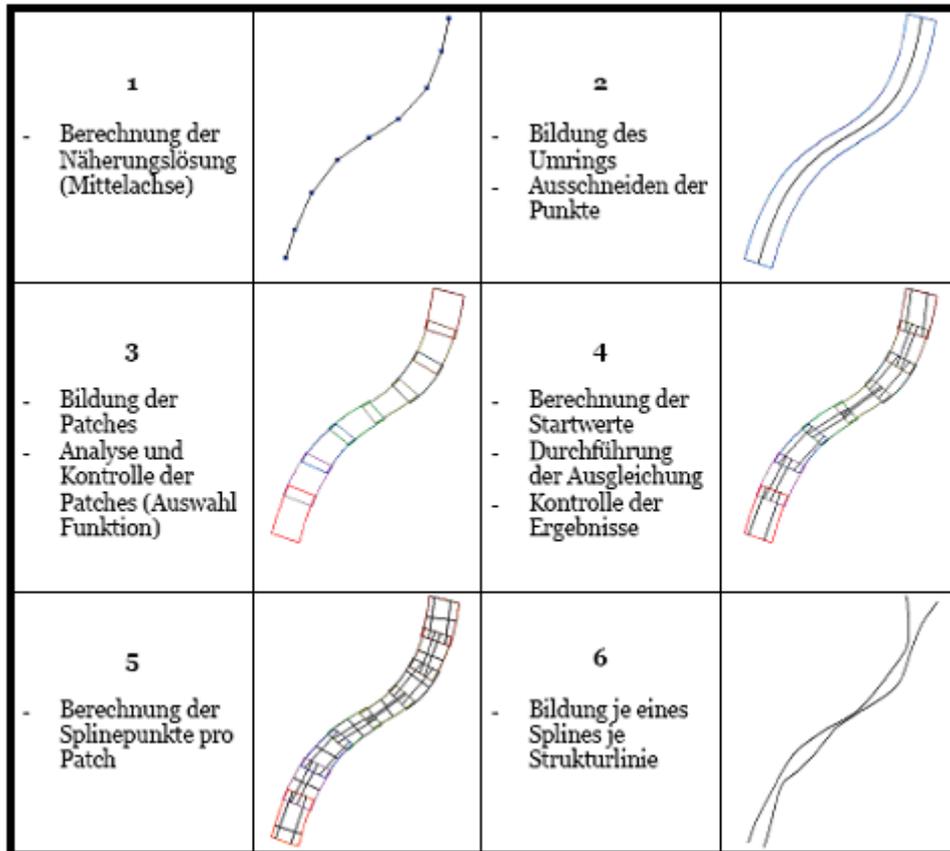


Abbildung 2.6: Schematische Berechnungsablauf der Strukturlinienbestimmung
[Exstruct, 2008]

Die Berechnung der Strukturlinien erfolgt im Rahmen einer nicht-linearen Ausgleichung. Daher sind Näherungslösungen zur Berechnung der Startwerte für die Flächenfunktionen erforderlich. Zunächst wird ein digitales Geländemodell aus den Laserscanningdaten erstellt und als Grauwertbild dargestellt. Mit Hilfe von Bildverarbeitungsoperatoren können Kanten in dem Grauwertbild detektiert und als Näherungslösung für die Mittelachsen der Patches abgeleitet werden. Sie dienen außerdem der Berechnung der Umringgrenzen zum Ausschneiden der zu verwendenden Punkte aus der Punktwolke.

Durch die Festlegung der Umringe um die Mittelachsen mit Hilfe eines Puffers wird sichergestellt, dass nur Punkte aus dem unmittelbaren Umfeld für die Berechnung verwendet werden. Für die Patches müssen in Abhängigkeit von der gegebenen Punktdichte und der erforderlichen Genauigkeit Länge und Überlappungsbereich festgelegt werden, bevor ihnen die Laserpunkte zugeordnet werden. Die Zuordnung erfolgt über einen definierten Abstand von der Mittelachse, wahlweise können Punkte in Bereichen starker Richtungsänderungen auch zwei Abschnitten zugeordnet werden.

Entscheidend für eine gute Genauigkeit ist die Verwendung geeigneter Flächenfunktionen, welche die Oberfläche hinreichend gut beschreiben. Die im Küstenbereich immer paarweise auftretenden Strukturlinien (Ober- und Unterkante) sollen gemeinsam mit einer Funktion dargestellt werden. Die Strukturlinienpunkte können nachfolgend aus den Krümmungmaxima der Funktion abgeleitet werden. Diese ergeben sich durch Nullsetzen der ersten Ableitung. In diesem Fall werden Tangens hyperbolicus Funktionen verwendet, welche mit Hilfe von vier Parametern modelliert werden können (Formel 2.6, Abbildung 2.7):

$$g(x) = s \tanh(f(x + p)) + k \quad (2.6)$$

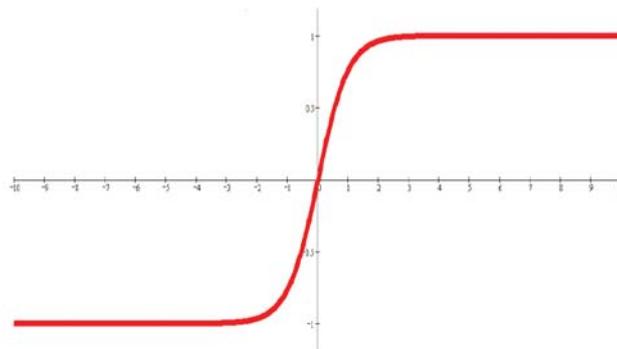


Abbildung 2.7: Tangens hyperbolicus Funktion [Exstruct, 2008]

- s: Skalierungsfaktor (zweifacher Höhenunterschied zwischen dem oberen und dem unteren Plateau)
- f: Abstand der Krümmungmaxima im Grundriss (großer Wert f: obere und untere Kante haben die gleiche x-Koordinaten, kleiner Wert: obere und untere Kante entfernen sich von einander)
- p: Verschiebung quer zur Bruchkantenrichtung
- k: Verschiebung in z-Richtung

Die Modellierung der Strukturlinien erfolgt auf Grundlage der Ableitung der Krümmungmaxima. Alternativ kann eine Stufenkante bzw. Rampenkante gewählt werden (Abbildung 2.8).

Im Fall der hier betrachteten Prielkanten werden die Krümmungmaxima zur Modellierung verwendet.

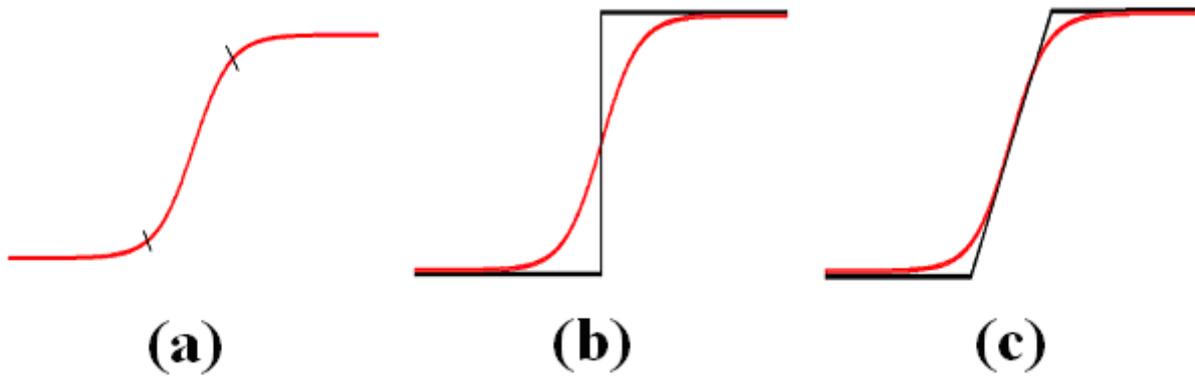


Abbildung 2.8: Verschiedene Strukturlinienvarianten:
(a) Krümmungsmaxima, (b) Stufenkante, (c) Rampenkante [Exstruct, 2008]

Als nächstes werden für die Durchführung der Ausgleichung Startwerte für jedes Patch aus den Näherungswerten generiert, im Rahmen der Ausgleichung die Parameter für jedes einzelne Patch iterativ bestimmt und die Ergebnisse kontrolliert. Anschließend können für alle Patches die Strukturlinienpunkte berechnet und mit Hilfe einer Splineinterpolation bei Bedarf verdichtet werden.

3 Datensätze und Datenverarbeitung

Im Folgenden werden drei Untersuchungen mit Daten aus Watt- und umliegenden Strand- und Küstenbereichen durchgeführt. Die erste befasst sich mit der allgemeinen Analyse von Laserscanningdaten und der Möglichkeit, aus diesen Daten signifikante Strukturen der Wattoberfläche abzuleiten. Hierzu werden mit Hilfe der Strukturlinienextraktion markante Geländestrukturen aus der unregelmäßigen Punktwolke extrahiert. Diese können in die anschließende Modellierung eines digitalen Geländemodells einfließen, sodass genaue Höhenwerte der Wattoberflächen in einem regelmäßigen Raster vorliegen.

Die folgenden zwei Untersuchungsabschnitte befassen sich mit dem Vergleich von Daten verschiedener Epochen mit der Zielsetzung des Monitorings. Zunächst werden zwei Datensätze von Wattflächen mit einer möglichst langen Zeitspanne zwischen den Aufnahmezeitpunkten verglichen. Auf diese Weise können langfristige Änderungen der Prielverläufe detektiert werden. Hierfür steht zum einen ein aktueller Laserscanningdatensatz zur Verfügung. Weiterhin wird ein ca. 30 Jahre alter Datensatz von terrestrischen Vermessungen verwendet. Die Datensätze unterscheiden sich somit in ihrem Aufnahmeverfahren. Zudem liegen die terrestrischen Daten nicht flächendeckend vor und können aufgrund der geringen Punktdichte und zu erwartenden Interpolationsfehlern nicht für die Erstellung eines DGM genutzt werden. Der Vergleich erfolgt daher nur punktwise für die unregelmäßig vorliegenden Messwerte.

Darüber hinaus werden zwei Laserscanningdatensätze, welche mit einem Abstand von sechs Jahren aufgenommen wurden, gemeinsam untersucht. Die betrachtete Zeitspanne ist damit zwar deutlich geringer, allerdings können so Datensätze identischen Aufnahmetyps und gleichen Genauigkeitsniveaus flächendeckend miteinander verglichen werden. Die Analysen erfolgen auf Grundlage der aus den Laserscanningdaten generierten Geländemodelle.

Die verwendeten Datensätze und ihre Verarbeitung sollen in diesem Kapitel vorgestellt werden. Für die allgemeine Analyse von Laserscanningdaten und für den Vergleich von Wattstrukturen über einen langen Zeitraum werden die in Abschnitt 3.1 beschriebenen Daten genutzt. Zudem werden die aus den Laserscanningdaten abgeleiteten Strukturlinien und das DGM für die verschiedenen Testgebiete vorgestellt.

Kapitel 3.2 beschreibt die verwendeten Daten für den Vergleich von Laserscanningaufnahmen im Strand- und Dünenbereich über einen kürzeren Zeitraum sowie deren Verarbeitung zu Geländemodellen.

3.1 Daten zur ALS-Analyse und zum Vergleich von Wattstrukturen nach 30 Jahren

3.1.1 Datensätze

Für die allgemeine Analyse und Weiterverarbeitung von Laserscanningdaten sowie den Vergleich von Wattstrukturen über einen Zeitraum von 30 Jahren wird im Rahmen dieser Arbeit ein Gebiet im norddeutschen Wattenmeer zwischen der niedersächsischen Nordseeküste und der ostfriesischen Insel Spiekeroog untersucht (Abbildung 3.1). Für dieses Gebiet liegen ein aktueller Laserscanningdatensatz (3.1.1.1) sowie terrestrisch erfasste Daten aus den 80er Jahren (3.1.1.2) vor.

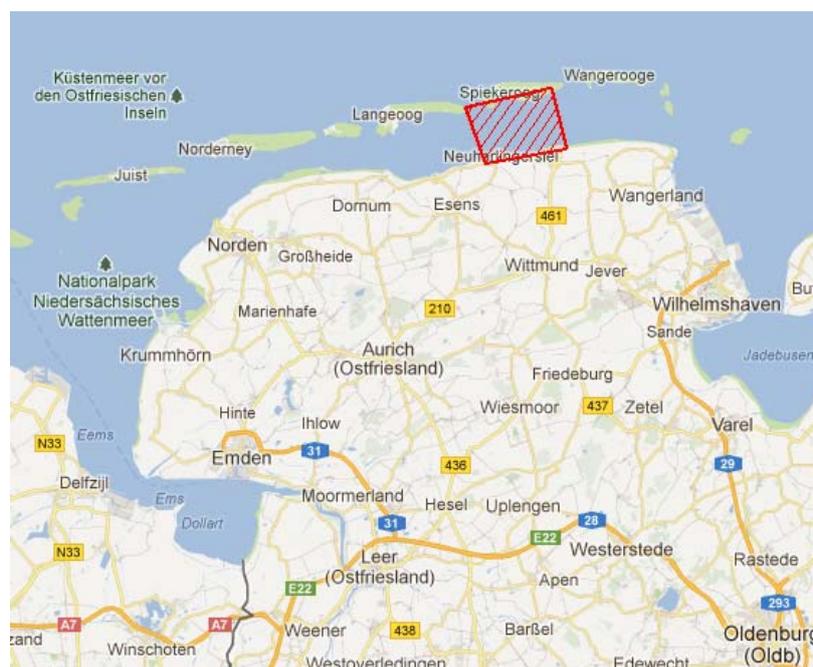


Abbildung 3.1: Übersichtsdarstellung Messgebiet [Google Maps - © 2012 Google]

3.1.1.1 Datensatz aus Airborne Laserscanning

Der Airborne Laserscanningdatensatz wurde im Februar 2011 im Auftrag des NLWKN (Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz) aufgenommen. Die Befliegung des entsprechenden Gebietes wurde von der Firma MILAN Geoservice GmbH mit einem Laserscanner des Typs ‚LMS-Q560‘ durchgeführt. In Tabelle 3.1 sind die signifikanten Kenngrößen des Laserscanners zusammengestellt [Projektdoc, 2011]. Die Befliegung erfolgte an zwei Tagen bei einer Flughöhe von 600 m und einer Fluggeschwindigkeit von 185-200 km/h. Für die kinematische GPS-Lösung wurden SAPOS[®]-Stationen als Referenz verwendet. Weitere Informationen über die Laserscannerbefliegung sind der entsprechenden Projektdokumentation [Projektdok, 2011] zu entnehmen.

maximale Flughöhe	1500 m
erzielbare Entfernungsauflösung	2 cm (Flughöhe < 1500 m) 1 cm (Flughöhe < 650 m)
erzielbare Genauigkeit im Postprocessing	Position: max. 0.1 m RMS Lage: max. 0.005° RMS
Rauschen	± 2 cm RMS
Laserstrahl-Divergenz	0.5 rad
Pulsfrequenz	100 kHz
Wellenlängenbereich des Lasers	nahes Infrarot
Scanning-Methode	rotierender Polygon-Spiegel
Scan-Winkel	±22.5° (bis ± 30° möglich)
Aufnahme-Modi	first und/oder last, full waveform
Messbereich (Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit)	0-40 °C, bis 80 %
Maße	560 x 200 x 217 mm ³
Masse	20 kg

Tabelle 3.1: Signifikante Kenngrößen des Laserscanners des Typs ‚LMS-Q560‘

Die Prozessierung der Rohdaten bis zur Berechnung von Koordinaten im Referenzsystem liegt vollständig auf der Seite des Auftragnehmers. Die Abgabe des Datensatzes erfolgte in Form von 3D-Koordinaten im ASCII-Format.

3.1.1.2 Terrestrischer Datensatz

Die terrestrisch erfassten Daten stammen aus den 1980er Jahren. Die Datenaufnahme wurde in den trocken fallenden Bereichen mittels klassischer Vermessung durchgeführt. Für die dauerhaft überfluteten Gebiete wurden zudem Echolotdaten hinzugezogen. Auftraggeber war auch hier der NLWKN mit Sitz in Norden und Norderney.

Analog zum oben beschriebenen Laserscannerdatensatz liegt auch hier ein Datensatz von 3D-Koordinaten im ASCII-Format vor.

3.1.1.3 Testgebiete

Die Analysen der Daten erfolgt separat für drei verschiedene Testgebiete (TG). So können topographisch relevante Gebiete gesondert betrachtet werden. Die Testgebiete wurden aus den gegebenen Originaldatensätzen ausgewählt und sind in Abbildung 3.2 in grün gemeinsam mit den Originaldatensätzen dargestellt. Das betrachtete Prielsystem verläuft von dem Bereich zwischen den Inseln Langeoog und Spiekeroog südlich der Insel Spiekeroog bis zur Festlandküste.

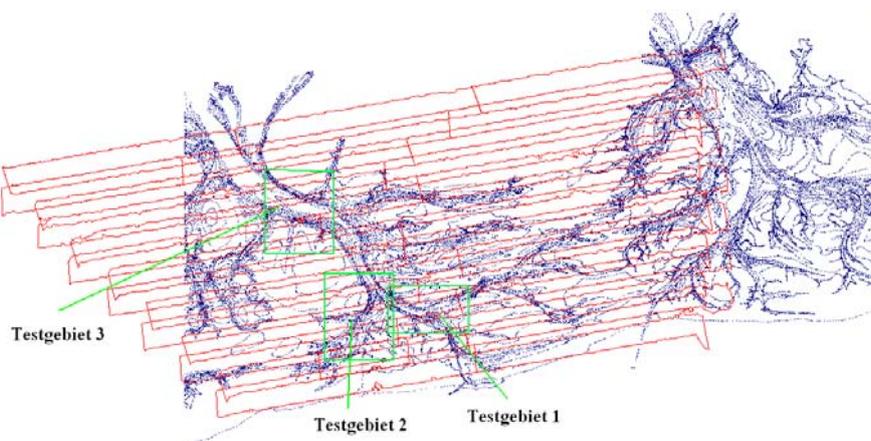


Abbildung 3.2: Überblick der Datensätze
blau: terrestrische Daten, rot: Laserscanning-Flugstreifen, grün: ausgewählte Testgebiete

Das erste Testgebiet zeigt einen Ausschnitt des Priels im Bereich der Ausläufer entlang der Richtung des Hauptastes. Das Zweite beinhaltet einen Seitenarm sowie dessen Mündung in den Hauptarm des Prieles. Diese beiden Gebiete befinden sich im Bereich der Festlandküste, während für das dritte ein Ausschnitt des Hauptarmes selbst gewählt wurde, welcher sich in Richtung der Inseln vor dem Bereich der ‚Prielmündung‘ befindet. Die Testgebiete umfassen jeweils eine Fläche von 2.5 bis 4.0 km². Für die Laserscanningdaten ergibt sich eine Punktdichte von durchschnittlich 2 Punkten pro m², während für die terrestrischen Daten im Durchschnitt 2 Punkte auf eine Fläche von mehr als 300 m² kommen. Eine Übersicht über die Datensätze in den jeweiligen Gebieten geben Tabelle 3.2 und die Abbildungen auf den Seiten 20 und 21.

	Testgebiet 1		Testgebiet 2		Testgebiet 3	
	LS	TR	LS	TR	LS	TR
Ausdehnung Nord-Süd [km]	1.2		2.2		2.2	
Ausdehnung Ost-West [km]	2.1		1.8		1.8	
Fläche [km ²]	2.5		4.0		4.0	
Anzahl der Messpunkte	4 671 410	1602	8 993 721	2466	7584750	1966
Punktdichte [Pkte/m²]	1.8	0.0006	2.3	0.0006	2.0	0.0005

Tabelle 3.2: Kenngrößen der Testgebiete für die Laserscanning- (LS) und terrestrischen (TR) Daten

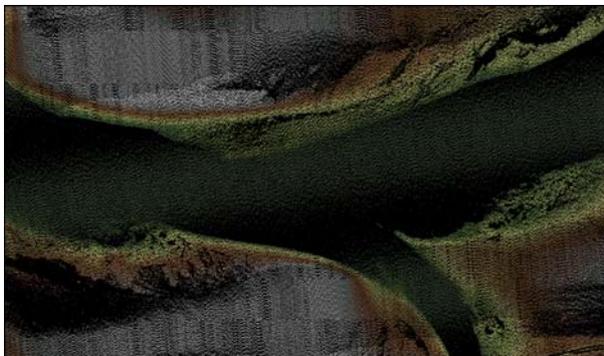


Abbildung 3.3: TG 1 - Laserscanningdatensatz

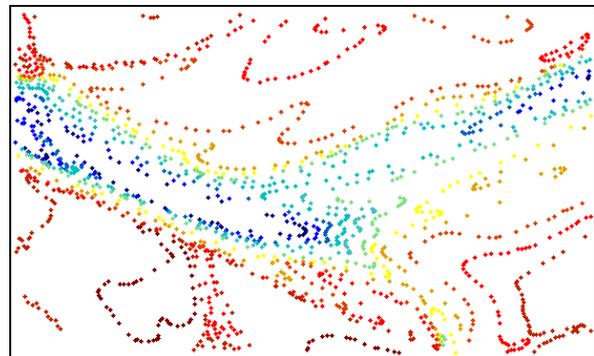


Abbildung 3.4: TG 1 – terrestrischer Datensatz

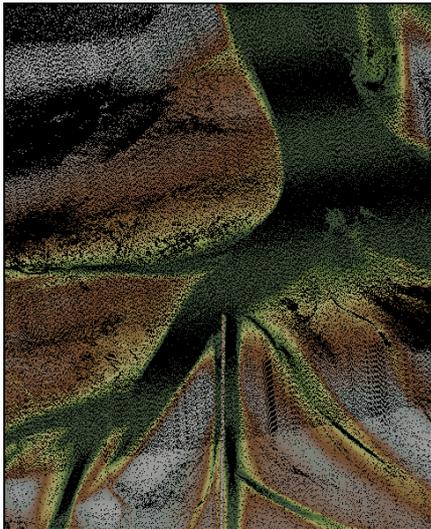


Abbildung 3.5: TG2 – Laserscanningdatensatz

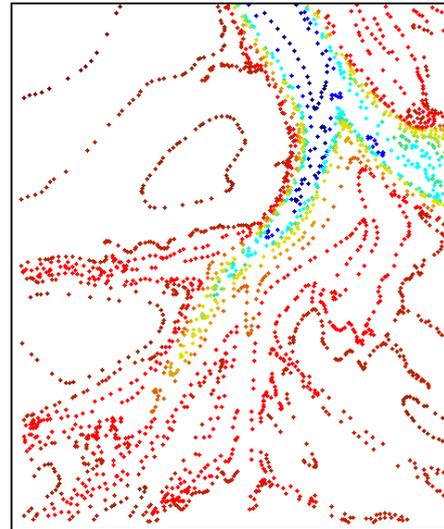


Abbildung 3.7: TG 2 – terrestrischer Datensatz

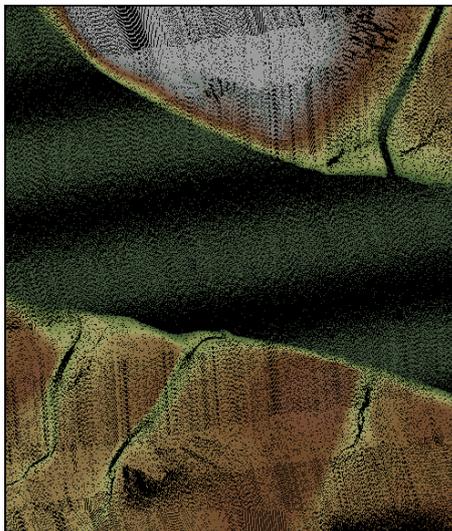


Abbildung 3.6: TG 3 - Laserscanningdatensatz

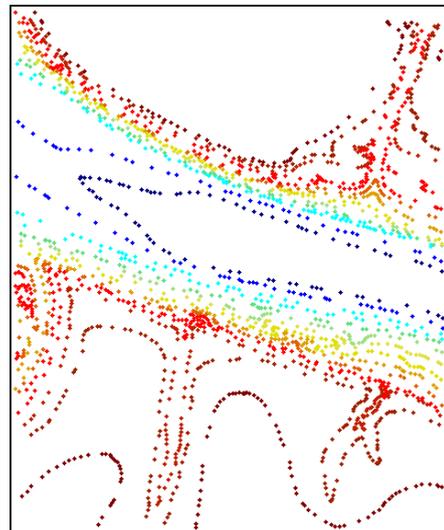


Abbildung 3.8: TG 3 - terrestrischer Datensatz

3.1.2 Verarbeitung der Laserscanningdaten

3.1.2.1 Bestimmung von Strukturlinien

Für das erste Testgebiet werden beispielhaft markante Geländestrukturen aus den Laserscanningdaten mit Hilfe der Software *Exstruct* bestimmt. Das implementierte Berechnungsverfahren entspricht der in Kapitel 2.3 beschriebenen Methode der Rekonstruktion der Geländeoberfläche mit Hilfe von Flächenfunktionen. Die für die

Näherungslösung erforderliche Berechnung eines digitalen Geländemodells und des darauf aufbauenden Grauwertbildes wird mit der Software *Barista* durchgeführt.

Auf Grundlage des aus einem Geländemodell abgeleiteten Grauwertbildes wendet die Software *Exstruct* einen Kantenoperator sowie eine Non-Maximum-Suppression an, um so die Mittelachsen der zu untersuchenden Bereiche zu bestimmen. Hierbei zeigt sich für den ausgewählten Datensatz, dass trotz zusätzlich durchgeführter Grauwertspreizung nur partiell Kanten erkannt werden (Abbildung 3.9). Die Ursache liegt in den teilweise nur sehr geringen Höhenunterschieden in einigen Prielbereichen. Es erfolgt daher eine manuelle Nachbearbeitung, in der einzelne Kanten verbunden oder gelöscht werden. Die Abbildung 3.10 zeigt die extrahierten Strukturlinien vor dem Orthophoto des ersten Testgebiets.

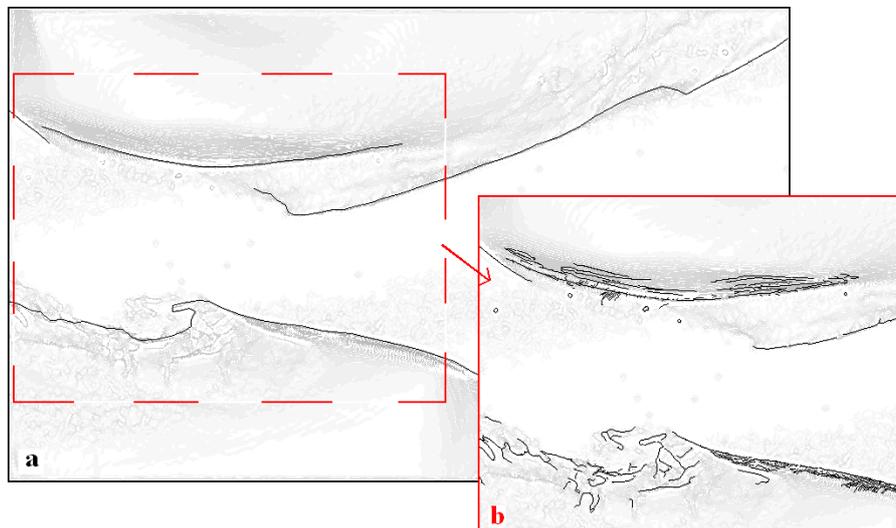


Abbildung 3.9: manuelle (a) und automatische (b) Kantenextraktion

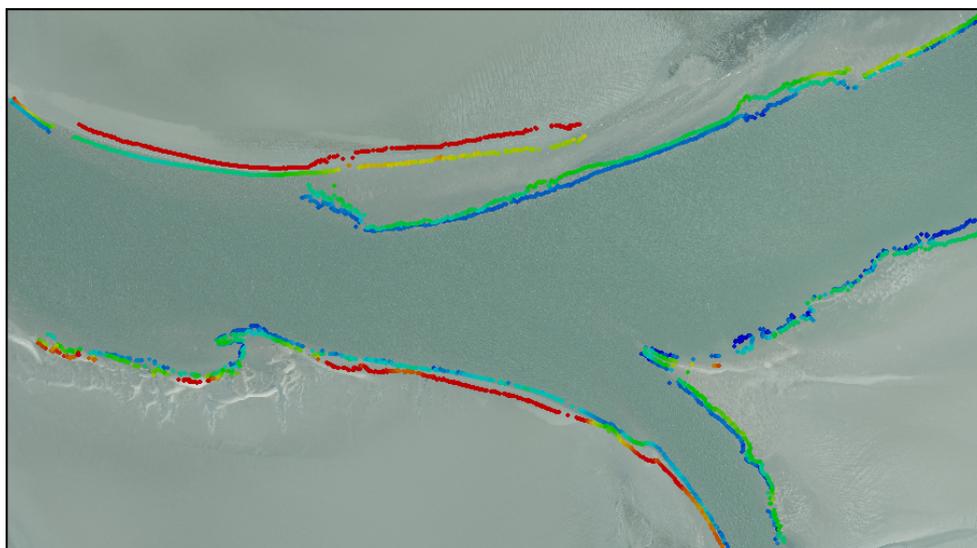


Abbildung 3.10: Extrahierte Strukturlinien (TG 1)

3.1.2.2 DGM-Generierung

Die DGM-Generierung erfolgt mit Hilfe der Software *SCOP++*. In Kapitel 2.2 ist der dafür verwendete Berechnungsalgorithmus der hierarchischen robusten Filterung beschrieben.

Die DGM-Generierung wird mit einer Rastergröße von 1m durchgeführt. Für die robuste hierarchische Filterung wird der Standard-Berechnungsalgorithmus der Software lediglich um einen zusätzlichen Schritt („Fill void areas“) ergänzt, in welchem neue Punkte in Gebieten mit Datenlücken eingefügt werden. Auf diese Weise können kleinere Bereiche ohne Information aus der Laserscanningpunktwolke, wie sie beispielsweise gerade bei wasserbedeckten Gebieten auftreten, überbrückt werden.

Abbildung 3.11 zeigt die für die drei Testgebiete des Laserscannerdatensatzes generierten Geländemodelle. Für das erste Testgebiet wird zusätzlich ein DGM unter Einbeziehung der in Absatz 3.1.2.1 ermittelten Strukturlinien in die Berechnung erstellt.

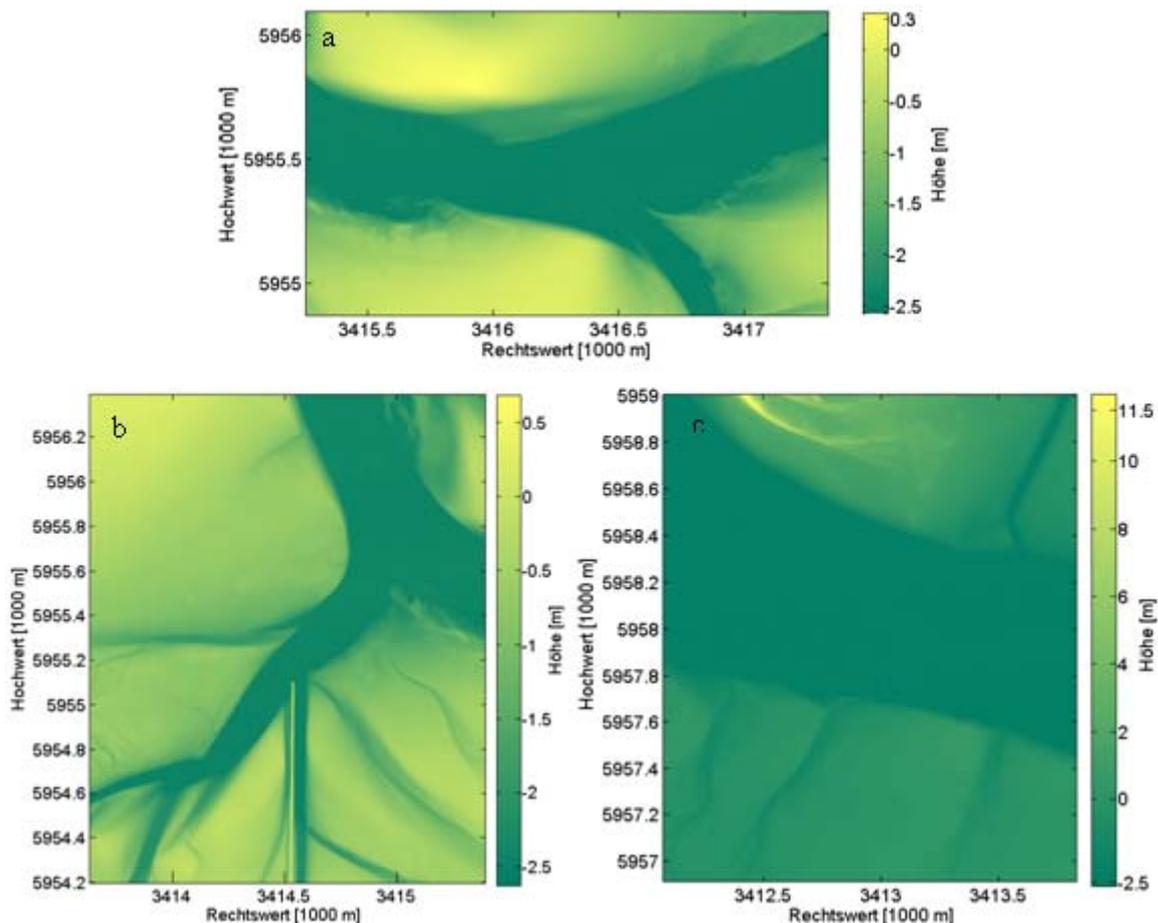


Abbildung 3.11: Digitale Geländemodelle aus dem Laserscanningdatensatz für die Testgebiete (a: TG 1, b: TG 2, c: TG 3)

Die Höhengenaugigkeit der digitalen Geländemodelle aus Laserscanningdaten hängt von der Punktdichte sowie der Höhengenaugigkeit der einzelnen Laserpunktmessung $s_{z,LS}$ ab (Formel 3.1).

$$s_{z,DGM} = \frac{s_{z,LS}}{\sqrt{\text{Punktdichte}}} \quad (3.1)$$

Bei einer standardmäßig anzusetzenden Höhengenaugigkeit von $s_{z,LS} = 15 - 30\text{cm}$ für Laserscannerdaten und einer durchschnittlichen Punktdichte von 2 m in den Testgebieten, ergibt sich für die drei Testgebiete somit eine Höhengenaugigkeit für das DGM von 0.1-0.2 m.

3.2 Daten für den Vergleich von Küstengebieten und Wattstrukturen nach sechs Jahren

3.2.1 Datensätze

Für den Vergleich von Küstengebieten und Wattstrukturen über einen Zeitraum von sechs Jahren wird ein Gebiet im norddeutschen Wattenmeer um den westlichen Bereich der ostfriesischen Insel Juist untersucht (Abbildung 3.12).



Abbildung 3.12: Übersichtsdarstellung Messgebiet [Google Maps - © 2012 Google]

Für dieses Gebiet liegen zwei Laserscanningdatensätze aus den Jahren 2004 und 2010 vor, die in Abbildung 3.13 im Überblick dargestellt sind. Der erste Datensatz wurde am 31.03.2004 mit dem Scanner ‚ALTM2050‘ aufgenommen, welcher eine Wellenlänge von 1047 nm verwendet. Die Aufnahme des zweiten Datensatzes erfolgte in der Zeit vom 18.03. bis 17.06.2010 mit dem System ‚Harrier 56‘ der Firma TopoSys/Trimble. In insgesamt 41 Flügen wurde eine Fläche von 1.602 km² aufgenommen.

Tabelle 3.3 fasst die relevanten Aufnahmeparameter beider Datensätze zusammen. Die Koordinaten wurden im Bezugssystem UTM bestimmt und anschließend in das Gauß-Krüger-Koordinatensystem transformiert.

	Datensatz 2004	Datensatz 2010
Flughöhe	1000 m	400 m
Fluggeschwindigkeit	--	198 km/h
Scanrate	--	150 kHz
Pulsrate	50 kHz	110 kHz
maximaler Scanwinkel	32°	--
Messpunktdichte	1.9 Punkte/m ²	4 Punkte/m ²
Positionierungsgenauigkeit	--	Lage: 10 cm, Orientierung 0.01°

Tabelle 3.3: Aufnahmeparameter der Laserscanningdaten 2004 und 2010

3.2.1.1 Testgebiete

Die Analyse erfolgt zunächst im Überblick für einen nordwestlichen Küstenbereich. Dieser ist in Abbildung 3.13 in zwei Streifen blau dargestellt. Zur genaueren Untersuchung wird außerdem ein Ausschnitt des westlichen Ausläufers der Insel Juist sowie des umliegenden Strandbereichs betrachtet (grün), da in diesem Bereich großflächige Sandbänke und Strandläufe sowie auch Prielstrukturen vorhanden sind, welche für die Untersuchung auf zeitliche Variationen interessant sind. Abbildung 3.14 zeigt das ausgewählte Testgebiet im Westen der Insel beispielhaft für den Datensatz 2004. Die Tabelle 3.4 zeigt die Kenngrößen des Ausschnittes.

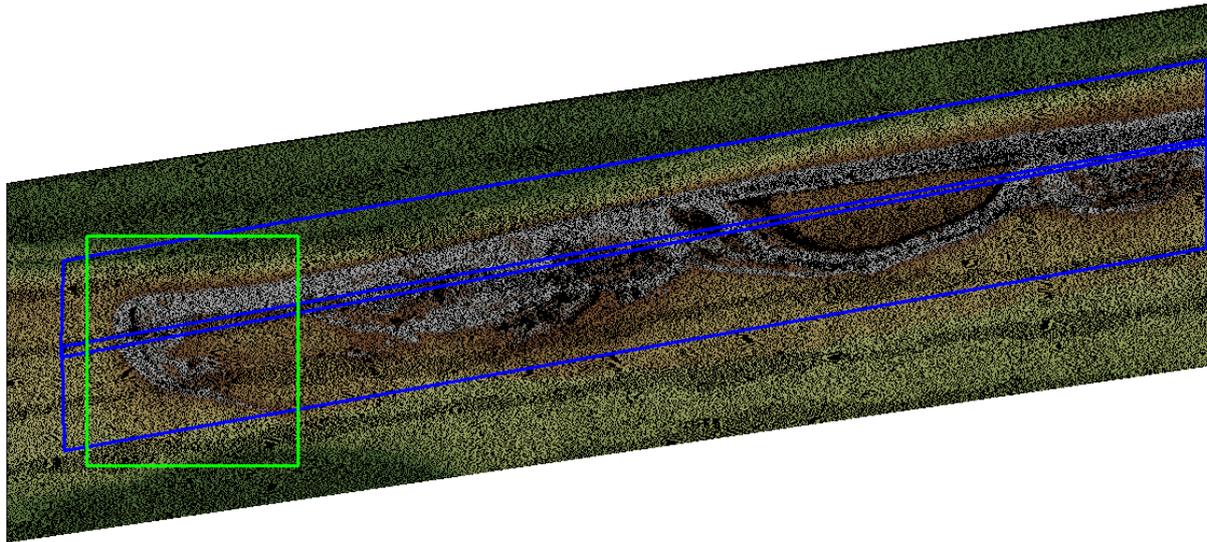


Abbildung 3.13: Übersicht - ausgewähltes Testgebiete

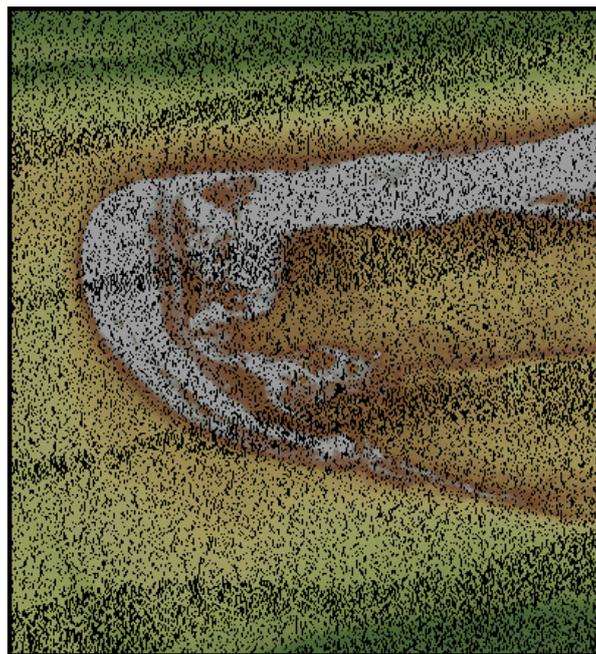


Abbildung 3.14: Datensatz 2004 für das westliche Testgebiet

	2004	2010
Ausdehnung Nord-Süd [km]	1.1	
Ausdehnung Ost-West [km]	1.2	
Fläche [km ²]	1.2	
Punktdichte [Pkte/m ²]	1.9	4.0

Tabelle 3.4: Kenngrößen des westlichen Testgebietes

3.2.2 Verarbeitung der Laserscanningdaten

3.2.2.1 DGM-Generierung

Die vergleichende Analyse soll für beide Testgebiete auf Grundlage ihrer digitalen Geländemodelle durchgeführt werden. Die Berechnung erfolgt mit der Software *SCOP++* analog zu dem beschriebenen Ablauf in Kapitel 3.1.2.2. Die resultierende Rastergröße beträgt erneut 1m. Die Geländemodelle für das westliche Testgebiet zu beiden Zeitpunkten sind beispielhaft in Abbildung 3.15 und in Abbildung 3.16 dargestellt.

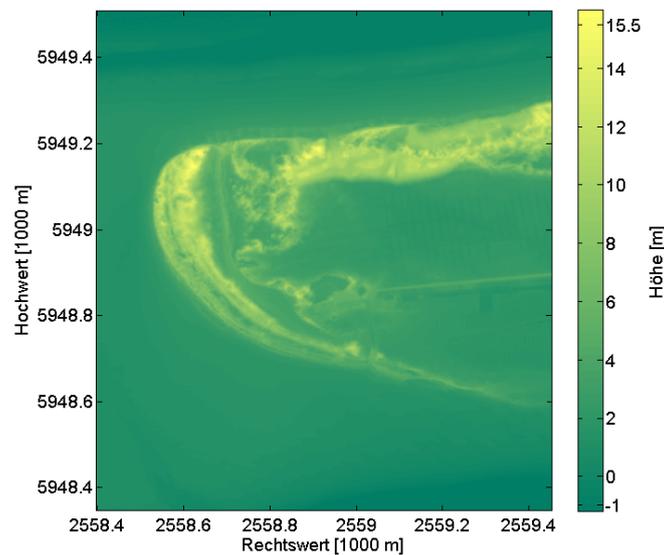


Abbildung 3.15: Digitales Geländemodell aus dem Laserscanningdatensatz 2004

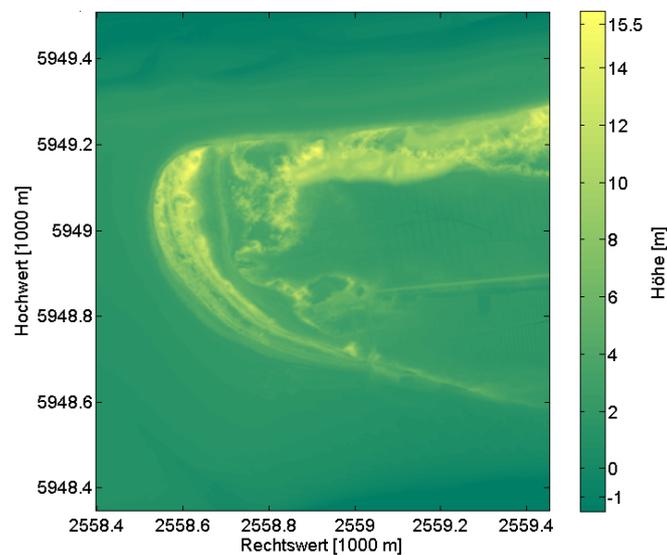


Abbildung 3.16: Digitales Geländemodell aus dem Laserscanningdatensatz 2010

Analog zu Kapitel 3.1.2.2 wird die Höhengenaugigkeit der digitalen Geländemodelle aus der Punktdichte sowie der Höhengenaugigkeit der Ausgangsdatensätze abgeleitet. Bei der Annahme einer Höhengenaugigkeit eines Einzelpunktes der verwendeten Datensätze von $s_{z,LS} = 15 - 30\text{cm}$ ergibt sich mit Hilfe der Formel 3.1 für das Geländemodell 2004 eine Höhengenaugigkeit von 0.10 bis 0.21 m, für das Geländemodell 2010 eine Höhengenaugigkeit von 0.07 bis 0.15 m.

4 Analyse

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Untersuchungen zur Auswertung von Wattstrukturen aus Laserscannerdaten und zu dem Monitoring über verschiedene Zeitabstände vorgestellt und ausgewertet. Sofern die Laserscanningdaten flächenhaft analysiert werden, erfolgt dies auf Grundlage des ermittelten Geländemodells.

Für die vergleichende Analyse werden Differenzen zwischen den Datensätzen gebildet. Hierfür werden die Höhen identischer Punkte voneinander subtrahiert.

4.1 Untersuchung von Strukturlinien

Die im Folgenden beschriebenen Analysen der Strukturlinien (SL) sind auf Grundlage der in Kapitel 3.1 beschriebenen Daten durchgeführt worden. Abbildung 4.1 zeigt die im Testgebiet extrahierten Strukturlinien. Die Höhen liegen dabei zwischen -2,59 m und -0,66 m. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Abstand zwischen Prielober- und Prielunterkante von West nach Ost abnimmt, der Prielarm also von West nach Ost ausläuft, wie auch die farbcodierte Höhenskalierung in Abbildung 3.2 zeigt. Dies bestätigt sich bei näherer Betrachtung der Höhendifferenzen von Prielober- und Unterkante. Aus Tabelle 4.1 lässt sich entnehmen, dass der maximale Höhen der Prielkanten auf der westlichen Seite (SL 1 und 2 sowie 5 und 6) jeweils größer ist als auf der östlichen Seite (SL 3 und 4 sowie 7 und 8). Insgesamt weisen die nördlichen Priel Ober- und Unterkanten (SL 1 und 2 sowie 3 und 4) einen geringeren Höhenunterschied auf als die Südlichen (SL 5 und 6 sowie 7 und 8).

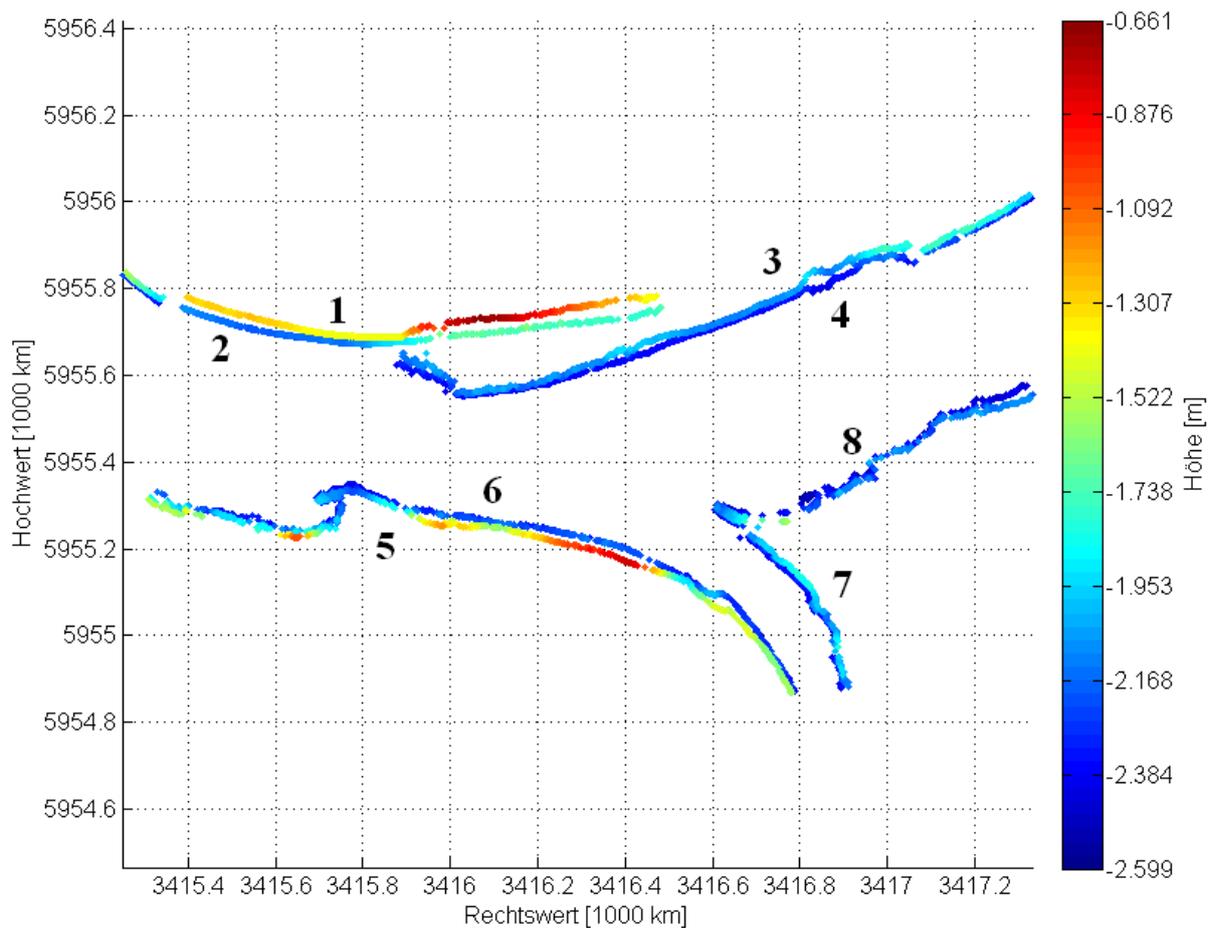


Abbildung 4.1: Extrahierte Strukturlinien (TG 1)

	1 und 2	3 und 4	5 und 6	7 und 8
Mittelwert [m]	0.73	0.31	0.66	0.31
Minimum [m]	0.32	0.11	0.01	0.14
Maximum [m]	1.07	0.59	1.47	0.90

Tabelle 4.1: Abstand zwischen den oberen und unteren Prielkanten

Die Abbildung 4.2 zeigt die Prielober- und Unterkante für einen Prielabschnitt beispielhaft (SL 1 und 2) im Profil. Es sind die Höhenunterschiede zwischen den Strukturlinien zu erkennen, die von West nach Ost abnehmen. Ebenfalls sind Einbrüche einzelner Höhenwerte innerhalb der Strukturlinien sichtbar.

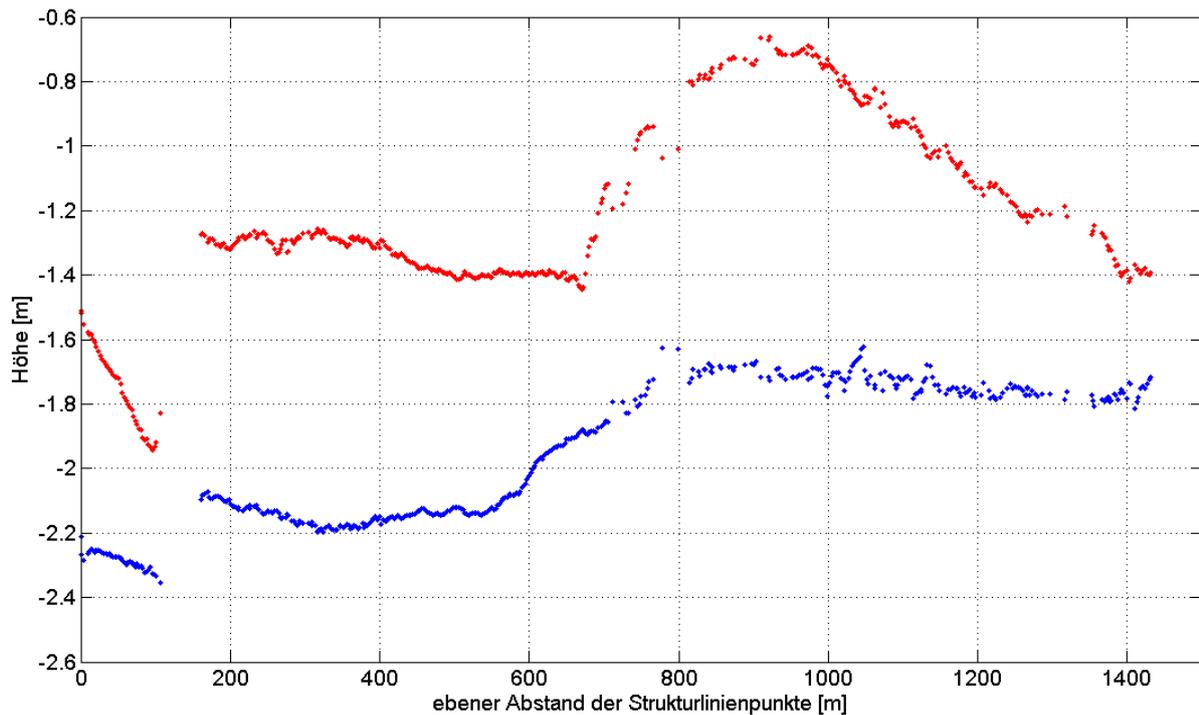


Abbildung 4.2: Profil der oberen und unteren Strukturlinie (Strukturlinien 1 und 2)

Die oben vorgestellten Strukturlinien sollen im Folgenden näher analysiert werden. Für einen ersten Vergleich wird ein Orthophoto, welches einen ähnlichen Aufnahmezeitpunkt aufweist, hinzugezogen. Weiter erfolgen ein Vergleich mit dem DGM, welches auf der gleichen Datengrundlage basiert, sowie eine Neuberechnung desgleichen unter Einbeziehung der zuvor ermittelten Strukturlinien. Abschließend erfolgt eine Überprüfung auf Übereinstimmung mit aus gradientenbasierten Verfahren ermittelten Kanten.

Zunächst werden die mit Hilfe des Verfahrens der Oberflächenrekonstruktion aus den Laserscanningdaten ermittelten Strukturlinien optisch mit einem Orthophoto, welches fünf Monate zuvor erfasst wurde, verglichen (Abbildung 4.3). Es ist eine Übereinstimmung der Strukturlinien mit den optisch erkennbaren Prielkanten innerhalb dieses kurzen Zeitabstandes zu erkennen. Die Höhen der extrahierten Strukturlinien sind farbcodiert von rot für die maximale Höhe über gelb und grün zu Blautönen dargestellt. An den südlichen Prielkanten sind im Orthophoto auslaufende Wellen quer zur Flussrichtung des Priels zu erkennen, welche auf einen sehr flachen Übergang zwischen Priel und Wattfläche schließen lassen (schwarzer Pfeil in Abbildung 4.3). Es ist also keine ausreichend starke Kante vorhanden, was die in Kapitel 3.1.2.1 erläuterte Problematik bei der automatisierten Mittelachsenbestimmung mithilfe des in der Software *Exstruct* implementierten Kantenoperators erklärt.

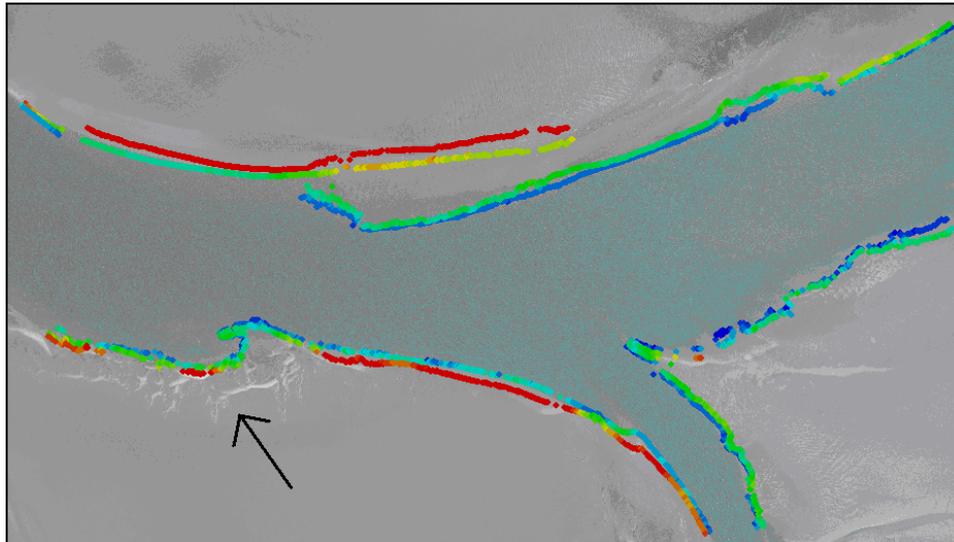


Abbildung 4.3: Extrahierte Strukturlinien im Vergleich zum Orthophoto

Die Strukturlinien werden direkt aus der unregelmäßigen Laserscanningpunktswolke ermittelt. Das DGM wird nur zur Bestimmung der Näherungswerte verwendet. Daher sollen sie im Folgenden zur Verbesserung des Geländemodells verwendet werden. Zunächst wird ein Vergleich der extrahierten Bruchkanten mit dem Geländemodell durchgeführt. Da die ermittelten Strukturlinien nicht immer auf einen Rasterwert fallen, werden die Höhenwerte des DGM mittels bilinearer Interpolation bestimmt. In Abbildung 4.4 sind die Höhendifferenzen zwischen den Strukturlinienpunkten und dem DGM des ersten Testgebietes dargestellt.

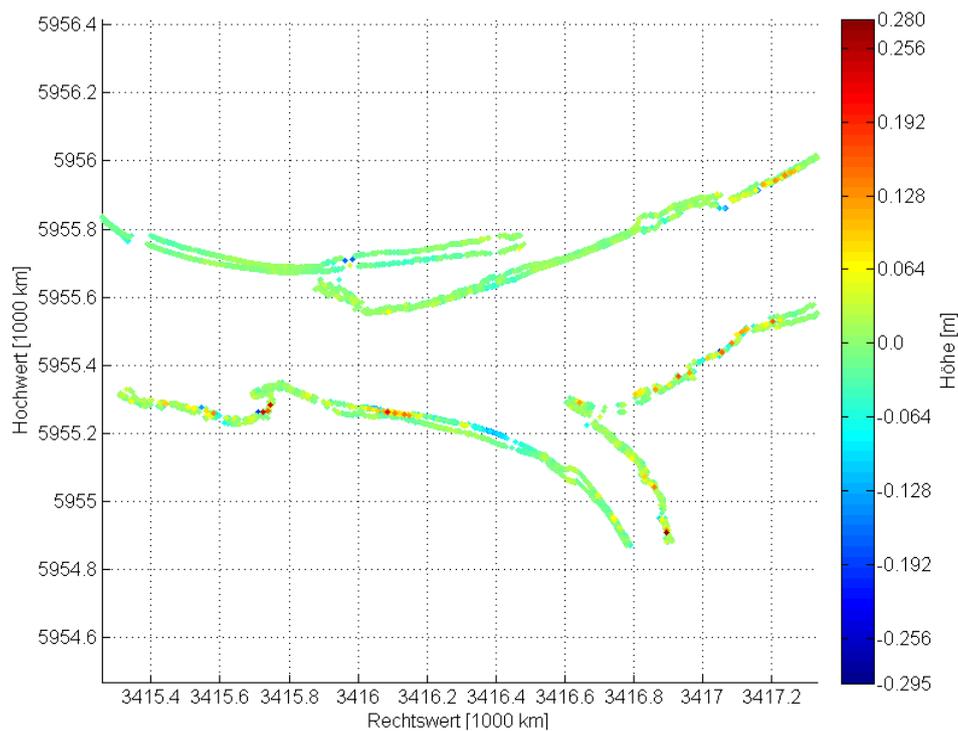


Abbildung 4.4: Differenzplot (TG 1): Digitales Geländemodell – Strukturlinien

Minimum dz	-0.29 m
Maximum dz	0.28 m
Mittelwert dz	0.01 m
RMS dz	0.03 m

Tabelle 4.2: Statistische Kenngrößen der Differenzen

Der Vergleich der Strukturlinien mit dem DGM zeigt, dass die Strukturlinien im Mittel um -0.01 m in der Höhe von dem DGM abweichen. Im Maximum nehmen die Höhenunterschiede einen Betrag von 0.29 m an. Der RMS der Höhenkomponente beträgt 0.03 m (Tabelle 4.2).

Werden die Strukturlinien nun bei der Berechnung des Geländemodells als Bruchkanten eingeführt, über die nicht hinweginterpoliert wird, können die Bereiche der Abweichungen verbessert werden. Daher wird das DGM noch einmal neu berechnet.

Die Strukturlinien sind mit Hilfe des Verfahrens der Flächenrekonstruktion bestimmt worden. Die Kantenoperatoren werden nur zur Bestimmung von Näherungswerten verwendet, welche noch manuell ergänzt wurden. Daher soll nun weiterhin ein Vergleich mit einem Gradientenbild erfolgen. Dieses wird durch die flächenhafte Berechnung des Gradientenbetrages ermittelt. Mit einem manuell festgelegten Schwellwert werden die Maximalwerte selektiert und somit Bereiche großer Gradientenbeträge als mögliche Kantenpositionen dargestellt (Abbildung 4.5).

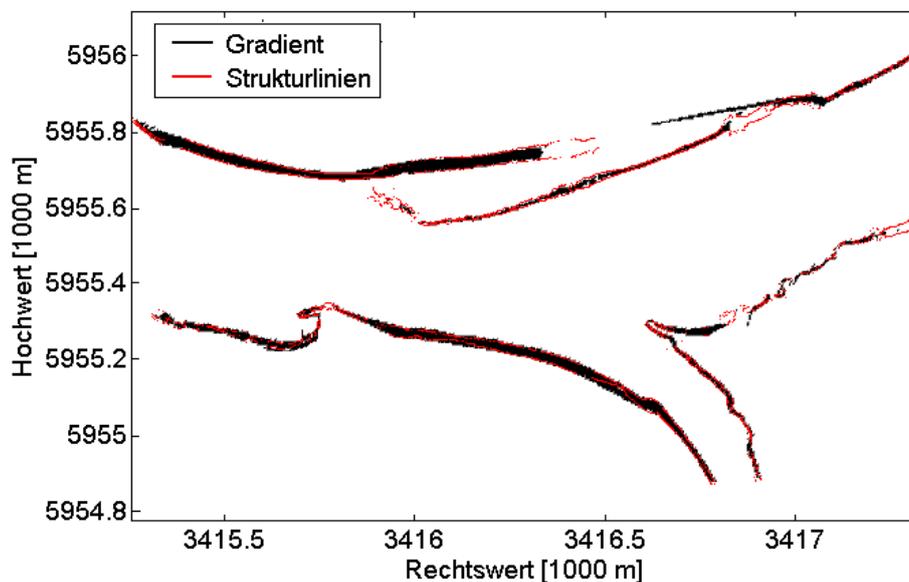


Abbildung 4.5: Vergleich der Strukturlinien mit dem Kantenbild des DGM aus Testgebiet 1

Es lassen sich gute Übereinstimmungen zwischen den Strukturlinien und den Bereichen großer Gradientenwerte erkennen. Die Strukturlinienextraktion auf Grundlage der Flächenrekonstruktion liefert also vergleichbare Ergebnisse wie die gradientenbasierte Strukturlinienextraktion und stellt damit ein geeignetes Tool zur Strukturlinienbestimmung im Wattenmeer und zur Verbesserung der Genauigkeit von Geländemodellen dar.

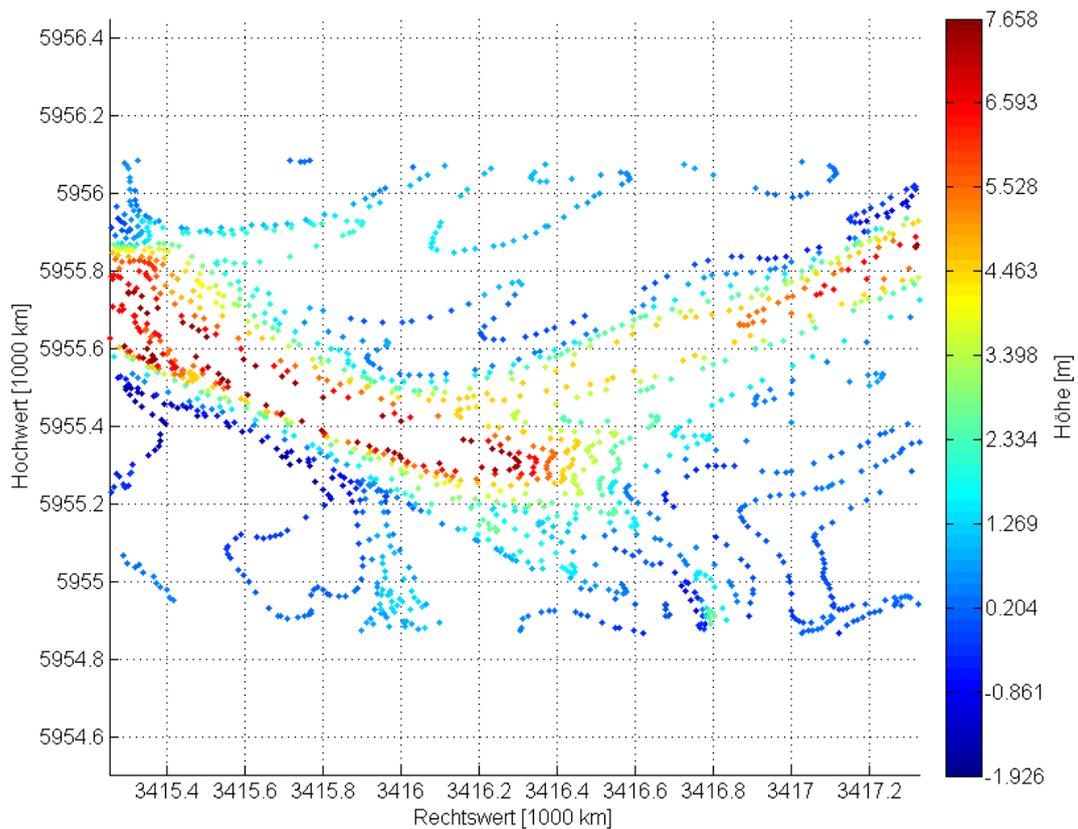
4.1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Mit der Software *Exstruct* steht ein geeignetes Tool zur Bestimmung und Extraktion markanter Objektkanten zur Verfügung. Die kantenbasierte Näherungswertbestimmung bedarf bei Geländestrukturen geringer Höhenunterschiede manueller Nachbearbeitungen. Sind die Mittelachsen für die Näherungslösungen erfasst, ist eine zuverlässige Extraktion dieser Strukturlinien möglich.

Die im Vergleich mit einem Geländemodell, welches auf Grundlage desselben Laserscanningdatensatzes berechnet wurde, auftretenden Abweichungen von bis zu 0.3 m weisen auf Interpolationsungenauigkeiten des DGM hin. Werden die Strukturlinien bei einer erneuten DGM-Modellierung berücksichtigt, sodass nicht über die Bruchkanten hinweg interpoliert wird, erfolgt in diesen Bereichen des Geländemodells eine Verbesserung.

4.2 Analyse von Wattstrukturen nach 30 Jahren

Der Epochenvergleich hat in erster Linie zum Ziel, langfristige Variationen der Prielverläufe und Strukturen im Verlauf der Zeit festzustellen. Weiterhin werden die Wattflächen auf Sedimentzu- und Abnahme untersucht. Die Analysen erfolgen wie in Kapitel 3.1.1.3 beschrieben in drei Testgebieten. Zur weiteren Untersuchung werden Differenzen aus dem DGM der aktuellen Laserscanningdaten und der terrestrischen Daten der 80er Jahre berechnet. Auch hier fallen die Punkte des terrestrischen Datensatzes nicht immer auf die Rasterwerte des Geländemodells, sodass die Höhenwerte des DGM ebenfalls mittels bilinearer Interpolation bestimmt werden müssen. Beispielhaft sind in Abbildung 4.6 die Differenzen für das erste Testgebiet dargestellt.



**Abbildung 4.6: TG 1 - Differenzplot
Digitales Geländemodell - terrestrischer Datensatz**

Es fallen extreme Abweichungen im Bereich der Prielverläufe auf. Dies ist auf die in den terrestrischen Daten enthaltenen Echolotdaten zurückzuführen, da bei der Echolotmessung auch bei wassergefüllten Prielen der Grund der Prielverläufe aufgemessen wird. Beim Laserscanning mit Wellenlängen im nahen Infrarot kann der Laserstrahl nicht in die Wassersäule eindringen, sodass nur die Wasseroberfläche erfasst wird. Die beiden Datensätze unterscheiden sich im Bereich der Wasserflächen um die Wasserstandshöhe, was in den nachfolgenden Analysen berücksichtigt werden muss.

Die Differenzen der Datensätze werden daher zunächst um den Einfluss der Echolotdaten reduziert. Hierfür wird für den terrestrischen Datensatz als minimaler Höhenwert das Minimum des DGM angenommen. Dies entspricht lediglich einer Näherung an die tatsächliche Reduktion der Echolotmessungen, da Informationen über die Pegelstände während der Datenaufnahme beider Datensätze fehlen. Weiterhin werden Echolotdaten in der Regel bezogen auf Seekartennull, also der regionalen Springtide bei Niedrigwasser [Flyer BSH, 2009], aufgenommen. Es ist anzunehmen, dass beim Zusammenfügen der Datensätze die Echolotdaten in das Höhensystem der terrestrisch erfassten Daten überführt wurden, Informationen hierüber liegen jedoch nicht vor. Die Höhenzu- und Abnahmen entlang der Wasserflächen sind daher vorsichtig zu interpretieren. Im Bereich der Wattflächen ist eine

Vergleichbarkeit der terrestrischen sowie der Laserscanningdaten jedoch gegeben, sie beziehen sich auf dasselbe Höhendatum (Höhe über Normal Null).

Weiterhin werden für die Analyse Orthophotos der Testgebiete aus dem Jahr 2010 hinzugezogen. Zudem wird der Verlauf der Prielkanten zum Aufnahmezeitpunkt der terrestrischen Daten näherungsweise mit Hilfe von partiellen Gradientenbildern abgeleitet. Im Folgenden werden die durchgeführten Untersuchungen für die einzelnen Testgebiete nacheinander vorgestellt.

4.2.1 Testgebiet 1

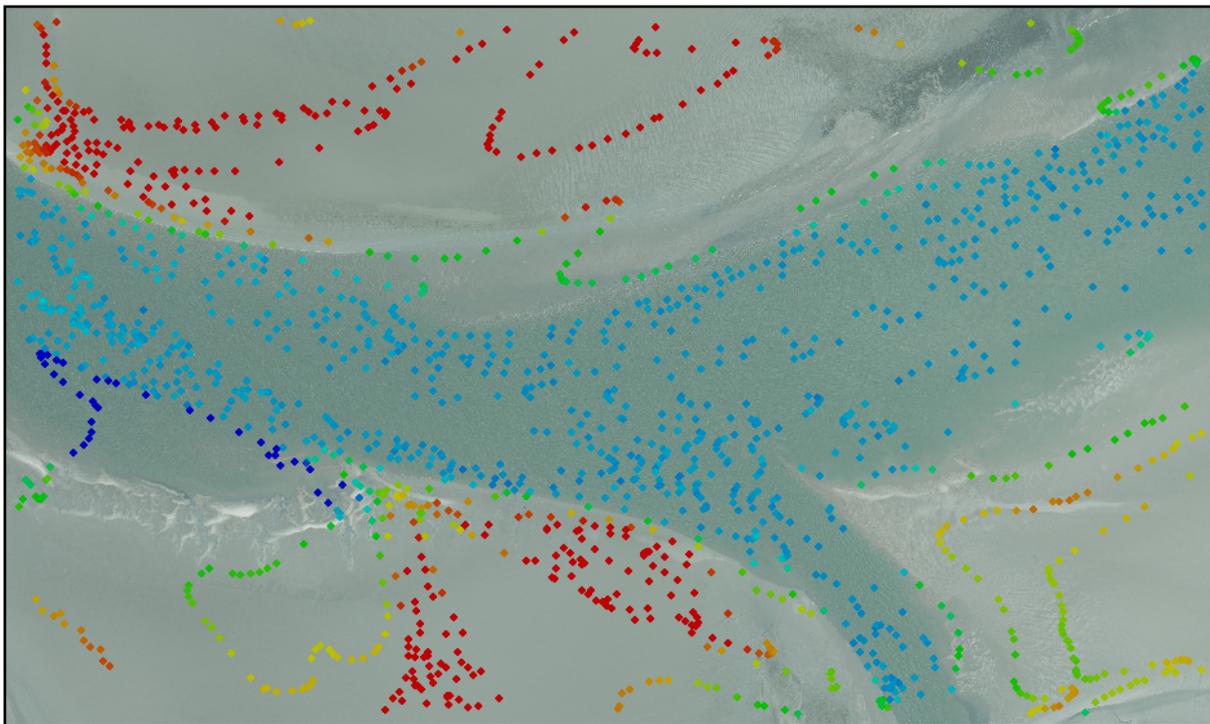


Abbildung 4.7: Differenzen im Vergleich zum Orthophoto der Epoche der Laserscanningdaten (Testgebiet 1)

Abbildung 4.7 zeigt die Differenzen der Datensätze in Zusammenhang mit dem Orthophoto der Aufnahmeepoche der Laserscanningdaten für das erste Testgebiet. Dies wurde wie oben beschrieben um die Echolotdaten "bereinigt", indem alle Punkte mit Höhen unterhalb des minimalen Wertes der Laserscannerpunktswolke (welcher als Wasserhöhe angenommen werden kann) auf diesen Wert gesetzt werden. Aus diesem Grund treten in den wasserbedeckten Prielbereichen (türkis) keine Höhendifferenzen auf. Flächen mit Volumenzunahmen sind je nach der Stärke der Zunahme von grün über gelb, orange bis rot codiert. Die Bereiche der

Volumenabnahme sind in dunkler werdenden Blautönen dargestellt. In Abbildung 4.8 sind die Differenzen noch einmal zusammen mit einer Skala der Farbcodierung für die Höhendifferenzen dargestellt.

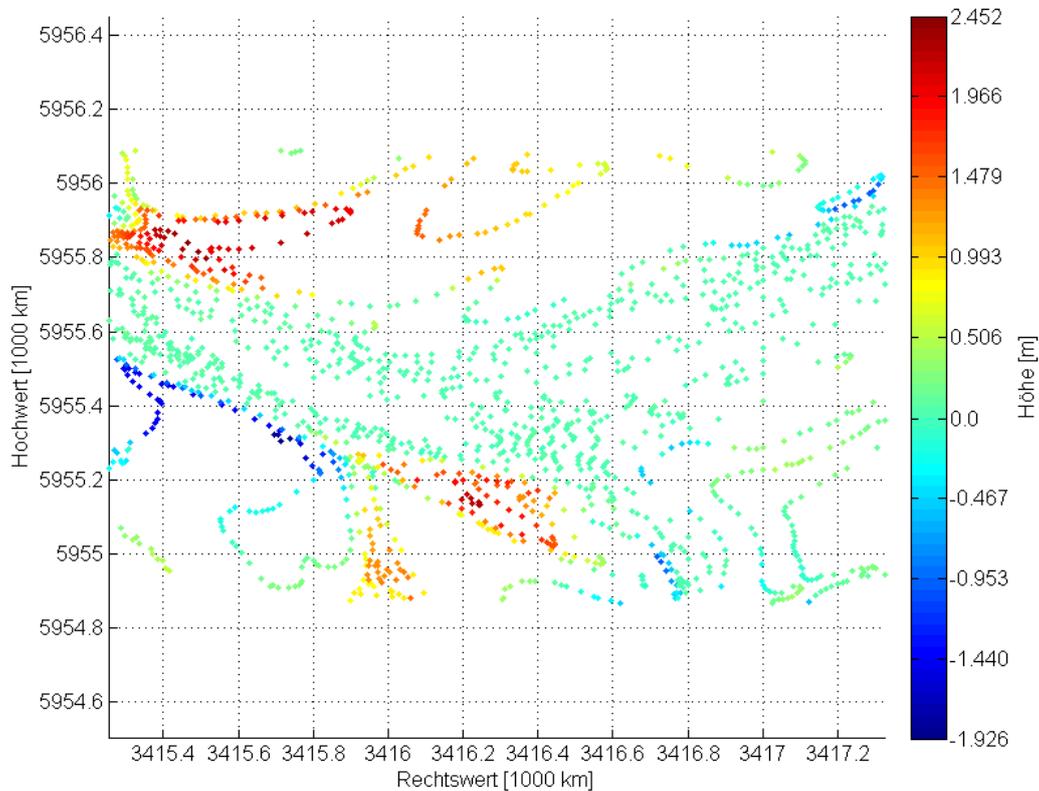


Abbildung 4.8: Differenzen (Testgebiet 1)

Insgesamt ist eine maximale Höhenzunahme von 2.45 m zu verzeichnen. Die maximale Höhenabnahme beträgt -1.93 m, die mittlere Änderung 0.34 m. Insgesamt ist also ein Anstieg der Höhe festzustellen, bei einem RMS von 0.67 m (Tabelle 4.3).

Minimum dz	-1.93 m
Maximum dz	2.45 m
Mittelwert dz	0.34 m
RMS dz	0.67 m

Tabelle 4.3: Statistische Kenngrößen der Differenzen (TG 1)

Im westlichen Teil des Priels an der nördlichen Prielkante über einen Bereich von ca. 150 m ist eine Zunahme von bis zu 2.45 m zu erkennen, während sich die Höhe an der Südkante über etwa 200 m hinweg um bis zu -1.93 m verringert hat. Es ist anzunehmen, dass sich der

Prielverlauf in diesem Bereich nach Süden verlagert hat. Im mittleren Bereich des südlichen Prielufers sind Sedimentzunahmen bis zu 2.3 m zu erkennen. Hier ist der Priel vermutlich um bis zu etwa 150 m schmaler geworden. Südwestlich davon ist ebenfalls eine Zunahme der Höhe zu erkennen. Die Form dieses Areals lässt darauf schließen, dass sich dort zum Aufnahmezeitpunkt der terrestrischen Daten ein kleiner Seitenarm von ca. 400 m Länge und maximal 200 m Breite befunden hat, welcher inzwischen versandet ist. Die Höhendifferenz beträgt dort bis zu 1.40 m.

Entlang der Wattfläche nördlich des Priels ist ebenfalls eine Höhenzunahme zu verzeichnen. Die Größenordnung variiert hier zwischen 0.67 m und 2.15 m. Bei Betrachtung des höher aufgelöst skalierten, um die Echolotdaten ‚bereinigten‘ Differenzplots (Abbildung 4.8) lassen sich weiterhin noch Sedimentabtragungen im östlichen Bereich des nördlichen Prielufers sowie am westlichen Prielufers des abknickenden Prielarms von bis zu -0.96 m erkennen. Diese Variationen von ca. 30 m Breite weisen erneut auf eine Verbreiterung des Prielverlaufs hin.

Zur Beurteilung der möglichen Verschiebung des Prielverlaufs innerhalb der 30 Jahre zwischen den beiden Datenbeständen werden zudem die aus dem Laserscanningdatensatz extrahierten Strukturlinien hinzugezogen. Außerdem wird aus dem terrestrischen Datensatz ein Gradientenbild extrahiert. In Abbildung 4.9 ist der Verlauf der Prielkanten aus dem Gradientenbild der terrestrischen Daten vor allem im westlichen Bereich gut zu erkennen, sodass unter vergleichender Hinzunahme der Strukturlinien die oben vermutete Verschiebung des Prielverlaufs im westlichen Bereich des Ausschnittes bestätigt wird. Die nördliche Kante des terrestrischen Datensatzes stimmt im östlichen Bereich weitestgehend mit den Strukturlinien überein. Auch im Bereich des abknickenden Prielarmes sind keine Veränderung des Verlaufs erkennbar. Für den mittleren Bereich des südlichen Prielufers, für welchen im Differenzplot Sedimentzunahmen sichtbar sind, ist im Gradientenbild des terrestrischen Datensatzes eine Kante weiter südlich zu erkennen, als es dem Verlauf der aktuellen Strukturlinien entspricht. Dies bestätigt, dass der Priel in diesem Bereich zum Zeitpunkt der Aufnahme des terrestrischen Datensatzes breiter war als zur Epoche des Laserscanningdatensatzes. Auch lässt sich der kleine, inzwischen vermutlich versandete Prielarm schemenhaft erkennen. Aufgrund der geringen Punktdichte in diesem Bereich lässt sich die Vermutung jedoch nicht eindeutig verifizieren.

Die schmalen Bereiche der Höhenabnahmen im Nord- und Südosten können im Kantenbild aufgrund der schlechten Auflösung durch die geringe Punktdichte nicht genau lokalisiert

werden. Die Vermutung der Prielverbreiterung kann daher ebenfalls nicht eindeutig nachgewiesen werden. Die Aussagekraft der Gradienten des terrestrischen Datensatzes ist aufgrund der geringen Punktdichte insgesamt vorsichtig zu betrachten.

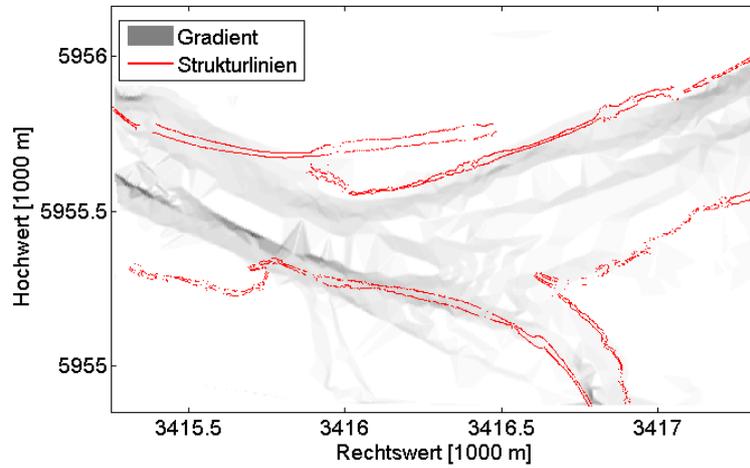


Abbildung 4.9: Vergleich der Strukturlinien mit dem Gradientenbild des terrestrischen Datensatzes (Testgebiet 1)

4.2.2 Testgebiet 2

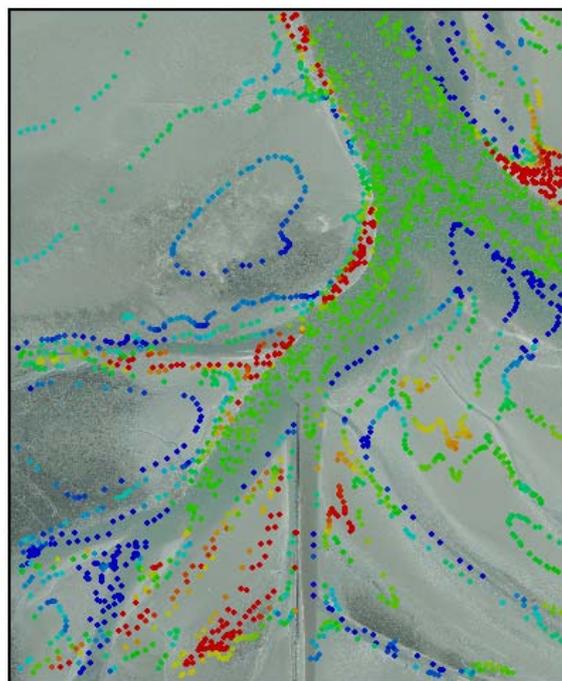


Abbildung 4.10: Differenzen im Vergleich zum Orthophoto der Epoche der Laserscanningdaten (Testgebiet 2)

Abbildung 4.10 zeigt die Differenzen der Datensätze kombiniert mit dem entsprechenden Orthophoto der Aufnahmeepoche der Laserscanningdaten für das zweite Testgebiet. Auch dieses wurde vom Einfluss der Echolotdaten bereinigt. Der grüne Farbton, welcher vor allem über den Wasserflächen auftritt, beschreibt die Flächen ohne Höhenänderung. Die immer dunkler werdenden Blautöne sind auch hier als Volumenabnahme zu verstehen, während die von gelb in rot übergehenden Farben eine Volumenzunahme signalisieren. In Abbildung 4.11 sind die Differenzen noch einmal zusammen mit einer Skala der Farbcodierung für die Höhendifferenzen dargestellt.

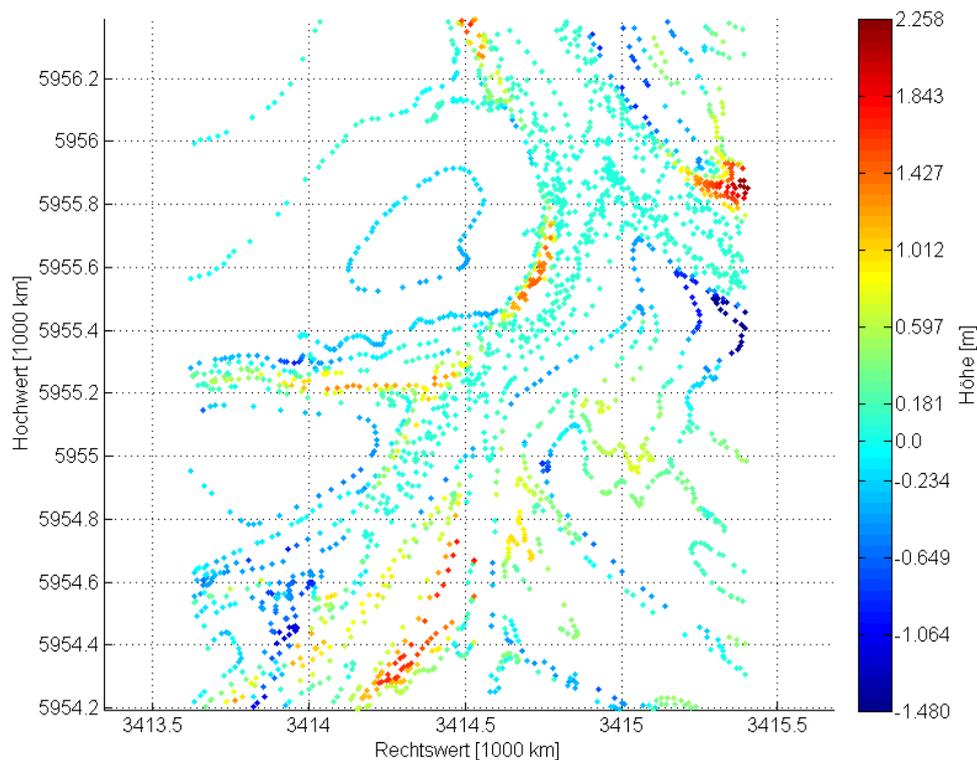


Abbildung 4.11: Differenzen (Testgebiet 2)

Insgesamt ist eine maximale Höhenzunahme von 2.26 m zu verzeichnen. Die maximale Höhenabnahme beträgt -1.48 m, die mittlere Änderung beträgt 0.19 m. Insgesamt ist also ein Anstieg der Höhe festzustellen, bei einem RMS von 0.53 m (Tabelle 4.4).

Minimum dz	-1.48 m
Maximum dz	2.26 m
Mittelwert dz	0.19 m
RMS dz	0.53 m

Tabelle 4.4: Statistische Kenngrößen der Differenzen (TG 2)

Im Norden des Ausschnittes ist an der westlichen Prielseite eine Zunahme der Höhe von bis zu 1.70 m im Verlauf des Untersuchungszeitraums zu erkennen, während an der östlichen Prielkante eine Höhenabnahme von bis zu -0.90 m stattgefunden hat. Es lässt sich also an dieser Stelle eine leichte Verschiebung des Priels nach Osten vermuten. Da die Höhenabnahme an der östlichen Seite mit einem Durchmesser (quer zum Prielverlauf) von ca. 170 m eine deutlich größere Fläche einnimmt, als die Zunahme an der westlichen Seite mit einem Durchmesser von etwa 75 m, ist außerdem von einer Verbreiterung des Prielabschnitts in östliche Richtung auszugehen. Auf der nördlichen Seite des rechten Prielarmes ist über einen Bereich von 160 m eine Höhenzunahme von bis zu 2.26 m zu erkennen, während auf der Südseite desselben Priels über 210 m Breite eine Abnahme der Höhe bis zu -1.48 m zu erkennen ist. Es ist anzunehmen, dass auch hier eine Verlagerung des Prielverlaufs nach Süden stattgefunden hat. Entlang der westlichen Seite des linken Prielarmes ist eine Höhenzunahme von maximal 1.49 m erkennbar. Offenbar ist der Prielarm in diesen Bereichen über die Beobachtungszeit um etwa 55 m schmaler geworden. Die Höhenabnahme entlang der östlichen Seite lässt auf eine Ausdehnung des Prielabschnitts schließen. Jedoch beträgt die Höhendifferenz hier nur bis zu -0.43 m. Die Verbreiterung scheint hier also oberflächennah stattgefunden zu haben, der Priel verfügt in diesem Randbereich nur über eine geringe Tiefe.

Der von dem linken Prielarm in westliche Richtung abzweigende kleine Seitenarm lässt eine Verschiebung von etwa 40 m nach Norden vermuten: Entlang der südlichen Prielkante ist eine Höhenzunahme bis zu 1.36 m zu verzeichnen, während entlang der nördlichen Kante eine Abnahme bis -0.89 m stattgefunden hat. Im Bereich der südwestlichen Ausläufer des linken Prielarmes ist eine Höhenabnahme zu erkennen. Diese beträgt bis zu -1.19 m. Möglicherweise ist der Priel in der Beobachtungszeitspanne ‚gewachsen‘, sodass sich die auf dem Orthophoto erkennbaren südlichen Prielstrukturen über eine Länge von ca. 600 m erst nach dem Aufnahmezeitpunkt des terrestrischen Datensatzes gebildet haben.

Zwischen den eben beschriebenen Bereichen der Volumenabnahme und der im Orthophoto zu erkennenden Buhne, welche im verwendeten Ausschnitt relativ zentral von Süden aus in den Priel hineinragt, ist eine Wattfläche mit einer Höhezunahme bis zu 1.76 m zu erkennen, wie auch der höher aufgelöst skalierte, Echolot ‚bereinigte‘ Differenzplot (Abbildung 4.11) zeigt. Hier kann die Buhne selbst als Ursache für die Sedimentauflagerung vermutet werden, die einen Weitertransport des aufgespülten Materials nach Osten verhindert.

Für die kleinen Seitenpriele im Südosten sind entlang der südlichen Kanten Höhenabnahmen bis -0.69 m zu verzeichnen, welche auch hier auf eine Verbreiterung der Prielläufe um etwa 35 m bzw. 65 m schließen lassen. Die freie Wattfläche im Nordwesten variiert von einer maximalen Zunahme von 17 cm bis zu einer Abnahme von -40 cm in Richtung des Priels. Es lässt sich also ein Sedimenttransport in Richtung Nordwesten für diesen Bereich vermuten. Sedimentzunahmen südöstlich des linken Prielarmes führen zu einer Höhenvariation von bis zu 0.69 m.

Da für das zweite Testgebiet keine Strukturlinien vorliegen, welche analog zur Analyse des ersten Testgebiets zum Vergleich herangezogen werden können, soll das Gradientenbild der terrestrisch erfassten Daten mit dem Orthophoto sowie mit den Differenzen der Datensätze vergleichend gegenübergestellt werden (Abbildung 4.12). Ein visueller Vergleich von zwei flächenhaften Datensätzen ist jedoch nur schwer möglich und die geringe Punktdichte im Datensatz der 80er Jahre lassen eine Kantenextraktion aus den Gradienten nicht zu. Daher werden die Bereiche hoher Gradientenbeträge mit Hilfe eines manuell festgelegten Schwellwertes aus dem Gradientenbild extrahiert. Analog zur Definition der Kante als Linie maximaler Höhenänderung sind die in Abbildung 4.12 schwarz dargestellten Flächen Bereiche großer Änderungen und damit eine grobe Näherung an die Kante, welche mit Vorsicht für die Interpretation der auftretenden Variationen herangezogen werden sollten.

Die vorhergehenden Annahmen lassen sich unter Hinzunahme der Kantennäherungen weitestgehend bestätigen. Vor allem die Verbreiterung des nördlichen Prielabschnitts, aber auch der Prielarme ist deutlich erkennbar. Auch die Verschiebungen in diesen Bereichen werden bestätigt. Die kleineren Prielarme sowie die Buhne sind in den gradientenbasierten Kantennäherungen des terrestrischen Datensatzes aufgrund der geringen Punktdichte und der geringen Höhenunterschiede nicht vorhanden.

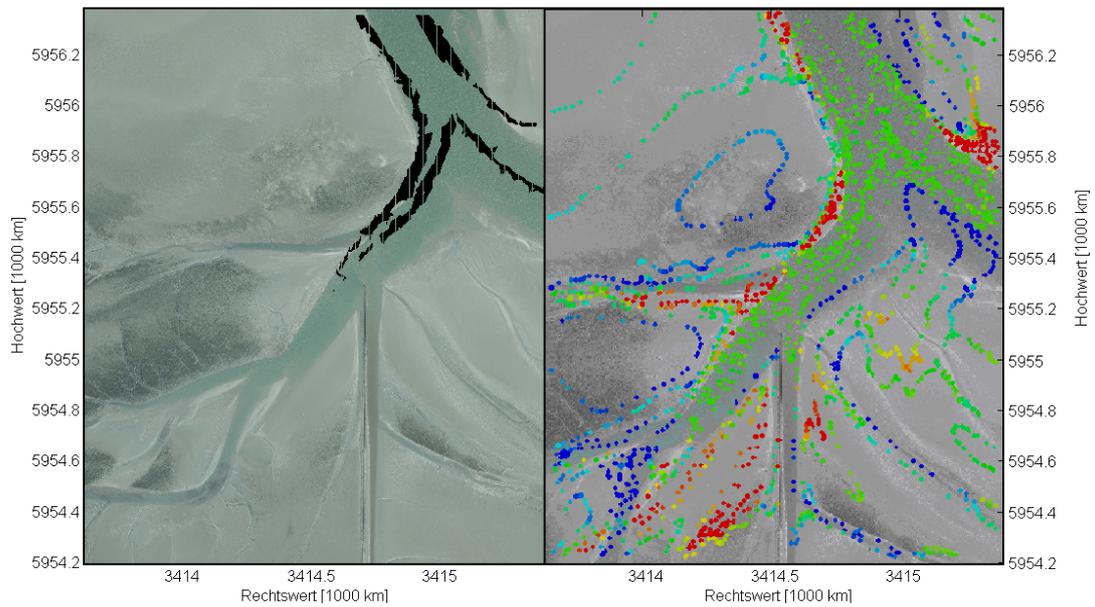


Abbildung 4.12: Vergleich von Kantennäherungen des terrestrischen Datensatzes mit dem Orthophoto sowie den Differenzen (Testgebiet 2)

4.2.3 Testgebiet 3

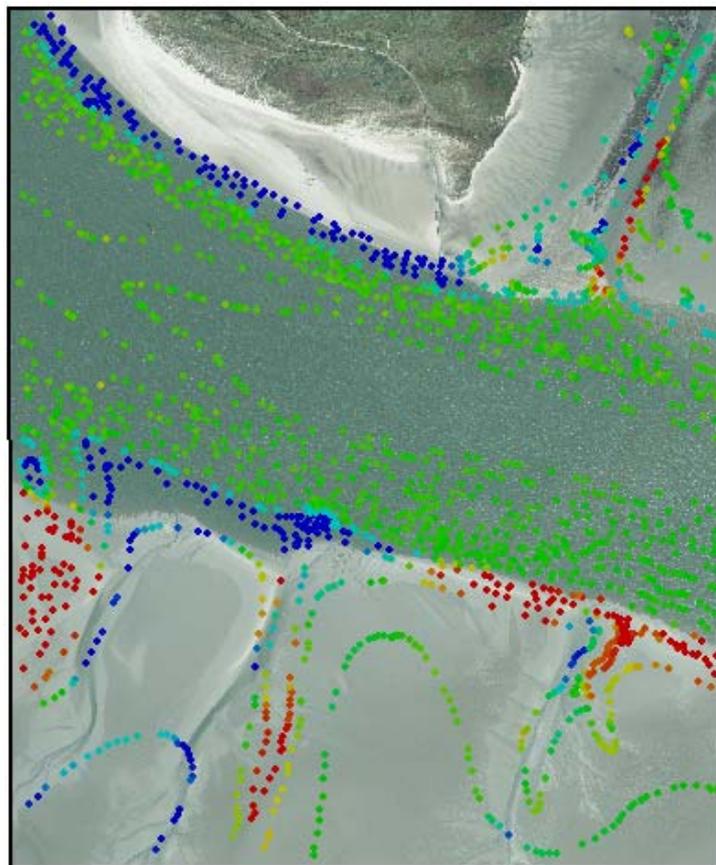


Abbildung 4.13: Differenzen im Vergleich zum Orthophoto der Epoche der Laserscanningdaten (Testgebiet 3)

Auch für das dritte Testgebiet werden die Differenzen der Datensätze zunächst in Kombination mit dem Orthophoto der Aufnahmeepoche des Laserscanningdatensatzes betrachtet (Abbildung 4.13), analog zu den vorhergehenden Testgebieten ebenfalls Echolot ‚bereinigt‘. Die Farbcodierung ist identisch mit der des zweiten Testgebietes. In Abbildung 4.14 sind die Differenzen noch einmal zusammen mit einer Skala der Farbcodierung für die Höhendifferenzen dargestellt.

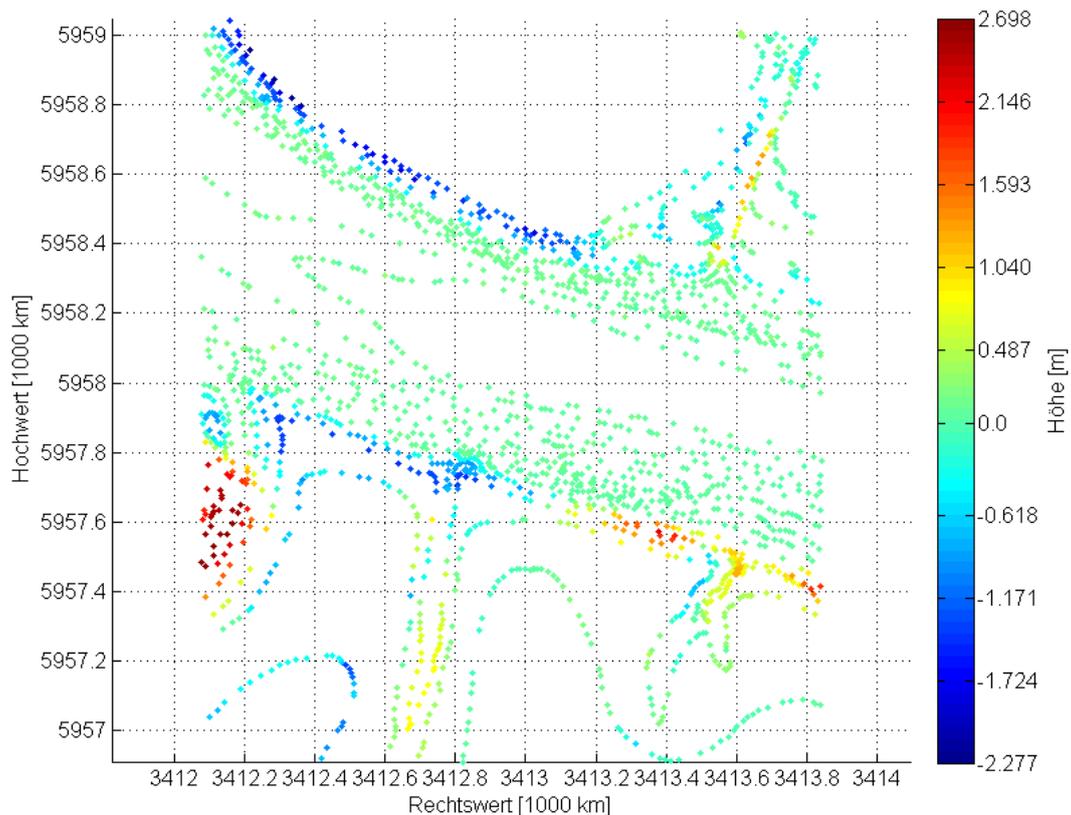


Abbildung 4.14: Differenzen (Testgebiet 3)

Insgesamt ist eine maximale Höhenzunahme von 2.70 m zu verzeichnen. Die maximale Höhenabnahme beträgt -2.28 m, die mittlere Änderung 0.05 m. Insgesamt ist auch hier ein Anstieg der Höhe festzustellen, bei einem RMS von 0.63 m (Tabelle 4.5).

Minimum dz	-2.28 m
Maximum dz	2.70 m
Mittelwert dz	0.05 m
RMS dz	0.63 m

Tabelle 4.5: Statistische Kenngrößen des Differenzen (TG 3)

Die Höhenabnahme im Beobachtungszeitraum an beiden Prielkanten des westlichen Ausschnittbereiches beträgt im Norden bis zu -2.28 m, im Süden bis -1.37 m. Diese Bereiche weisen eine Breite von 90 m im Norden und maximal 130 m im Süden auf und lassen auf eine beidseitige Verbreiterung des Prielabschnittes schließen.

Im östlichen Bereich hingegen ist aufgrund der Höhenzunahme von bis zu 2.26 m auf einer Breite von bis zu 110 m entlang der südlichen Kante sowie der geringfügigen Abnahme um bis zu -35 cm auf 35 m Breite im Bereich der nördlichen Kante eine leichte Verschiebung nach Norden sowie eine Verschmälerung im Süden zu vermuten. Dies wird auch bei Betrachten der höher aufgelöst skalierten, um den Einfluss der Echolotdaten ‚bereinigten‘ Differenzen (Abbildung 4.14) deutlich.

Der Bereich der Fahrrinne zur Insel Spiekeroog im Norden des Hauptpriels weist im südlichen Teil eine leichte Westverschiebung um ca. 35 m auf: An der westlichen Seite kommt es zu einer Verringerung der Höhe um bis zu -1.23 m, während an der östlichen Seite eine Zunahme bis 1.39 m festgestellt werden kann. Die geringen Höhenänderungen machen deutlich, dass es sich hier nur um Variationen in Ufernähe handelt, die Fahrrinne selbst bleibt unverändert.

Im Süden des Hauptpriels fällt auf, dass die wenigen vorhandenen Höhendifferenzen, welche aus der geringen, heterogenen Punktdichte des terrestrisch erfassten Datensatzes resultieren, zwar in der Nähe der im Orthophoto zu erkennenden kleinen Nebenpriele liegen, diese aber nicht vollständig überdecken. Da bei der terrestrischen Datenaufnahme lediglich markante Strukturen erfasst wurden, ist davon auszugehen, dass die südlichen Seitenpriele zur Aufnahmeepoche des terrestrischen Datensatzes entlang der vorhandenen Koordinaten verliefen. Demnach hätte für alle drei Nebenpriele eine teilweise deutliche Verschiebung stattgefunden. Die partiell vorhandenen Informationen der Differenzen untermauern diese Vermutung: Es treten Änderungen in einer Größenordnung auf, die sich nicht allein durch Sedimenttransport im Bereich von Wattflächen erklären lassen. Im Bereich der Prielverläufe zum Aufnahmezeitpunkt der Laserscanningdaten ist für alle drei Nebenpriele eine Verringerung der Höhen bis -1.37 m zu erkennen. Im Bereich der zum aktuellen Zeitpunkt zwischen den Prieln liegenden Wattflächen hingegen ist es im Vergleich zum ersten Beobachtungszeitpunkt zu Erhöhungen von bis zu 2.70 m für den westlichsten Prielarm und bis zu 1.14 m für die weiteren Prielausläufer gekommen.

Analog zum zweiten Testgebiet (4.2.2) können hier zum Vergleich von Gradienten des terrestrischen Datensatzes mit aktuellen Daten Bereiche großer Gradienten und damit starker Höhenänderungen durch einen manuell festgelegten Schwellwert bestimmt werden. Diese werden in Abbildung 4.15 das Luftbild überlagernd schwarz dargestellt. Aufgrund der geringen Punktdichte sind sie auch hier nur begrenzt aussagekräftig und als mögliche Bereiche für die Kanten zu interpretieren. Diese Bereiche möglicher Kanten passen jedoch zu den Ergebnissen der Auswertung der Differenzen, wie der Prielverbreiterung im Westen des Ausschnittes. Auch für den Bereich im Südwesten lässt sich der Verlauf von Prielkanten erkennen, welche sich im Bereich der Höhenzunahme befinden. Dies würde eine Verschiebung des westlichsten der südlichen Nebenpriele bestätigen. Die minimale Verschiebung der Uferkanten der Fahrrinne ist den Näherungswerten der Kanten aus den terrestrischen Daten nicht zu entnehmen.

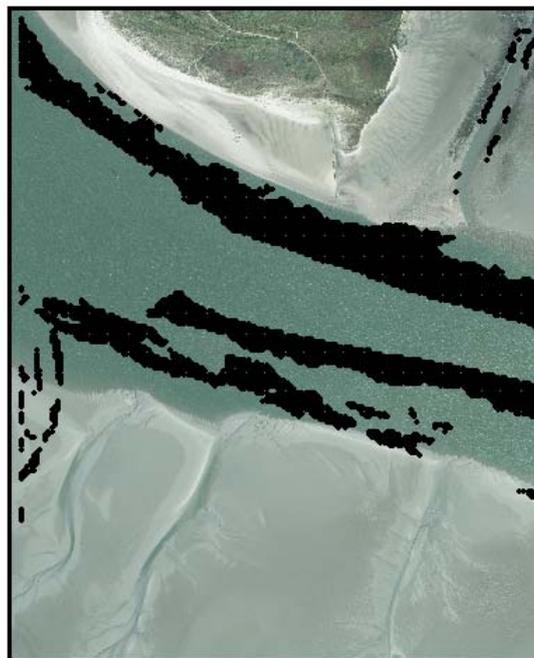


Abbildung 4.15: Vergleich von Kantennäherungen des terrestrischen Datensatzes mit dem Orthophoto (Testgebiet 3)

4.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Insgesamt konnten für alle drei Testgebiete die langfristigen morphologischen Veränderungen der Prielverläufe zuverlässig detektiert werden, auch wenn die Analyse durch die nur punktweise vorliegenden Informationen aus der 80er Jahren eingeschränkt ist. Es handelt sich

hierbei hauptsächlich um Verschiebungen der Ränder der Hauptarme des Prielsystems. Lediglich bei kleinen Ausläufern kommt es zu vollständigen Verschiebungen. Lokale Variationen treten hierbei über eine Fläche mit Durchmessern von bis zu 200 m auf und verursachen Höhenänderungen in einer Spanne von bis zu fünf Metern (-2.28 m bis 2.70m). Die Summe der Veränderungen ist mit einem Mittelwert von 0.16 m positiv, es überwiegen die Bereiche der Höhenzunahme, also die Sedimentzunahme. Vor allem im Bereich der Wattflächen sind die Beträge der Höhenzunahme größer als die der Abnahme.

4.3 Analyse von Küstengebieten und Wattstrukturen nach 6 Jahren

Auch dieser Epochenvergleich wird zu Zwecken des Monitorings durchgeführt. Zwar liegen die Aufnahmezeitpunkte der zwei vorhandenen Datensätze nur sechs Jahre auseinander, jedoch handelt es sich hierbei um Daten identischer Aufnahmeverfahren. Daher kann im Gegensatz zu Abschnitt 4.2 ein DGM-basierter, flächenhafter Vergleich der Laserscanningdaten von 2004 und 2010 durchgeführt werden.

Im Bereich der ostfriesischen Inseln ist es für den Küstenschutz besonders relevant, die Variationen der Morphologie von Prielen, Watt-, Strand- und Dünenflächen festzustellen. Durch den ständigen Einfluss von Seegang, Tide und Meteorologie ist hier eine hohe Dynamik zu erwarten, sodass neben einer Identifikation langfristiger Tendenzen eine regelmäßige Untersuchung der Veränderungen nötig ist. Die Strömungen verursachen einen stetigen Sedimenttransport, welcher Zu- und Abnahmen von Strandflächen und Dünen zur Folge hat. Zwischen den Inseln wird der Sand, welcher küstenparallel von West nach Ost transportiert wird, durch die Gezeitenströmung nach Norden abgelenkt. Dies hat zur Folge, dass es neben der Sandbankbildung im Westen der östlich gelegenen Insel zu Dünenabbrüchen und zu einem Zurückziehen der nördlichen Küstenlinie kommt [ImTG, 2009].

Für die Insel Juist ist in [ImTG, 2009] ein Abbruch der westlichen und nordwestlichen Dünenbereiche und eine Südverlagerung der nördlichen Strandlinie seit den 1970er Jahren beschrieben, wie Abbildung 4.16 skizzenhaft verdeutlicht. Außerdem wird eine Abnahme des Strandniveaus, die Vergrößerung der Vorstrandneigung und der verstärkte Abbau der Schutzdünen im Westen (ockerfarbene und dunkelgrüne Flächen der Abbildung 4.16) der Insel beschrieben.

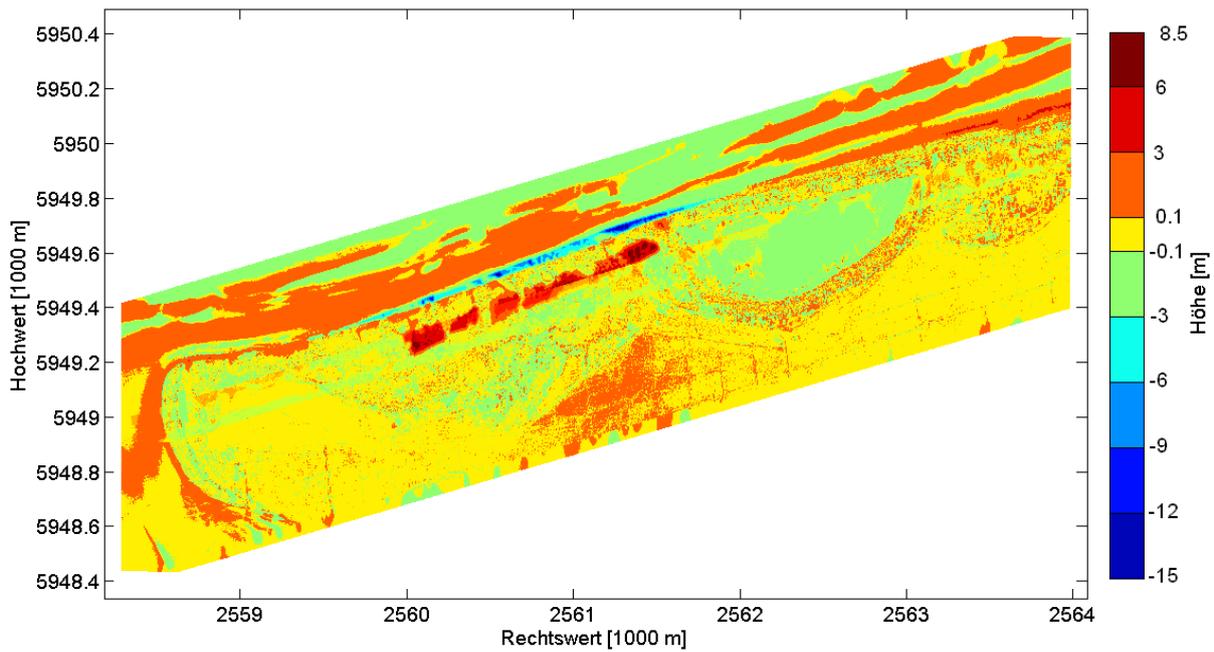


Abbildung 4.17: Differenzen der Daten aus den Epochen 2004 und 2010

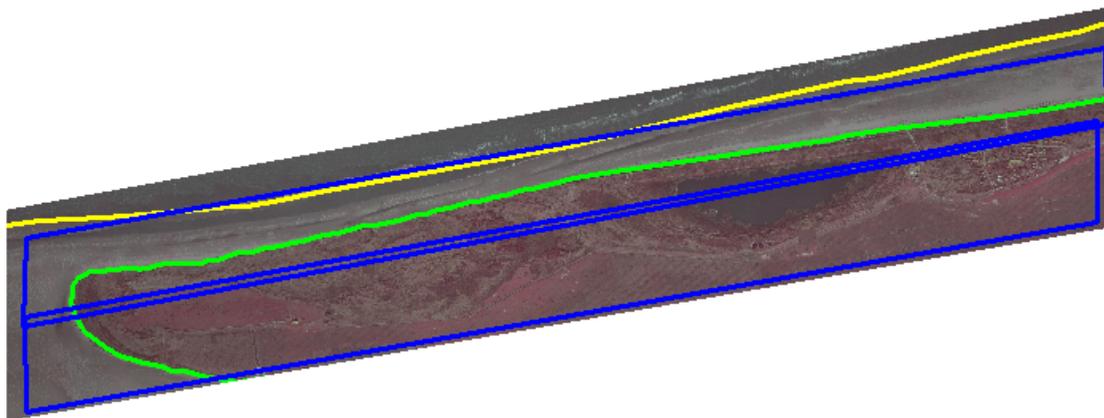


Abbildung 4.18: Verlauf der Dünenkante (grün) und der Wasserlinie (gelb) 2004 im Bereich des Überblickstestgebietes (blau)

Verglichen mit den Beschreibungen der langfristigen morphologischen Entwicklungen aus [ImTG, 2009] zeigen sich diverse Parallelen. So fällt zunächst der blau dargestellte Bereich der Höhenverringerung von bis zu -15 m auf. Dieser befindet sich entlang der nördlichen Dünenkante, sodass hier von einem Dünenabbruch über eine Distanz von mehr als 2 km auszugehen ist. Weiter östlich ist entlang der Dünenkante jedoch auch ein deutlicher Höhenanstieg zu erkennen. Um dieses Areal herum sind Bereiche mit Höhezunahmen bis zu 3 m zu erkennen. Weitere Flächen gleicher Bilanz befinden sich hauptsächlich in dünennahen Strandbereichen. In den meeresnahen Strandbereichen hingegen sind vermehrt Sedimentabtragungen mit einer resultierenden Höhendifferenz von bis zu -3 m zu beobachten, sodass auch hier ein Trend bezüglich einer steigenden Strandneigung zu erkennen ist. Im

Bereich der westlichen Strandflächen ist die Sandbilanz positiv. In den dünnahen Gebieten sind Anstiege der Größenordnung bis 3 m erkennbar, südwestlicher davon finden kaum Höhenänderungen statt.

Für die Dünen im Inselinneren liegt ein in sich relativ abgeschlossener Bereich stärkeren Zuwachses von bis zu 8.5 m vor. Diese enormen Anstiege lassen sich mit Hilfe der vorliegenden Daten nicht erklären. Die auffällige Form sowie der große Höhenanstieg innerhalb einer Zeitspanne von sechs Jahren lassen jedoch auf eine anthropogene Ursache schließen, zum Beispiel im Zusammenhang mit Küstenschutzmaßnahmen. Südlich von diesem Bereich ist auch in Salzwiesengebieten ein Anstieg der Höhe festzustellen. Ansonsten sind große Dünenbereiche konstant in der Höhe. In den Bereichen des Polders und der Domäne Bill (vgl. Abbildung 4.16) sowie am westlichsten Ende überwiegen Höhenabnahmen in der Größenordnung bis -3 m, es findet also auch aktuell ein Abbau der westlichen Schutzdünen statt. Der langfristige Trend scheint sich demnach auch im aktuellen Beobachtungszeitraum der letzten sechs Jahre bis 2010 fortzusetzen.

Zur detaillierteren Analyse wird das kleine Testgebiet der Westspitze separat ausgewertet. Insgesamt ist im betrachteten Zeitraum eine maximale Höhenabnahme von -3.90 m aufgetreten. Die maximale Höhenzunahme beträgt 3.47 m, die mittlere Höhenänderung 0.05 m bei einem RMS vom 0.35 m (Tabelle 4.6).

Minimum dz	-3.90 m
Maximum dz	3.47 m
Mittelwert dz	0.05 m
RMS dz	0.35 m

Tabelle 4.6: Statistische Kenngrößen der Differenzen

Die Verteilung der auftretenden Höhenunterschiede ist in Abbildung 4.19 dargestellt. Für das Blockdiagramm sind die Höhendifferenzen in 0.2 m Intervalle eingeteilt und entsprechend der auftretenden Häufigkeit prozentual aufgetragen.

Es fällt auf, dass Höhenunterschiede im Bereich von ± 0.1 m mit einer Häufigkeit von 53 % auftreten. Mit 11,5 % bzw. 13.5 % folgen die Intervalle [0.1 m, 0.3 m] und [-0.3 m, -0.1 m].

Insgesamt liegen 69.5 % der ermittelten Höhendifferenzen innerhalb des Genauigkeitsniveaus des DGM 2004 von ± 0.2 m.

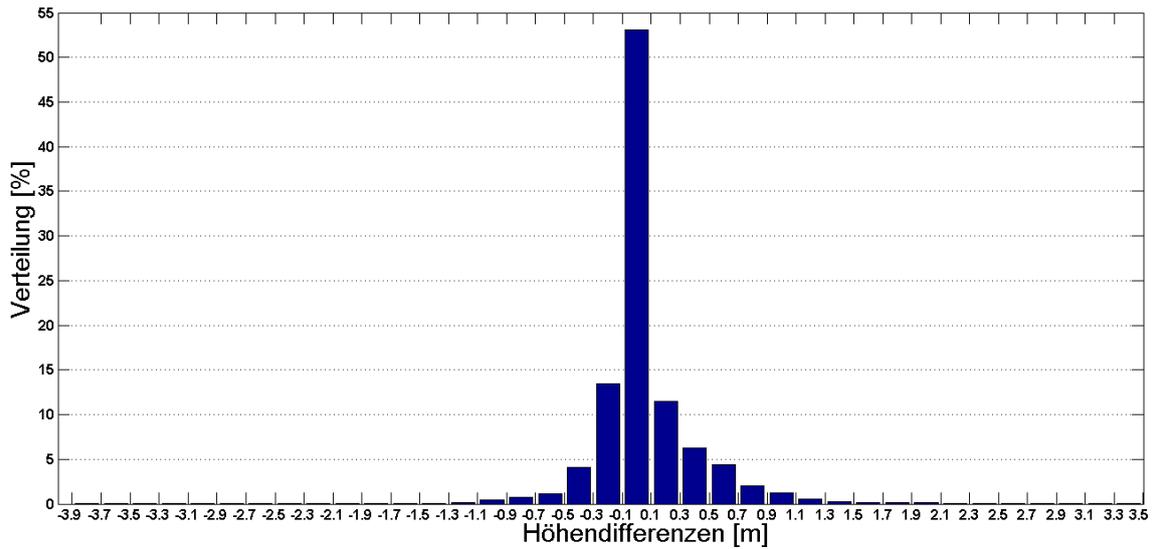


Abbildung 4.19: Verteilung der Höhendifferenzen

Zur genaueren Analyse der Höhenänderungen werden die Differenzen mit einem Orthophoto desselben Ausschnitts aus dem Jahr 2004 verglichen (Abbildung 4.20). So können die im Luftbild erkennbaren Strukturen zur Analyse der auftretenden Veränderungen herangezogen werden.

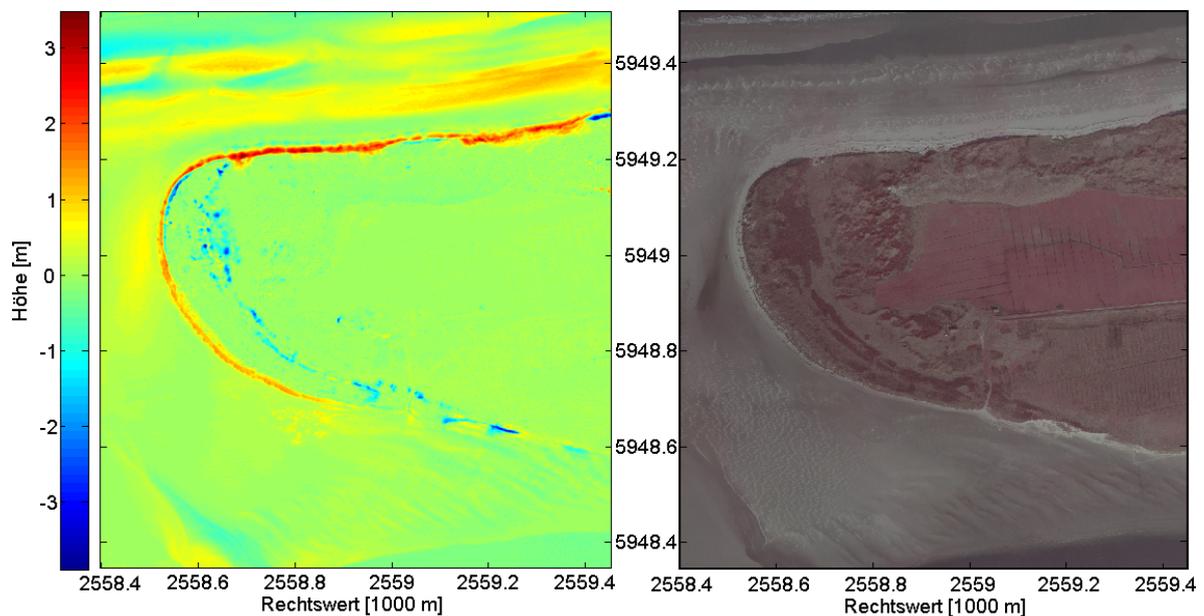


Abbildung 4.20: Differenzplot DGM 2010 - DGM 2004 und Orthophoto 2004

Die stärkste Höhenzunahme tritt im Norden des Inselausschnitts im Bereich des Übergangs von Strand- zu Dünenfläche auf. Auf einer Breite von bis zu 20 m werden hier maximale Werte von 2.0 m bis zu 3.47 m erreicht. Entlang eines ebenfalls etwa 20 m breiten Bereichs der westlichen Dünenkanten variieren die Höhendifferenzen im Maximum etwa zwischen 1 m und 2 m.

Diese Sedimentanlagerung am Übergang vom Strand zum Inselinneren ist vermutlich das Ergebnis erfolgreichen Küstenschutzes. Die Dünenkanten werden derart mit Reisigmaterial befestigt, dass aufgewehter Sand festgehalten wird und im Folgenden durch nachwachsende Dünenpflanzen am Abtransport durch Wind oder Wasser gehindert wird. Hier kann dem langjährigen Trend von Dünenabbrüchen also erfolgreich entgegengewirkt werden.

Abbildung 4.21 zeigt einen Ausschnitt des angebrachten Reisigmaterials im Bereich der westlichen Dünenausläufer, welches bereits teilweise von aufgewehtem Sand überdeckt wird. Weiterhin variiert die Hauptwindrichtung im Bereich der deutschen Nordseeküste zwischen Süd- und Nordwest, wobei im Sommerhalbjahr Nordwestwind vorherrscht, während im Winterhalbjahr die Windrichtung Südwest dominiert [Atlas, 1996]. So sind im Sommerhalbjahr zu dem strömungsbedingten Sedimenttransport im Wasser verstärkt Aufwehung von Sand entlang der Nord- und Westküste möglich. Im Winterhalbjahr wird das entlang der Nordküste aufgewehte Material vermutlich neben den künstlichen Dünenschutzmaßnahmen durch die südlich befindlichen Dünen geschützt, sodass der Südwestwind weniger äolische² Abtragung verursachen kann. Entlang der Südwestküste fehlt dieser Schutz im Süden, sodass durch Südwestwinde vermehrt Material wieder abgetragen wird. Daher verläuft der Höhenanstieg in diesem Bereich langsamer als entlang der Nordwestküste: im betrachteten Beobachtungszeitraum von sechs Jahren war der Höhenanstieg im Norden um bis zu 1.5 m größer als im Westen.



Abbildung 4.21: angebrachtes Reisigmaterial an den westlichen Dünenausläufern des betrachteten Datenausschnittes [Google Maps - © 2012 Google]

² Vom Wind transportiert

Im nordöstlichen sowie im südöstlichen Bereich des im Datenausschnitts sind entlang der Dünenkante jedoch auch Abträge von bis zu -3.53 m (Nordosten) bzw. -3.30 m (Südosten) zu erkennen. Betrachtet man hier beispielsweise für den südöstlichen Bereich ein höher aufgelöstes Luftbild (Abbildung 4.22), wird deutlich, dass der Strand hier sehr schmal ist und keine künstlichen Befestigungen vorhanden sind. Auch sind die angrenzenden Dünenflächen vergleichsweise spärlich bewachsen. Bei höheren Pegelständen aufgrund von starkem Wind wird dieser Bereich daher überflutet und das vorhandene Sediment kann ungehindert weggespült werden.



Abbildung 4.22: ungeschützter Strandbereich an den südöstlichen Dünenausläufern des betrachteten Datenausschnittes [Google Maps - © 2012 Google]

Entlang der nördlichen Dünenkante sind Reisigbefestigungen angebracht, die einen langsamen Sedimentabtrag verhindern. Jedoch fällt die Dünenkante in diesem schmalen Strandabschnitt aus mehreren Metern Höhe steil ab (Abbildung 4.23) und weist damit auf Dünenabbrüche hin. Der zu verzeichnende Abtrag ist demnach wahrscheinlich durch größere Ereignisse, wie Hochwasser im Zusammenhang mit Stürmen, verursacht worden.



Abbildung 4.23: abgebrochene Dünenkante an den nordöstlichen Dünenausläufern des betrachteten Datenausschnittes - oben: Aufsicht, unten: Blick vom Strand aus [Google Maps - © 2012 Google]

Für die im Ausschnitt enthaltenden Wasserflächen ist im Norden des Inselausläufers eine Höhenzunahme bis zu etwa 1 m zu beobachten. Insgesamt sind Aussagen über die Wasserflächen nur vorsichtig zu treffen, da es bei den Wasserflächen um durch kleine Sandbänke verursachte prielähnliche Zuläufe am Strand handelt (Abbildung 4.24) und keine Informationen über die gezeitenbedingten Pegelstände zum Zeitpunkt der Laserscanningaufnahmen vorliegen. Insgesamt bestätigt sich aber der Eindruck der Überblicksuntersuchungen anhand des großen Testgebietes, dass es entlang der Nordküste in dünennahen Strandgebieten eher zu Sedimentzunahmen kommt, während die Bereiche der Sedimentabnahme sich dichter an der Wasserkante befinden, es also insgesamt zu einem Anstieg der Strandneigung kommt.

Im Bereich des Zulaufs im Süden ist jedoch eine Zunahme von maximal 0.58 m zu beobachten, während etwa 80 m weiter östlich ein Bereich der Höhenabnahme von bis zu -0.5 m befindet. Die beiden Bereiche der Variation verfügen außerdem über eine ähnliche Form, sodass davon auszugehen ist, dass hier eine Verschiebung des Zulaufs stattgefunden hat.



Abbildung 4.24: Überblicksorthophoto - Wasserflächen im Bereich des Datenausschnittes

Insgesamt ist aber vor allem im Nordosten des Ausschnittes im Bereich der dünnahen Strandflächen eine Versandung zu erkennen, welche innerhalb der Beobachtungsepochen einen Höhenanstieg von bis zu 1.30 m verursacht. Die Höhenzunahme der westlich der Dünenkante vorgelagerten Strandfläche beträgt bis zu 0.64 m.

Im Dünenbereich im Westausläufer der Insel verringern sich die Höhen über den Beobachtungszeitraum um -1 bis -3.90 m. In der bisher betrachteten Auflösung ist kann dieses Teilergebnis nicht näher beurteilt werden. Daher wird ein kleinerer, höher aufgelöster Ausschnitt der Differenzen betrachtet (Abbildung 4.25). Vergleicht man diesen Ausschnitt erneut mit einem vergrößerten Orthophoto, wird klar, dass die im Ausschnitt enthaltenen Reduktionen der Höhen in diesem Bereich nur durch einen Dünenabbruch zu erklären ist. Die positive Sandbilanz des vorgelagerten Streifens wurde wahrscheinlich durch das abgebrochene und nachrutschende Sediment der Dünen verursacht.

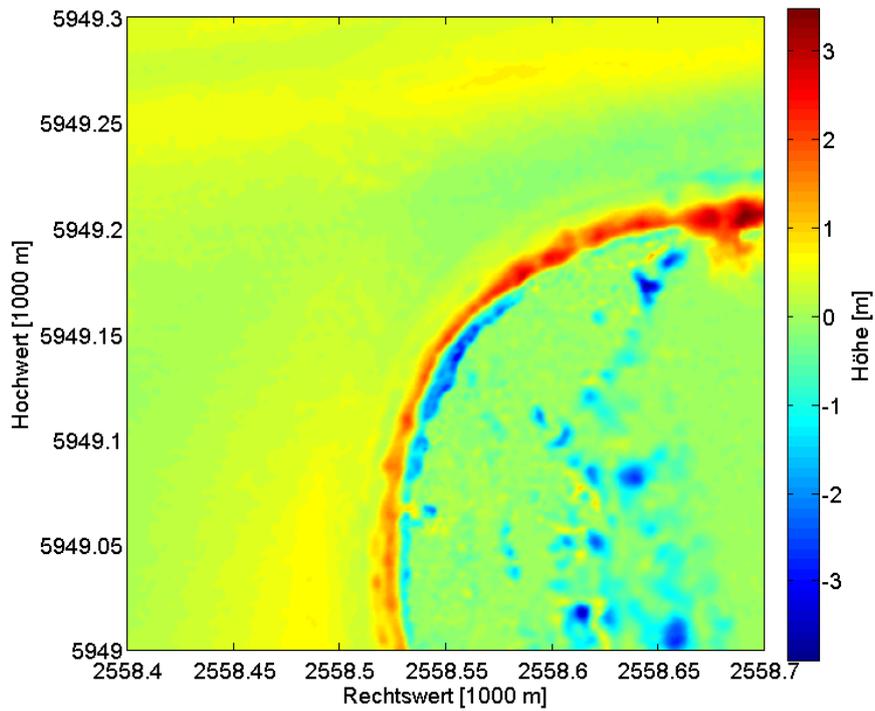


Abbildung 4.25: Höher aufgelöster Datenausschnitt der Differenzen

In Abbildung 4.26 sind die gradientenbasiert ermittelten Kanten für den in Abbildung 4.25 dargestellten Ausschnitt zusammen mit dem Plot der Differenzen dargestellt. Die extrahierte Kante des Geländemodells 2010 liegt im Vergleich zu der des DGM 2004 weiter im Inselinneren im Bereich der Dünenvegetation von 2004. Daher wird die Vermutung bestätigt, dass auch hier ein Dünenabbruch stattgefunden hat.

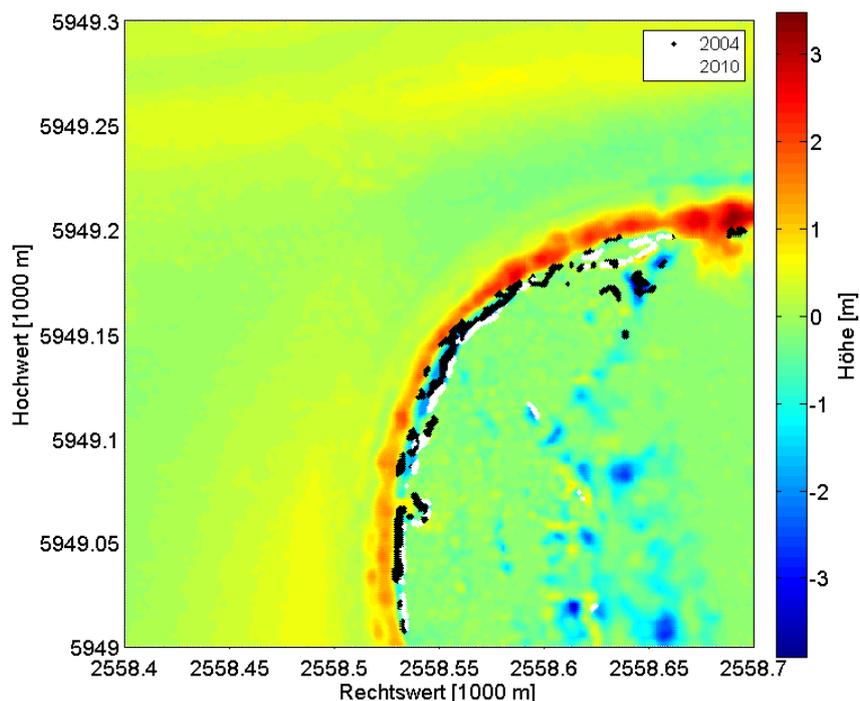


Abbildung 4.26: Kanten der beiden Datensätze

4.3.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Insgesamt bestätigen die durchgeführten Analysen den in [ImTG, 2009] beschriebenen langfristigen Trend von Dünenabbrüchen, verstärkter Vorstrandneigung und Rückgang der Schutzdünen. Vor allem Dünenabbrüche konnten für mehrere Bereiche nachgewiesen werden. Diese verursachen Höhenabnahmen bis -15 m. Neben den Gebieten mit negativer Sandbilanz sind jedoch auch für nach [ImTG, 2009] Abbruch- bzw. Abtrag gefährdete Bereiche mit Sedimentzuwachs zu erkennen. Die flächenhaften Sedimentzu- und Abnahmen bewegen sich großteils in einem Intervall von -3 m bis 3 m.

Für das westliche Testgebiet ist im Mittel ein geringer Höhenanstieg von 0.05 m zu beobachten, sodass die in [ImTG, 2009] beschriebene Abnahme des Strandniveaus weder bestätigt noch widerlegt werden kann.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit werden neben einer allgemeinen Analyse eines aktuellen Laserscanningdatensatzes mit dem Schwerpunkt der Strukturlinienextraktion von Objekten im Wattenmeer verschiedene Datensätze der ostfriesischen Nordseeküste unterschiedlicher Epochen zu Zwecken des Monitorings untersucht. Hierdurch können Bewegungen von Strukturen im Watt- und Küstenbereich nachgewiesen und quantifiziert werden.

Für die Betrachtung des ALS-Datensatzes aus dem Wattenmeerbereich Langeoog-Spiekerooog erfolgen neben der Prielkantenextraktion und -Analyse die Generierung eines digitalen Geländemodells sowie dessen erneute Berechnung unter Integration der Strukturlinien in den Berechnungsalgorithmus.

Darauf aufbauend wird dieser aktuelle Laserscanningdatensatz mit über 30 Jahre zurückliegenden, punktweise vorliegenden terrestrischen Vermessungen verglichen. In einer zweiten Analyse werden darüber hinaus mit Hilfe zweier Laserscanningdatensätze der Insel Juist mit einem Aufnahmeabstand von sechs Jahren Dünen-, Strand und Wasserflächen miteinander verglichen. So sollen Daten gleichen Ursprungs flächendeckend auf Veränderungen analysiert werden.

Die Software *Exstruct*, welche Bruchkanten durch Schätzung von Flächenfunktionen in die Laserpunktwolke bestimmt, stellt ein zuverlässiges Tool zur Bestimmung und Extraktion markanter Objektkanten dar. Im Vergleich zwischen den ermittelten Strukturlinien und eines Geländemodells, welches auf Grundlage desselben Laserscanningdatensatzes berechnet wurde, treten Abweichungen von bis zu 0.3 m auf. Diese weisen auf Interpolationsungenauigkeiten des DGM hin, welche bei der Berücksichtigung der Bruchkanten bei einer erneuten DGM-Modellierung reduziert werden.

Die Analyse der Daten über einen Zeitraum von 30 Jahren zeigen für alle drei Testgebiete langfristige morphologische Veränderungen der Prielverläufe auf. Die verwendeten Vergleichsmethoden sind also für ein zuverlässiges Monitoring geeignet. Es handelt sich

hierbei hauptsächlich um Verschiebungen der Ränder der Hauptarme des Prielsystems. Lediglich bei kleinen Ausläufern kommt es zu vollständigen Verschiebungen. Diese Variationen verursachen lokal über Flächen mit bis zu 200 m im Durchmesser Höhenänderungen in einer Spanne von bis zu fünf Metern (-2.28 m bis 2.70 m). Im Mittel kommt es insgesamt zu einer Zunahme der Höhe um 0.16m. Vor allem im Bereich der Wattflächen sind die Beträge der Höhenzunahme größer als die der Abnahme.

Für die vergleichende Analyse der Laserscanningdaten über einen Zeitraum von sechs Jahren können die in der Literatur aufgeführten langfristigen Trends bestätigt werden. Vor allem Küstenabbrüche konnten für mehrere Bereiche nachgewiesen werden. Jedoch tritt auch in als gefährdet ausgewiesenen Gebieten Sedimentzuwachs auf, was auf erfolgreichen Küstenschutz hinweist. Insgesamt ist im Mittel ein geringer Höhenanstieg zu verzeichnen. Für die Höhenabnahmen ergeben sich Spitzenwerte von -15 m. Als Ursache für die maximalen Höhenzunahmen um bis zu 8.5 m werden Eingriffe durch den Menschen vermutet.

Das Airborne Laserscanning hat sich als sehr gut geeignetes Verfahren für die flächenhafte Aufnahme von Watt- und Küstenflächen erwiesen, welches zahlreiche Anwendungen möglich macht.

Da die betrachteten Gebiete einer hohen morphologischen Dynamik unterliegen, ist für ein genaues Monitoring die Auswertung weiterer Datensätze mit kürzeren Abständen zwischen den Aufnahmezeitpunkten sinnvoll. Eine so entstehende Zeitreihe macht die Beurteilung der analysierten Veränderungen hinsichtlich lang- und kurzfristiger Entwicklungen möglich. Weiterhin sind die morphologischen Veränderungen das Ergebnis verschiedener Einflussgrößen. Die ostfriesischen Inseln sind vor allem von Seegang und Gezeitenströmungen beeinflusst. Daher ist eine großräumigere Untersuchung, welche die Wasserflächen des Einzugsgebietes der entsprechenden Küstengebiete vollständig umfasst, für zukünftige Untersuchungen sicher sinnvoll.

Literaturverzeichnis

- [Axelsson, 2000] Axelsson, P. (2000): DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models, IAPRS XXXIII, Part 4/1, pp. 110-117.
- [Atlas, 1996] Diercke Weltatlas, 4. aktualisierte Auflage 1996, Westermann Schulbuchverlag GmbH, Braunschweig 1988, S.117
- [Brzank, 2008] Brzank, A. (2008):Bestimmung Digitaler Geländemodelle in Wattgebieten aus Laserscannerdaten: Dissertation: Deutsche Geodätische Kommission Reihe C, Nr. 622 (ebenfalls in: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover, Nr. 274. Hannover, 2008. 89 S.
- [Exstruct, 2008] Brzank, A. (2008): Anleitung „Exstruct“, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Leibniz Universität Hannover.
- [Flyer BSH, 2009] Flyer über die Einführung eines neuen Seekartennulls 2005, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Stand März 2009, abgerufen über die Website des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie am 21.11.2012: <http://www.bsh.de/de/Produkte/Infomaterial/Seekartennull/InfoLAT.pdf>
- [Heipke, 2010] Heipke, C. (2010): ALS_Part1, Vorlesungsskript zur Veranstaltung, Methoden der Photogrammetrie und Fernerkundung' des 1. Mastersemesters Geodäsie und Geoinformatik an der Leibniz Universität Hannover, Wintersemester 2010/2011
- [ImTG, 2009] Milbradt, P., Dorow, C., Asche, C. (2009):Identifikation morphologischer Tendenzen und Geschwindigkeiten im Küstenbereich (ImTG), Abschlussbericht, Institut für Bauinformatik, Leibniz Universität Hannover
- [Kraus ,2004] Kraus, Karl (2004): Photogrammetrie, Band 1: Geometrische Information aus Photographien und Laserscanneraufnahmen, 7., vollständig bearbeitete und erweiterte Auflage, Walter de Gruyter GmbH & Co KG, Berlin, 2004

- [Kraus und Pfeiffer, 1998] Kraus, K., Pfeifer, N (1998): Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. In ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 53 (4), pp. 193-203.
- [Projektdok., 2011] Projektdokumentation der Firma Milan Geoservice GmbH, Thema: Airborne-Laser-Scanning – Wattenmeer-Baltrum-Spiekerooog-Langeoog in Teilgebieten A und B, Kamenz, 2011
- [Rottensteiner, 2010] Rottensteiner, F. (2010): Handout zur Übung der Veranstaltung ‚Methoden der Photogrammetrie und Fernerkundung‘ des 1. Mastersemesters Geodäsie und Geoinformatik an der Leibniz Universität Hannover, Wintersemester 2010/2011
- [Schenk, 2001] Schenk, T. (2001): Modeling and Analyzing Systematic Errors in Airborne Laser Scanners. Technical Report Photogrammetry No 10, Dep. of Civil and Env. Engineering and Geodetic Science, OSU, 39p.
- [SCOP++, 2008] SCOP++ Software Manual for SCOP++ Version 5.4.3 and higher, Copyright 2002-2008 IPF, TU Vienna and INPHO GmbH.
- [Vosselmann, 2002] Vosselman, G. (2002): Strip Offset Estimation using Linear Features. 3rd International Workshop on Mapping Geo-Surfical Processes using Laser Altimetry, Columbus, Ohio, October 7-9, 2002, 9 pages.
- [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 et al., 2004] Wagner, W., Ullrich, A., Melzer, T., Briese, C., Kraus, K., (2004): From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: potential and practical challenges. IAPRS 35, 201-206 (Part B3).
- [Wortmann, 1999] Wortmann, C (1999): Schema des Landverlustes am Westende von Juist, © 2002 Chr. Wortmann Letzte Aktualisierung: 16.1.2005, abgerufen am 30.11.2012 über die Website: <http://www.c-wortmann.de/PublicPics/juist/schema.html>