

Ableitung Digitaler Geländemodelle im Wattenmeer aus luftgestützten Laserscannerdaten

Von ALEXANDER BRZANK, CHRISTIAN HEIPKE, JENS GÖPFERT und UWE SÖRGEL

Zusammenfassung

Hochgenaue Digitale Geländemodelle (DGM) der Watten stellen eine essentielle Datenquelle für eine Fülle von Aufgaben und Anwendungen im Rahmen des Küstenschutzes sowie der Meeresforschung dar. Traditionell gestaltet sich jedoch die Erhebung der Messdaten insbesondere für die Erstellung großflächiger Modelle aufgrund der periodischen Überflutung schwierig. Deshalb müssen bei der Erzeugung eines DGM im Allgemeinen Einschränkungen hinsichtlich Genauigkeit und Aktualität in Kauf genommen werden. Mit Hilfe des luftgestützten Laserscannings ist man in der Lage, die Wattoberfläche großräumig, hochgenau und innerhalb eines kurzen Zeitfensters zu erfassen. Im Folgenden kann auf der Grundlage dieser Messungen ein präzises DGM generiert werden, sofern die spezifischen Beschränkungen des Messverfahrens berücksichtigt werden.

In diesem Artikel wird ein neuer Arbeitsablauf zur Erstellung eines DGM in den Watten aus luftgestützten Laserscannerdaten beschrieben. Für zwei entscheidende Schritte, namentlich die Klassifikation von Wasserpunkten und die Strukturlinienextraktion, wird darüber hinaus jeweils ein Algorithmus vorgeschlagen.

Anhand von Beispielen werden die beiden Algorithmen getestet. Die Resultate zeigen, dass die vorgestellten Verfahren präzise, zuverlässige Ergebnisse liefern und die Berechnung hochgenauer DGM ermöglichen.

Schlagwörter

DGM, Laserscanning, Vermessung, Watt

Summary

Highly precise Digital Terrain Models (DTM) of the Wadden Sea are an essential data source for various tasks and applications in the field of coast protection and oceanography. However, the acquisition of height data is in general difficult, especially for the generation of extensive areas, due to the cyclic flooding. Therefore, in regard to accuracy and timeliness limitations of the derived DTM normally have to be accepted. Airborne Laserscanning allows obtaining high accurate height data of the mudflat surface for large areas within a short time period. Based on these measurements a precise DTM can be determined as long as specific limitations of the method are considered.

A new workflow to generate a DTM in the Wadden Sea from Lidar data is presented in this study. For each of the two major steps – namely classification of water points and the extraction of structure lines – an innovative algorithm is proposed.

Both algorithms are tested on the basis of examples. The results prove that the presented methods deliver precise, reliable results and enable the calculation of accurate DTM.

Keywords

DTM, laserscanning, survey, wadden sea

I n h a l t

| | |
|--|-----|
| 1. Einleitung | 92 |
| 2. Erzeugung konsistenter Digitaler Geländemodelle im Wattenmeer | 94 |
| 2.1 Klassifikation von Wasserflächen | 95 |
| 2.1.1 Klassifikationsmerkmale | 96 |
| 2.1.2 Gewichtung der Merkmale | 97 |
| 2.1.3 Kalibrierung der Intensität und der 2D-Punktdichte | 97 |
| 2.1.4 Automatische Ableitung der Klassifikationsparameter aus den Trainingsgebieten | 99 |
| 2.1.5 Verwendung mehrerer Trainingssets | 102 |
| 2.1.6 Plausibilisierung | 103 |
| 2.2 Extraktion von Strukturlinien | 103 |
| 2.2.1 1D-tanh-Funktion und Ableitung der Strukturlinienpunkte | 104 |
| 2.2.2 2D-Flächentypen der tanh-Funktion | 105 |
| 2.2.3 Ableitung der Näherungslösung | 107 |
| 2.2.4 Bestimmung der Umringgrenzen | 108 |
| 2.2.5 Festlegung und Kontrolle der Recheneinheiten | 108 |
| 2.2.6 Berechnung der Startwerte, Ausgleichung und Ableitung der Strukturlinienpunkte | 108 |
| 3. Praktische Tests | 109 |
| 3.1 Klassifikation von Wasserflächen | 109 |
| 3.2 Extraktion von Strukturlinien | 112 |
| 3.3 Ableitung eines Digitalen Geländemodells | 114 |
| 4. Bewertung und Ausblick | 118 |
| 5. Danksagung | 119 |
| 6. Schriftenverzeichnis | 119 |

1. Einleitung

Digitale Geländemodelle (DGM) sind unverzichtbare Datenquelle und Arbeitsgrundlage im Küstenschutz. Basierend auf der Analyse von DGM verschiedener Epochen können Küstenschutzanlagen überwacht und hinsichtlich relevanter Änderungen untersucht werden (BRÜGELMANN, 2000). Ebenso können Lage- und Höhenänderungen küstenmorphologisch bedeutsamer Objekte, wie Priele und Dünen, aufgedeckt werden. Weiterhin dienen DGM als Planungsgrundlage für Instandsetzung und Neubau von Küstenschutzanlagen sowie Massenberechnungen. Sie sind unverzichtbar für die Gefahrenanalyse von Überflutungen. Darüber hinaus bilden sie die Grundlage für eine Vielzahl wissenschaftlicher Untersuchungen und Aktivitäten wie Windmodellierung, Sedimenttransport, numerische Strömungs- und Wellenmodellierung etc. (PRANDLE et al., 2000).

Alle diese Anwendungen benötigen ein hochgenaues DGM der Watten. Für dessen Erzeugung eignet sich insbesondere das luftgestützte Laserscanning (BALTSAVIAS, 1999). Diese vergleichsweise neue, aber dennoch schon sehr gebräuchliche Methode bietet viele Vorteile. Es handelt sich um ein aktives, luftgestütztes und berührungsloses Messverfahren. Innerhalb kurzer Zeit können große Flächen mit einer Punktdichte von mehreren Punkten pro m² erfasst werden. Die durchschnittlich erreichte Lage- und Höhengenaugigkeit von $\sigma_x = \sigma_y = 0,5$ m bzw. $\sigma_z = 0,15$ m ermöglicht eine für die oben aufgeführten Anwendungsbereiche hinreichend genaue Geländemodellierung. Das Messverfahren ist in der Praxis weit verbreitet und hat sich als Standardverfahren zur Erhebung von 3D-Geländeeinformationen im Wattbereich durchgesetzt. Dennoch treten bei der Geländemodellierung in den Watten spezifische Schwierigkeiten auf, welche die Genauigkeit der abgeleiteten DGM negativ beeinflussen und somit deren Verwendbarkeit beeinträchtigen.

Die Hauptfehlerquelle bei der Modellierung von DGM in Watten sind die in den Rohdaten enthaltenen Wasserpunkte. Trotz der Tatsache, dass die Befliegung bei Tideniedrigwasser durchgeführt wird, sind einige Bereiche des Wattes mit Wasser überflutet. Besonders in den Prielen verbleibt Restwasser. Die jeweilige Wassertiefe schwankt zwischen wenigen Zentimetern und mehreren Metern. Der Laserscannerstrahl, der sich bei gängigen Standardsystemen (z.B. Falcon II, ALTM 3100, LMS-Q560 etc.) im Wellenlängenbereich von 1–1,5 μm befindet, durchdringt das Wasser nicht bis zum Watt, sondern wird in unterschiedlichen Anteilen an der Wasseroberfläche reflektiert (ZISSIS, 1993). Die aus diesen Entfernungsmessungen abgeleiteten Punkte entsprechen nicht der Geländeoberfläche¹. Um jedoch ein DGM erstellen zu können, welches den Verlauf des trockenen Watts genau wiedergibt, müssen Wasserpunkte analog zu Vegetationspunkten auf dem Festland klassifiziert und entfernt werden.

Für die mit Wasser gefüllten Gebiete stehen nach der Klassifikation keine Stützpunkte aus der Laserscannerbefliegung zur Verfügung. Um trotzdem ein lückenloses DGM erstellen zu können, müssen diese Bereiche durch entsprechende Stützpunkte anderer Herkunft gefüllt werden. Dafür bieten sich flächenhaft aufgenommene hydrographische und terrestrische Vermessungen an. Jedoch beeinflussen die unterschiedlichen Genauigkeiten beider Verfahren sowie mögliche morphologische Veränderungen der beobachteten Wattfläche aufgrund des Zeitversatzes zwischen den Messungen die Qualität des aus den verschnittenen Rohdaten erzeugten DGM.

Eine Alternative zur Verwendung von Echolotmessungen stellt das so genannte bathymetrische Laserscanning dar, welches Pulse im Bereich des nahen Infrarots und zusätzlich im Bereich des sichtbaren Lichtes (z.B. Shoal-System – 1064 nm und 532 nm) aussendet. Während das infrarote Signal an der Wasseroberfläche reflektiert wird, durchdringt der Puls im Bereich des sichtbaren Lichts das Wasser bis zum Meeresboden (IRISH and LILLYCROP, 1999). Dadurch ist es möglich, die Topographie sowohl für trockene als auch überflutete Gebiete zu erfassen, wobei die Durchdringung des Wassers abhängig von der Trübung ist. Da das Wasser der Nordsee jedoch insbesondere im Bereich des Wattenmeeres einen hohen Sedimentanteil aufweist, können sehr häufig schon Bereiche mit einer Wassertiefe von einem Meter nicht mehr erfasst werden, weshalb dieses Verfahren keine Verwendung findet (AARUP, 2002).

In den Watten treten an morphologischen Objekten wie Prielen und Platen Strukturlinien² auf. Sofern diese linienförmigen Objekte in die Berechnung des DGM einfließen, kann die Genauigkeit des erzeugten DGM zusätzlich gesteigert werden. Jedoch werden aufgrund des Messprinzips nur Massenpunkte und keine speziell an morphologischen Objekten ausgerichteten Punkte bestimmt. Will man auf den Einsatz anderer aufwändiger Erfassungsmethoden verzichten, so müssen die Formlinien und Bruchkanten direkt aus den Laserrohdaten ermittelt werden.

In diesem Artikel wird ein neuer Arbeitsfluss zur Erstellung von hochgenauen DGM aus luftgestützten Laserscannerdaten präsentiert. Dabei wird für die enthaltenen Teilschritte

¹ In dieser Arbeit wird dann von einem Digitalen Oberflächenmodell (DOM) gesprochen, wenn ein Höhenmodell aus Laserscannerdaten im Wattbereich berechnet wurde, welches Wasserflächen enthält.

² Die Strukturlinie wird innerhalb dieses Artikels als Sammelbegriff für morphologisch bedeutsame Geländelinien verwendet. Diese untergliedern sich in Bruchkanten und Formlinien. Sie unterscheiden sich dahingehend, dass Bruchkanten quer zur Ausbreitungsrichtung nicht stetig differenzierbar sind, während Formlinien in derselben Richtung eine maximale Krümmung aufweisen.

– namentlich die Klassifikation der Wasserpunkte sowie die Strukturlinienextraktion – jeweils ein geeignetes Verfahren vorgestellt. Anhand ausgewählter Beispiele werden diese beschrieben, um die Eignung der Methoden zu unterstreichen.

2. Erzeugung konsistenter Digitaler Geländemodelle im Wattenmeer

Die Erstellung eines DGM ist die Hauptanwendung für luftgestützte Laserscannerdaten. Dabei umfasst der Prozess von der Aufnahme des Geländes bis zur Modellierung des DGM mehrere Arbeitsschritte. In der Praxis hat sich der Arbeitsablauf gemäß Abb. 1 durchgesetzt (KRAUS u. PFEIFER, 2001). Der Prozess ist auf die Ableitung eines DGM im Binnenbereich ausgerichtet. Aufgrund der speziellen Umweltbedingungen im Watt ist der Arbeitsablauf jedoch für diesen Bereich unzureichend geeignet.

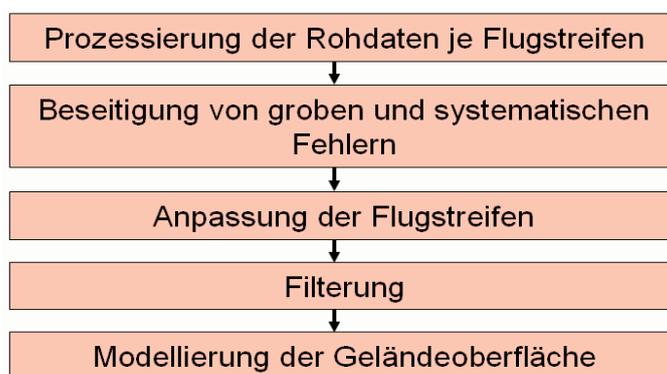


Abb. 1: Klassischer Arbeitsablauf zur Ableitung eines DGM aus Laserscannerdaten

Die Hauptschwierigkeit im Wattenmeer stellen Wasserflächen in Prielen und Senken dar, die von dem Laserstrahl nicht durchdrungen werden können. Da die Wasserpunkte nicht zur gesuchten Geländeoberfläche gehören, müssen die Laserpunkte in die Klassen „Wasser“ und „Watt“ unterteilt werden. Im Gegenzug ist im Regelfall eine klassische Filterung der Daten in „Boden“ und „Nichtboden“ nicht notwendig, da der Wattbereich fast vollständig frei von Vegetation sowie künstlichen Anlagen ist. Anschließend werden Daten aus hydrographischen oder terrestrischen Vermessungen verwendet, um die entstandenen Lücken im Bereich der Wasserflächen zu füllen. Nachfolgend leitet man die Strukturlinien aus dem vereinigten Datensatz ab, welche dem anschließenden Modellierungsprozess zugeführt werden. Daraus ergibt sich der neue, angepasste Arbeitsablauf für die Modellierung von Laserscannerdaten in Wattgebieten (Abb. 2).

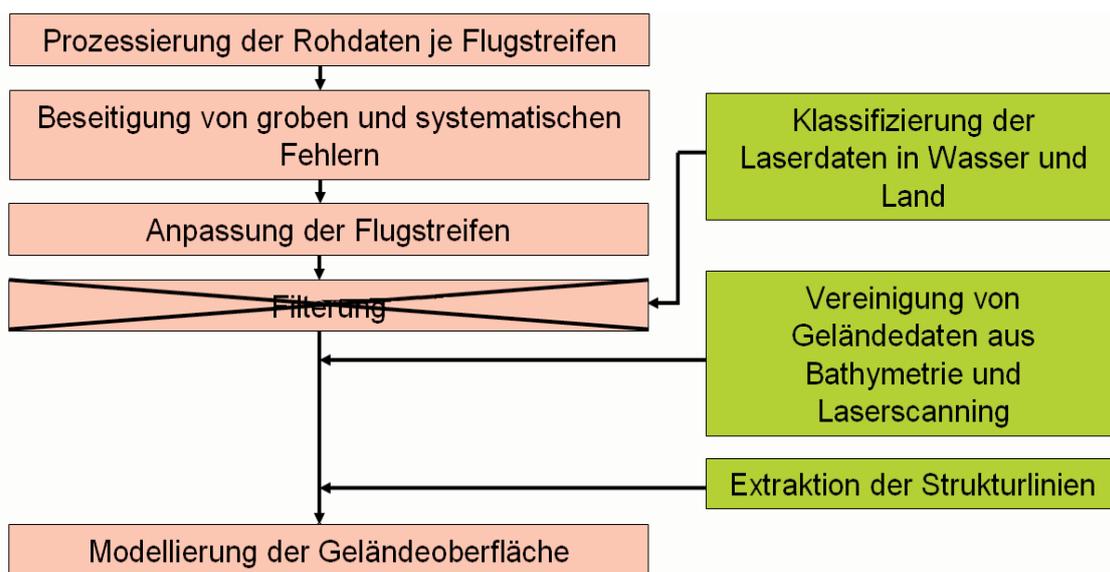


Abb. 2: Optimierter Arbeitsablauf zur Ableitung eines DGM aus Laserscannerdaten in Wattgebieten

2.1 Klassifikation von Wasserflächen

Um die Laserscannerpunkte in die Klassen „Wasser“ und „Watt“ einzuteilen, müssen aus den Daten Merkmale extrahiert werden, welche eine Unterscheidung ermöglichen. Die Merkmale müssen sich hinsichtlich ihrer Ausprägung bezüglich beider Klassen – physikalisch begründbar – signifikant voneinander unterscheiden. Durch die Analyse der Beziehung zwischen Wasser und Watt sowie der Interaktion des Laserstrahls mit den beiden Geländeoberflächen hat sich herausgestellt, dass die drei Merkmale Höhe H , Intensität I und 2D-Punktdichte P für die Klassifikation sehr gut verwendbar sind.

In dieser Arbeit beruht die Klassifikation auf der Analyse dieser drei genannten Merkmale, welche jeweils aus den Laserpunkten direkt bzw. indirekt gewonnen werden können, unter Verwendung eines aus der „Fuzzy-Control“ entlehnten Konzeptes³. Jeder Flugstreifen wird dabei getrennt klassifiziert, um Höhengsprünge innerhalb zusammenhängender Wasserflächen auszuschließen, die durch unterschiedliche Aufnahmezeitpunkte begründet sind. Die Klassifikation erfolgt entsprechend der Aufnahme für jeden einzelnen Massenpunkt. Dazu wird für jeden Punkt x der Gesamtzugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“ $\mu(H_x, I_x, P_x, \beta_x)$ aus den Zugehörigkeitsgraden je Merkmal μ_i sowie einem zugeordneten Gewicht δ_i , welches die Trennbarkeit der beiden Klassen für dieses Merkmal ausdrückt, durch gewichtete Mittelbildung bestimmt (Gleichung 1). Im Anschluss wird jeder Punkt anhand eines Schwellwertes klassifiziert. Alle notwendigen Klassifikationsparameter werden automatisch aus Trainingsgebieten abgeleitet. Der Klassifizierung folgen mehrere Kontroll- und Verbesserungsschritte, die als Plausibilisierung zusammengefasst sind. Das Ziel dieser Plausibilisierung ist eine innere Kontrolle des Ergebnisses, um Fehlklassifikationen zu lokalisieren und zu beseitigen (siehe Abb. 3).

³ Der Algorithmus ist eine Weiterentwicklung eines vorläufigen Ansatzes von BRZANK und HEIPKE (2006).

$$\mu(H_x, I_x, P_x, \beta_x) = \frac{[\delta_H \mu_H(H_x) + \delta_I(\beta_x) \mu_I(I_x, \beta_x) + \delta_P(\beta_x) \mu_P(P_x, \beta_x)]}{[\delta_H + \delta_I(\beta_x) + \delta_P(\beta_x)]} \quad (1)$$

mit

| | |
|--|--|
| H_x, I_x, P_x, β_x | Höhe, Intensität, 2D-Punktdichte und Inzidenzwinkel des Punktes x |
| $\delta_H, \delta_I(\beta_x), \delta_P(\beta_x)$ | Gewicht der Merkmale Höhe, Intensität und 2D-Punktdichte des Punktes x |
| $\mu_H(H_x), \mu_I(I_x, \beta_x), \mu_P(P_x, \beta_x)$ | Zugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“ je Merkmal des Punktes x |
| $\mu(H_x, I_x, P_x, \beta_x)$ | Gesamtzugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“ des Punktes x |
| β_x | Inzidenzwinkel des einfallenden Laserpulses und der Flächennormalen bzgl. des Punkts x (siehe Abbildung 4 und Kapitel 2.1.3) |

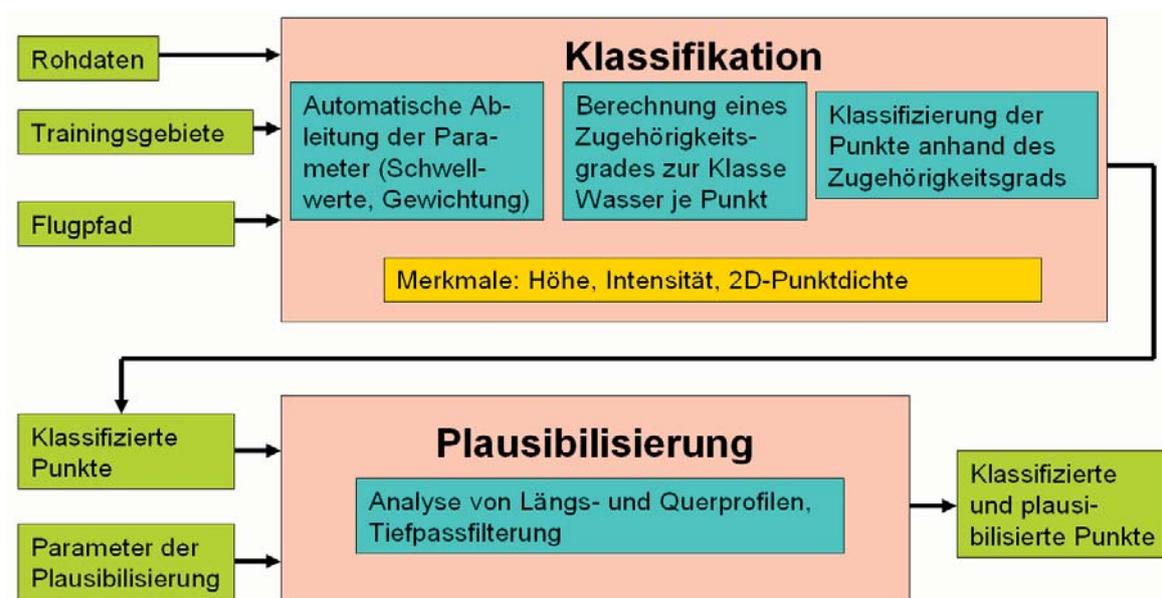


Abb. 3: Flussdiagramm des Algorithmus zur Klassifikation von Wasserflächen aus Laserscannerdaten

2.1.1 Klassifikationsmerkmale

Höhe: Die Höhe H gibt den senkrechten Abstand des jeweiligen Laserpunktes von der Bezugsfläche an. Der zugehörige Wert lässt sich direkt aus den Punktkoordinaten entnehmen. Das Wasser hat generell das Bestreben, einen Zustand geringst möglicher potentieller Energie E_{pot} anzunehmen. Solange dieser Zustand nicht erreicht ist und das Wasser die Möglichkeit besitzt, die eigene potentielle Energie zu verringern, erfolgt ein Fließprozess. Ansonsten befindet es sich in Ruhe (bei Vernachlässigung anderer äußerer Kräfte wie z.B. Wind). Im Falle einer ruhigen, geschlossenen Wasserfläche weisen alle umliegenden Wattpunkte mindestens die gleiche, im Allgemeinen jedoch eine größere Höhe auf. Deshalb kann man prinzipiell davon ausgehen, dass mit steigender Höhe die Wahrscheinlichkeit für das Auftre-

ten von Wasser sinkt. Da die Fuzzy-Logik in der Klassifikation verwendet wird, sinkt mit steigender Höhe der Zugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“ entsprechend.

Intensität: Die Intensität I ist eine physikalische Größe, welche der Leistung pro Fläche (KUCHLING, 2004) beziehungsweise pro Raumwinkel (JANZA, 1975) entspricht. Sie wird auch als Energiefluss bezeichnet. Für jeden Laserpunkt wird ein Intensitätswert aufgezeichnet, der angibt, wie stark das empfangene Echo für den jeweiligen Laserpuls ausgefallen ist. Im Allgemeinen geben die Laserscannerhersteller keine Auskunft, wie dieser Wert genau bestimmt wird (BRZANK, 2008). Generell ist er jedoch direkt proportional zur empfangenen Leistung P_E . Diese ist unter anderem abhängig vom Reflexionsgrad ρ der Geländeoberfläche. Mit steigendem Wassergehalt sinkt ρ und demzufolge auch P_E und I . Im Allgemeinen ist also der Intensitätswert im Wattbereich höher. Deshalb steigt mit sinkender Intensität der Zugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“.

2D-Punktdichte: Die 2D-Punktdichte P ist ein Verhältnis, welches aus der Anzahl aller Punkte innerhalb eines vorgegebenen Polygons, das im Schwerpunkt des analysierten Punktes x gelagert ist, geteilt durch dessen Größe, gebildet wird. Es beschreibt die Vollständigkeit der in der direkten Nachbarschaft des Punktes x durchgeführten Messungen. Für die Bestimmung werden zusätzlich die benachbarten Laserscanzeilen herangezogen.

Die jeweilige Messung kann nur dann erfolgreich durchgeführt werden, wenn das empfangene Echo eine eindeutig vom Rauschen differenzierbare Leistung P_E aufweist. Da P_E mit steigendem Wassergehalt sinkt, verringert sich generell auch die Anzahl der erfolgreichen Messungen und nachfolgend die 2D-Punktdichte. Deshalb steigt mit sinkender 2D-Punktdichte der Zugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“. Im Allgemeinen sind die 2D-Punktdichte und die Intensität positiv korreliert, da mit Abnahme der Signalstärke die Echodetektion schwieriger wird.

2.1.2 Gewichtung der Merkmale

Hinsichtlich der Interaktion des Wassers mit der Geländeoberfläche sowie der physikalischen Beschreibung des Messvorgangs besteht für jedes verwendete Merkmal theoretisch ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der jeweiligen Ausprägung zwischen der Klasse „Wasser“ und „Watt“. Bei der Analyse realer Daten zeigt sich jedoch häufig, dass sich die Merkmalswerte kaum oder gar nicht signifikant voneinander unterscheiden. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, besitzt jedes Merkmal i ein eigenes Gewicht δ_i , welches ausdrückt, wie gut sich die Punkte anhand des zugehörigen Merkmals unterscheiden lassen. Das Gewicht kann den Wertebereich von 0 bis 1 annehmen, wobei ein steigendes Gewicht eine höhere Trennbarkeit bedeutet.

2.1.3 Kalibrierung der Intensität und 2D-Punktdichte

Wie in Kap. 2.1.1 ausgeführt, ist die gemessene Intensität I abhängig von verschiedenen Einflussfaktoren. Aufgrund der Korrelation zwischen Intensität und 2D-Punktdichte besteht zudem ein Zusammenhang zwischen diesen Faktoren und der 2D-Punktdichte. Um die Merkmale in der Klassifikation zu verwenden, müssen sie entweder vorher kalibriert oder die systematischen Verzerrungen innerhalb des Algorithmus berücksichtigt werden. Die Ka-

librierung ist jedoch nur für klassenunabhängige Einflussfaktoren wie die Entfernung R möglich. Das Reflexionsverhalten ist aber für die Klassen „Watt“ und „Wasser“ unterschiedlich. Für diese Kalibrierung wird somit ein Modell der Reflexion der jeweils beleuchteten Oberfläche benötigt. Dieses kann theoretisch aus den Trainingsgebieten durch empirische Modellfunktionen in Abhängigkeit vom Inzidenzwinkel β (siehe Abb. 4) ermittelt werden. Praktisch ist diese Methode aber nicht verwendbar, da für die Kalibrierung die Klassenzugehörigkeit des jeweiligen Punktes bekannt sein muss. Diese Zugehörigkeit stellt aber das eigentliche Ziel der Klassifikation dar und ist somit vorher nicht verfügbar.

Deshalb wird die systematische Verzerrung der Intensität und der 2D-Punktdichte, die insbesondere auf die gerichtete Reflexion der Watt- und Wasserflächen zurückzuführen ist, innerhalb der Klassifikation berücksichtigt. Die Änderung der Merkmalswerte kann für die Klassen „Wasser“ sowie „Watt“ generell unterschiedlich stark erfolgen. Das heißt, dass die Trennbarkeit der beiden Klassen für die Merkmale Intensität sowie 2D-Punktdichte abhängig von β ist. Da die Gewichte $\delta_1(\beta)$ und $\delta_p(\beta)$ diese Trennbarkeit widerspiegeln, sind sie ebenfalls von β abhängig.

Um den Inzidenzwinkel für den jeweiligen Punkt zu bestimmen, muss aus der aktuellen Position der Flugplattform und den Punktkoordinaten die Abstrahlrichtung bestimmt werden. Der Inzidenzwinkel entspricht dem Winkel zwischen der Abstrahlrichtung und der Flächennormale des Punktes. Die Bestimmung der Flächennormalen ist in der Regel aufwändig sowie rauschanfällig, da aus den umliegenden Punkten die Geländeoberfläche modelliert werden muss. Geht man vereinfachend davon aus, dass die Oberfläche horizontal verläuft, so stimmt β mit dem Abstrahlwinkel α überein, der dem eingeschlossenen Winkel aus Nadir und Abstrahlrichtung entspricht (siehe Abb. 4).

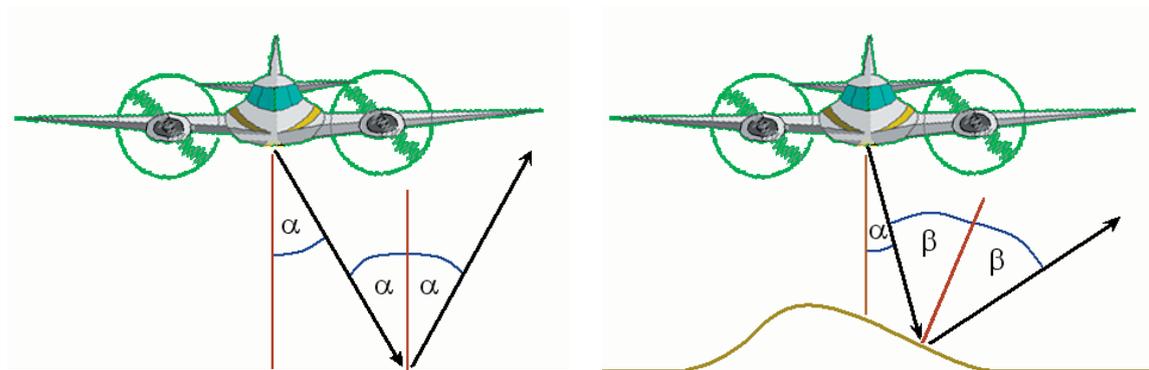


Abb. 4: Abstrahlwinkel α (links), Inzidenzwinkel β (rechts)

2.1.4 Automatische Ableitung der Klassifikationsparameter aus den Trainingsgebieten

Für die Durchführung der Klassifikation werden mehrere Parameter benötigt, die automatisch aus den Trainingsgebieten abgeleitet werden. Diese sind in Tab. 1 aufgeführt:

Tab. 1: Klassifikationsparameter und ihre Funktion

| Klassifikationsparameter | Funktion |
|--|---|
| konstante Höhenschwellwerte T_{H_low} und T_{H_high} | Transformation des jeweiligen Höhenwerts in einen unscharfen Zugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“ |
| je zwei variable Intensitäts- sowie 2D-Punktdichteschwellwerte $T_{I_low}(\beta)$, $T_{I_high}(\beta)$, $T_{P_low}(\beta)$ und $T_{P_high}(\beta)$ | Transformation des jeweiligen Intensitäts- bzw. 2D-Punktdichteschwellwerts in einen unscharfen Zugehörigkeitsgrad zur Klasse „Wasser“ |
| konstantes Gewicht des Merkmals Höhe δ_H | Beschreibt, wie gut sich die Klassen anhand des Merkmals Höhe unterscheiden lassen |
| variables Gewicht für die Merkmale Intensität $\delta_I(\beta)$ und 2D-Punktdichte $\delta_P(\beta)$ | Beschreibt, wie gut sich die Klassen anhand des Merkmals Intensität bzw. 2D-Punktdichte unterscheiden lassen |
| Wasserschwellwert T_{Wasser} | Klassifikation des jeweiligen Punktes anhand seines Gesamtzugehörigkeitsgrades zur Klasse „Wasser“ |

Die Schwellwerte T_{H_low} , T_{H_high} , $T_{I_low}(\beta)$, $T_{I_high}(\beta)$, $T_{P_low}(\beta)$ und $T_{P_high}(\beta)$ teilen den Definitionsbereich jeweils in drei Regionen. Unterhalb des unteren bzw. oberhalb des oberen Schwellwertes liegt der Zugehörigkeitsgrad entweder bei 0 oder bei 1. Dies ist abhängig von der Korrelation zwischen dem jeweiligen Merkmal und dem Auftreten von Wasser. Der Zwischenbereich beschreibt die Zone des Übergangs von Wasser zu Watt. Als Zugehörigkeitsfunktion kann prinzipiell jede Funktion verwendet werden, die diesen Übergang hinreichend genau beschreibt. Der hier verwendete Algorithmus nutzt ausschließlich lineare Funktionen. Deren Parameter ergeben sich durch das Festlegen der Schwellwerte je Merkmal.

Zu Beginn werden die Laserpunkte innerhalb der definierten Trainingsgebiete ermittelt. Dazu bestimmt man für alle Punkte die jeweiligen Werte der Merkmale sowie den zugehörigen Inzidenzwinkel. Für die Berechnung der Klassifikationsparameter werden der Mittelwert und die Standardabweichung je Merkmal und Klasse benötigt. Diese können aus den Merkmalswerten bestimmt werden. Dabei ist zu beachten, dass der Mittelwert je Klasse für die Höhe konstant, für die Intensität sowie die 2D-Punktdichte jedoch abhängig vom Inzidenzwinkel ist. Diese Abhängigkeit kann mit Hilfe einer Funktion $f(\beta)$ ausgedrückt werden, die gegebenenfalls weitere Einflussparameter berücksichtigt. Dabei ist prinzipiell jede Funktion geeignet, die – möglichst physikalisch begründbar – diese Beziehung modellieren kann und wenig Parameter besitzt. Da für die Klassen „Wasser“ und „Watt“ jeweils keine theoretische Beschreibung des Reflexionsverhaltens vorliegt, wurde eine Funktion mit vier Parametern (Gleichung 2) empirisch gewählt, die z.B. von KRAUS und PFEIFER (1998) als Gewichtsfunktion bei der linearen Prädiktion mit robuster Filterung verwendet wurde. Sie zeichnet sich durch eine geringe Parameteranzahl und ein monoton sinkendes Verhalten bei wachsendem β aus. Durch vermittelnde Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Qua-

drate werden anschließend die Parameter der Funktion aus den Wertepaaren (Inzidenzwinkel, Merkmalswert) berechnet.

$$f(\beta) = \frac{c}{(1 + (a\beta)^b)} + d \quad (2)$$

mit:

- | | |
|--------------------------------|----------------------------------|
| a Halbwertsbreite | b Neigung an der Halbwertsbreite |
| c Maßstabsfaktor in z-Richtung | d Verschiebung in z-Richtung |

Der Mittelwert des jeweiligen Merkmals pro Klasse entspricht dem Wert aus der ausgleichenden Funktion durch Einsetzen des zugehörigen Inzidenzwinkels. Die Verbesserungen einer ausgleichenden Funktion werden verwendet, um die jeweils zugehörige Standardabweichung zu bestimmen (siehe Abb. 5).

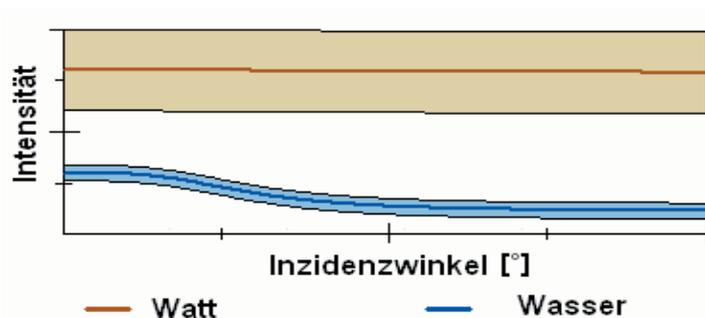


Abb. 5: Ausgleichende Funktionen des Merkmals Intensität mit Standardabweichung der Verbesserungen für die Klassen „Wasser“ und „Watt“

Die Schwellwerte entsprechen dem jeweiligen Mittelwert der Merkmale für die einzelnen Klassen. So ist T_{H_low} gleich der mittleren Höhe des Trainingsgebietes der Klasse „Wasser“ und T_{H_high} identisch zum Mittelwert der Höhe der Klasse „Watt“. Die Schwellwerte $T_{I_low}(\beta)$, $T_{I_high}(\beta)$, $T_{P_low}(\beta)$ und $T_{P_high}(\beta)$ sind abhängig von β . Durch Einsetzen in die jeweils zugehörige ausgleichende Funktion werden die Schwellwerte ermittelt.

Die Gewichte δ_H , $\delta_I(\beta_x)$ und $\delta_P(\beta_x)$ drücken die Trennbarkeit der beiden Klassen für das jeweilige Merkmal aus. Diese Trennbarkeit zwischen Wasser und Watt kann durch die Analyse der zugehörigen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen je Merkmal ermittelt werden. Dabei geht man von folgender Annahme aus: Je stärker sich beide Verteilungen überlappen, umso weniger ist dieses Merkmal für die Klassifizierung geeignet, da die Trennbarkeit abnimmt. Folglich muss das daraus abgeleitete Gewicht sinken.

Als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion wird die Gauss-Verteilung angesetzt. Im Folgenden wird das Signifikanzniveau für die Annahme bestimmt, dass die beiden Verteilungen voneinander verschieden sind (also $\mu_{i_Wasser} \neq \mu_{i_Watt}$). Dazu führt man einen t-Test durch (NIEMEIER, 2002). Die Testgröße t_f ergibt sich zu:

$$t_f = \frac{\bar{x}_{Watt} - \bar{x}_{Wasser}}{\sqrt{s_{Watt}^2 + s_{Wasser}^2}} = \frac{d}{s_d} \quad (3)$$

mit:

- \bar{x}_{Watt} Mittelwert des jeweiligen Merkmals der Punkte im Trainingsgebiet der Klasse „Watt“

- \bar{x}_{Wasser} Mittelwert des jeweiligen Merkmals der Punkte im Trainingsgebiet der Klasse „Wasser“
 s_{Watt} Standardabweichung des jeweiligen Merkmals der Punkte im Trainingsgebiet der Klasse „Watt“
 s_{Wasser} Standardabweichung des jeweiligen Merkmals der Punkte im Trainingsgebiet der Klasse „Wasser“

Aus der Standardnormalverteilungsfunktion $F(x)$ wird anschließend das zugehörige Quantil (Freiheitsgrade f , Signifikanzniveau γ^4) bestimmt, welches mit der Testgröße identisch ist. Aus dem Signifikanzniveau γ wird das Gewicht abgeleitet. Dabei gilt folgende Festlegung: Beträgt das Signifikanzniveau der Trennbarkeit 0,5 oder weniger, so ist eine Unterscheidung nicht möglich. Das Gewicht ist folglich 0. Beträgt γ mehr als 0,5, so kann zwischen beiden Verteilungen unterschieden werden. Mit steigendem Signifikanzniveau wächst auch das Gewicht. Bei einem γ von 1 beträgt das Gewicht 1. Die Berechnung des Gewichtes im Bereich von 0,5 bis 1 erfolgt durch lineare Interpolation.

Für das Merkmal Höhe werden die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (Abb. 6) aus Mittelwert und Standardabweichung der Höhen im Trainingsgebiet „Wasser“ bzw. „Watt“ gebildet. Die Parameter für die Größen Intensität und 2D-Punktdichte ergeben sich aus der jeweils zugehörigen ausgleichenden Funktion (siehe Gleichung 2).

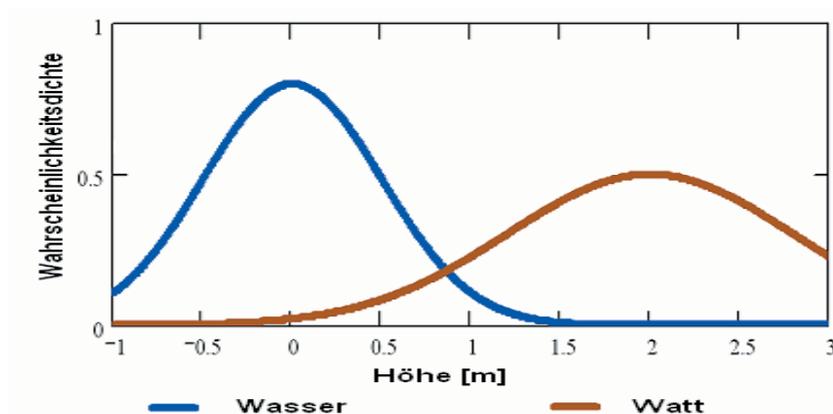


Abb. 6: Ableitung des Gewichtes anhand des Signifikanzniveaus der Trennbarkeit beider Verteilungen

Nachdem die Gewichte ermittelt sind, kann für jeden Punkt der Gesamtzugehörigkeitsgrad bestimmt werden. Aus der Summe aller Punkte der Trainingsgebiete „Watt“ bzw. „Wasser“ berechnet man nachfolgend den zugehörigen Mittelwert sowie die Standardabweichung. Daraus können – unter der Annahme des Vorliegens der Normalverteilung – die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des Gesamtzugehörigkeitsgrades der Klassen „Wasser“ und „Watt“ gebildet werden. Der Wasserschwelwert entspricht dem Zugehörigkeitsgrad, für den die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Wasser und Watt identisch ist. Der Schnittpunkt beider Verteilungen markiert diesen Punkt (siehe Abb. 7).

⁴ Das Signifikanzniveau γ ergibt sich durch Subtraktion der Irrtumswahrscheinlichkeit α von dem Wert 1.

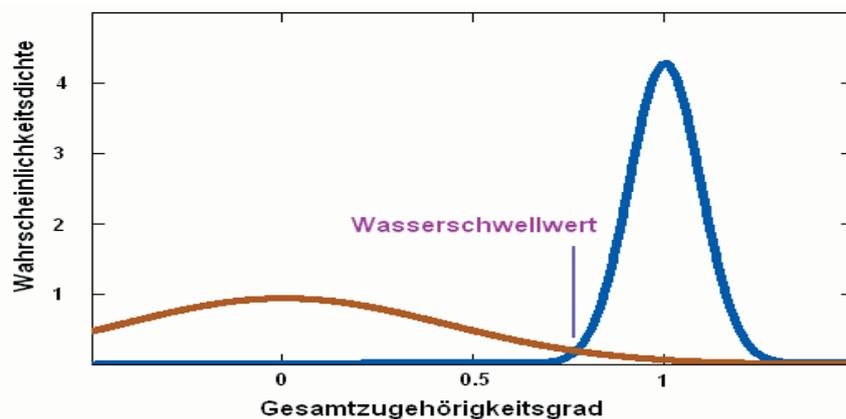


Abb. 7: Ableitung des Klassifizierungsschwellwertes aus den Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des Gesamtzugehörigkeitsgrades

Bemerkung: Generell kann ein Zugehörigkeitsgrad nur im Bereich von 0 bis 1 liegen. Deshalb werden die Schwellwerte T_{H_low} , T_{H_high} , $T_{I_low}(\beta)$, $T_{I_high}(\beta)$, $T_{P_low}(\beta)$ und $T_{P_high}(\beta)$ ermittelt, um die jeweilige Zugehörigkeitsfunktion zu begrenzen. Alle Punkte mit einem Merkmalswert außerhalb dieses Bereiches erhalten im Falle der Klassifikation je nach Lage einen Zugehörigkeitsgrad von 0 oder 1. Im Rahmen der Bestimmung der Klassifikationsparameter jedoch wird die Zugehörigkeitsfunktion nicht durch die beiden korrespondierenden Schwellwerte begrenzt. Somit ergeben sich außerhalb dieses Bereiches Zugehörigkeitsgrade größer 1 bzw. kleiner 0. Dies ist notwendig, um Mittelwert und Standardabweichung der beiden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des Gesamtzugehörigkeitsgrades korrekt zu bestimmen.

2.1.5 Verwendung mehrerer Trainingssets

Je nach Größe des Untersuchungsgebietes kann die Länge eines Flugstreifens mehrere Kilometer betragen. Dabei können sich die Ausprägungen der Merkmale Höhe, Intensität sowie 2D-Punktdichte aufgrund der Variabilität des Wasserstandes, der chemischen Zusammensetzung des Watts, der Einflüsse äußerer Kräfte (z.B. Wind) ändern. Somit sinkt mit steigendem Abstand der zu klassifizierenden Punkte von den Trainingsgebieten deren Repräsentativität für beide Klassen, wodurch sich ebenfalls die Klassifikationsgüte verschlechtert. Deshalb besteht die Möglichkeit, mehrere so genannte Trainingssets über den Flugstreifen zu verteilen. Jedes Trainingsset besteht jeweils aus mindestens einem Trainingsgebiet pro Klasse und ist repräsentativ für die nähere Umgebung.

Prinzipiell ergeben sich verschiedene mögliche Varianten der Verkettung, wobei zwei Ansätze favorisiert werden. Im ersten Fall verwendet man nur das jeweils am dichtesten gelegene Trainingsset für die Klassifizierung. Nach Bestimmung der Klassifikationsparameter für alle definierten Trainingssets ermittelt man für jede Laserzeile das jeweils nächste Trainingsset und nutzt dieses für die Klassifikation. Im zweiten Fall verwendet man jeweils die beiden dichtesten Trainingssets, sofern die aktuelle Zeile zwischen diesen liegt. Dabei wird die Zeile jeweils mit beiden Sets klassifiziert. Dadurch erhält man für jeden Punkt zwei Zugehörigkeitsgrade zur Klasse „Wasser“. Diese werden nun mit Hilfe des jeweiligen Abstandes zu ihren Trainingssets gewichtet gemittelt. Analog erfolgt die Ableitung des Klassifizierungs-

schwelliges. Im Folgenden kann jeder Punkt der Zeile mit Hilfe des abstandsgewichteten Schwellwertes klassifiziert werden. Für den Anfangs- sowie Endbereich des Flugstreifens wird nur je ein Set verwendet.

2.1.6 Plausibilisierung

Als Ergebnis der Klassifizierung liegt für jeden Punkt eine Entscheidung hinsichtlich der Klassenzugehörigkeit vor. In der Regel ist die Zuordnung (z.B. abhängig von der Auswahl der Trainingsgebiete sowie Rauschen in den Daten) jedoch nicht zu 100 % richtig. Um möglichst viele Fehlklassifizierungen aufzudecken und zu korrigieren, wurden mehrere Arbeitsschritte unter dem Oberbegriff „Plausibilisierung“ zusammengefasst.

Zuerst wird in jeder Scanzeile überprüft, ob ein Klassenwechsel auftritt. Werden ein oder mehrere Wechsel festgestellt, so wird überprüft, ob der jeweilige Wasserpunkt eine geringere Höhe aufweist als der benachbarte Wattpunkt. Ist dies nicht der Fall, tritt ein Klassifizierungswiderspruch auf. Dann werden die jeweiligen Gesamtzugehörigkeitsgrade zur Klasse „Wasser“ beider Punkte gemittelt und eine einheitliche Klassifikation für beide Punkte anhand des Mittelwertes durchgeführt. Das gleiche Prinzip wird ebenfalls für Profile in Flugrichtung angewendet. Im Gegensatz zu der jeweiligen Laserscanzeile liegen aber a priori keine Profile in Flugachsenrichtung vor. Diese müssen erst gebildet werden.

Da es sich bei dem vorgeschlagenen Algorithmus um eine Einzelpunktklassifizierung handelt, treten besonders an Klassengrenzen sowie in schwierig zu klassifizierenden Bereichen wie bei Wellen oder stark durchfeuchteten Wattflächen vermehrt kleinräumige Wechsel der Zuordnung auf. Um ein homogenes Ergebnis zu erhalten, werden deshalb abschließend hochfrequente Klassenwechsel durch eine Tiefpassfilterung unterdrückt.

2.2 Extraktion von Strukturlinien

Der im Rahmen der Arbeit vorgestellte Algorithmus zur Extraktion von Strukturlinien basiert auf einer Weiterentwicklung der Flächenrekonstruktionsansätze von BRZANK (2001) und BRIESE (2004). Die Methode geht von der Annahme aus, dass Strukturlinien in den Watten immer paarweise vorkommen. So treten an Prielen, Vorlandgräben und Dünen je Seite jeweils eine Böschungsober- und eine Böschungsunterkante auf.

Die Geländeoberfläche wird in der Umgebung paarweise auftretender Strukturlinien durch die Tangens hyperbolicus Funktion stückweise rekonstruiert. Je nach Verlauf des Linienpaares wird entweder eine geradlinige oder eine kreisförmige Realisierung verwendet. Aus den Parametern der jeweiligen Funktion können anschließend für jede Recheneinheit je ein Punkt auf jeder Linie entnommen werden. Durch eine Splineinterpolation verknüpft man anschließend die Punkte zu vollständigen Linien. Der Algorithmus benötigt eine 2D-Näherung der Mittelachse zwischen den zugehörigen Strukturlinien, die durch Anwendung von aus der Bildverarbeitung bekannten Kantenoperatoren gewonnen wird (siehe Abb. 8).

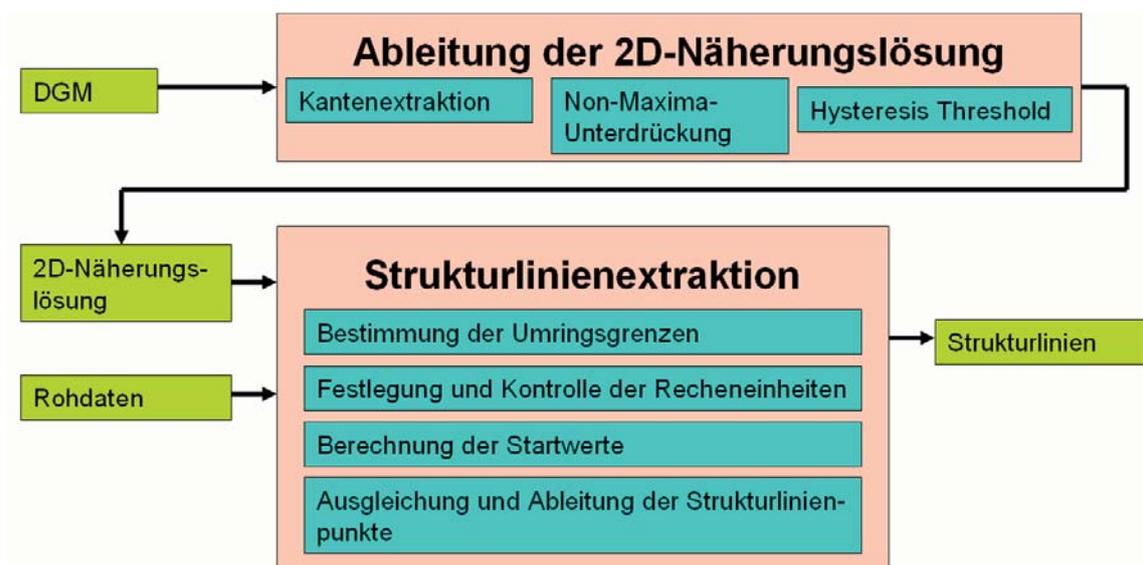


Abb. 8: Flussdiagramm des Algorithmus zur Extraktion von Strukturlinien

2.2.1 1D-tanh-Funktion und Ableitung der Strukturlinienpunkte

Im Wattbereich treten die Strukturlinien wie bereits erwähnt generell paarweise auf. Das Profil einer Grabenseite lässt sich im Allgemeinen hinreichend genau durch eine Tangens hyperbolicus Funktion⁵ approximieren (Gl. 4 und Abb. 9).

$$z(v) = s \tanh(f(v + p)) + k \quad (4)$$

mit:

- s Skalierungsfaktor – entspricht dem zweifachen Höhenunterschied zwischen dem oberen und dem unteren Plateau
- f bestimmt den Abstand der Krümmungsmaxima im Grundriss – je größer der Wert umso geringer der Abstand
- p Verschiebung der tanh-Funktion in horizontaler Richtung (quer zur Bruchkantenrichtung)
- k Verschiebung der tanh-Funktion in vertikaler Richtung

⁵ NALWA und BINFORD (1986) nutzten diese Funktion, um in digitalen Bildern lineare Kantenstrukturen zu detektieren.

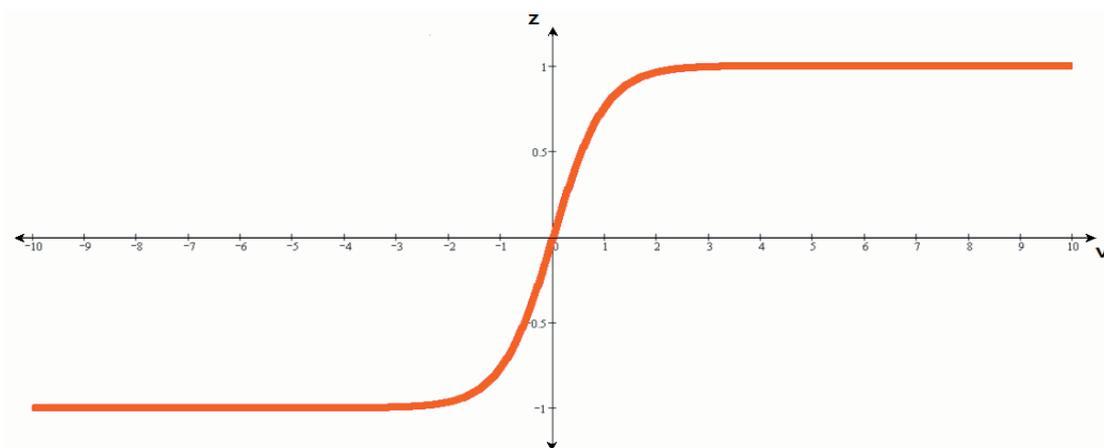


Abb. 9: 1D-Tangens hyperbolicus Funktion (Die Strukturlinien laufen senkrecht zur tanh-Funktion aus der Darstellungsebene heraus)

Sofern die vier Parameter der Funktion bekannt sind, kann je ein Strukturlinienpunkt für jede Linie ermittelt werden. Der Nutzer muss dafür a priori ein Kantenmodell vorgeben. Zur Auswahl stehen: Formlinienpaar, Rampenkante und Stufenkante (Abb. 10 links, mitte, rechts). Das Formlinienpaar entspricht zwei korrespondierenden Formlinien, die durch Bestimmung der Krümmungsmaxima ermittelt werden. Die Krümmung eines Wertes $z(v)$ ergibt sich aus der Gleichung 5.

$$\kappa(v) = \left| \frac{z''(v)}{(1 + z'(v)^2)^{3/2}} \right| \quad (5)$$

Die Rampenkante wird durch die Konstruktion dreier Geraden gebildet. Dazu werden horizontale Linien durch die Plateaus h_u sowie h_o gelegt und mit einer Geraden durch den Wendepunkt mit dem Anstieg der Tangens hyperbolicus Funktion in diesem Punkt geschnitten. Sofern die Stufenkante angesetzt wird, schneidet man die beiden Plateaus mit einer senkrechten Linie durch den Wendepunkt.



Abb. 10: Ableitung der Strukturlinienpunkte: Formlinienpaar (links), Rampenkante (mitte), Stufenkante (rechts)

2.2.2 2D-Flächentypen der tanh-Funktion

Im Kap. 2.2.1 wurde die Ableitung von Strukturlinienpunkten in Abhängigkeit vom angesetzten Kantenmodell nur eindimensional betrachtet. Da jedoch nicht nur Punkte, sondern Linien extrahiert werden sollen, muss das Modell um eine Dimension erweitert werden. Diesbezüglich sind die Richtung des Linienpaares sowie ihre Richtungsänderung zu berücksichtigen. Dabei sollen identische 1D-tanh-Profile entsprechend der Ausbreitungsrichtung aneinander gereiht werden.

Der Ansatz stützt sich auf zwei 2D-Flächentypen, wobei sowohl gerade als auch gekrümmte Linienstücke approximiert werden können. Die Basisversion (Abb. 11) ist geeignet, um gerade Strukturen zu rekonstruieren. Sie besitzt sechs Parameter (Gleichungen 6a–c). Neben den vier Parametern s , f , k und p sind zusätzlich der Verdrehungswinkel α sowie der Anstiegsfaktor t integriert. α entspricht der Verdrehung zwischen dem übergeordneten (x, y) -Koordinatensystem $KS(x, y)$ sowie dem strukturlinienbezogenen (u, v) -Koordinatensystem $KS(u, v)$. Der Parameter t modelliert einen linearen Anstieg der Höhe in Ausbreitungsrichtung. Die aneinander gereihten Profile setzen sich in eine feste Azimutrichtung fort. Aufeinanderfolgende Strukturpunkte einer Linie bilden dabei eine Gerade.

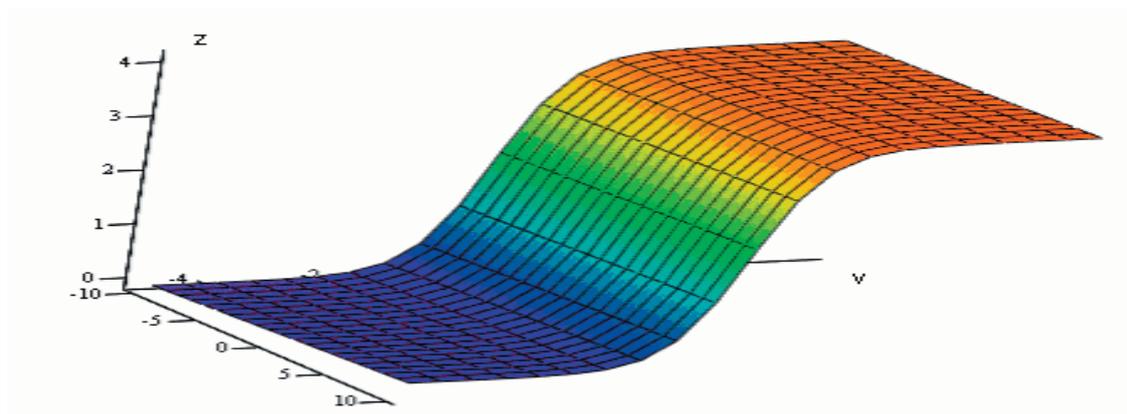


Abb. 11: Tangens hyperbolicus Funktion (2D-Basis)

$$z(u, v) = s \tanh(f(v + p)) + k + tu \quad (6a)$$

$$u = \cos(\alpha)x + \sin(\alpha)y \quad (6b)$$

$$v = -\sin(\alpha)x + \cos(\alpha)y \quad (6c)$$

mit:

α Verdrehungswinkel zwischen dem Referenz-KS (x, y) und dem lokalen KS (u, v)

t Anstiegsfaktor der Kante in Strukturlinienrichtung

Der zweite Flächentyp (Abb. 12) ist geeignet, um einen im Grundriss gekrümmten Verlauf der Strukturlinien zu approximieren. Die 1D-Profile setzen sich dabei nicht linear sondern kreisförmig fort. Die abgeleiteten Strukturlinienlösungen für jede einzelne Recheneinheit entsprechen den Teilstücken zweier konzentrischer Kreise.

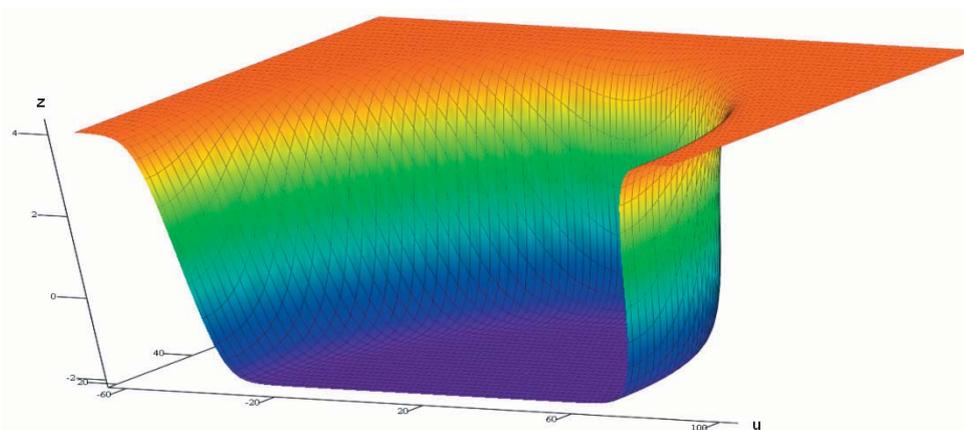


Abb. 12: Tangens hyperbolicus Funktion (2D-Kreis)

Die Kreis-Variante besitzt sieben Parameter (Gl. 7a–c). Analog zur Basisversion bleiben die Parameter s , f , k und t bestehen. Hinzu kommen die Variablen u_{shift} , v_{shift} sowie der Radius. Die Parameter u_{shift} und v_{shift} markieren den Mittelpunkt des Kreises im (u,v) -Koordinatensystem. Der Radius bestimmt die Stärke der Richtungsänderung, welche die beiden Strukturlinien erfahren. Die Variable α ist im Gegensatz zur Basisversion keine Unbekannte. Sie ergibt sich aus den Punkten innerhalb der jeweiligen Recheneinheit (siehe Kap. 2.2.6). Der Parameter p entfällt.

$$z(u,v) = s \tanh[f(\sqrt{(u-u_{\text{shift}})^2 + (v-v_{\text{shift}})^2} - \text{Radius})] + k + \text{acos} \left[\frac{u-u_{\text{shift}}}{\sqrt{(u-u_{\text{shift}})^2 + (v-v_{\text{shift}})^2}} \right] t \quad (7a)$$

$$u = \cos(\alpha) x + \sin(\alpha) y \quad (7b)$$

$$v = \sin(\alpha) x + \cos(\alpha) y \quad (7c)$$

2.2.3 Ableitung der Näherungslösung

Um die Parameter der jeweiligen Flächenfunktion zu bestimmen, wird prinzipiell eine 2D-Approximation beider zusammengehörender Strukturlinien benötigt. Zum einen können so die Näherungswerte der gesuchten Parameter bestimmt werden, die Voraussetzung für die durchzuführende Ausgleichung einer nicht linearen Flächenfunktion nach der Methode der kleinsten Quadrate sind. Zum anderen müssen zur Berechnung der Unbekannten die verwendeten Laserpunkte auf eine definierte Strukturlinienumgebung begrenzt werden (siehe Kap. 2.2.4).

Die Approximationen liegen im Allgemeinen a priori nicht vor, sondern müssen aus den Laserdaten abgeleitet werden. Dafür verwendet man gewöhnlich Operatoren der Bildverarbeitung. Die Bestimmung der Näherungen gestaltet sich jedoch häufig schwierig, wenn Operatoren der zweiten Ableitung eingesetzt werden. Aufgrund der höheren Rauschanfälligkeit sinken Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Extraktion. Größere Schwierigkeiten bereitet zusätzlich die Verknüpfung korrespondierender Strukturlinien zu einem Paar. Die Bestimmung scheitert gänzlich, wenn der Abstand des Strukturlinienpaares (z.B. bei schmalen Priel) im Vergleich zur Fensterbreite des Operators sehr klein ist.

Grundsätzlich lassen sich die Näherungswerte aller Parameter mit Ausnahme von f^6 auch aus der Mittellinie zwischen beiden zusammenhängenden Strukturlinien ableiten. Diese Linie entspricht der Verbindung aller Punkte, die in den 1D-Profilen maximale Neigung aufweisen, und kann durch Kantenoperatoren der 1. Ableitung bestimmt werden. Diese Näherung lässt sich genauer und zuverlässiger ermitteln. Zudem entfällt die Verknüpfung korrespondierender Strukturlinien.

Deshalb werden für diesen Ansatz die Mittellinien verwendet. Durch den Einsatz von Standardkantenoperatoren der 1. Ableitung (z.B. Canny) wird ein Kantenbild erzeugt. Anschließend erfolgt eine Ausdünnung möglicher Kantenpunkte durch eine Non-Maxima-Unterdrückung. Nachfolgend werden durch die Methode Hysteresis Threshold im Kantenbild Pixelketten gebildet, die der Mittelachsennäherung entsprechen.

⁶ Das Verfahren zur Ableitung des Parameters f anhand der Mittellinie sowie der umgebenden Punkte wird in BRZANK (2008) beschrieben.

2.2.4 Bestimmung der Umringgrenzen

Berechnet man Flächenfunktionen aus gemessenen Stützpunkten, so dürfen nur die Punkte verwendet werden, die in der direkten Umgebung der gesuchten Strukturlinien liegen. Je weiter ein Punkt von der Mittelachse entfernt ist, umso wahrscheinlicher ist es, dass dieser Punkt nicht mit der verwendeten Flächenfunktion harmoniert.

Es bestehen mehrere Möglichkeiten zur Bestimmung der Umringgrenzen. So können sie anhand des unterlegten DGM manuell digitalisiert werden. Auf diese Weise ist eine sinnvolle Begrenzung in Abhängigkeit der näheren Umgebung gegeben. Leider ist die manuelle Erfassung zeitaufwändig und auf die Dauer unbefriedigend. Die Umringgrenzen können ebenfalls automatisch generiert werden. Dazu wird ein Korridor um die jeweilige Mittelachse mit einer fixen Breite gebildet. Diese Variante ist schnell, kann jedoch bei bestimmten Situationen (sich stark ändernde Grabenbreite, weitere Strukturlinienpaare in unmittelbarer Umgebung) zu fehlerhaften Umringen führen. Deshalb ist eine visuelle Kontrolle des Polygons durch einen menschlichen Operateur sinnvoll.

2.2.5 Festlegung und Kontrolle der Recheneinheiten

Der Nutzer definiert die Länge einer Recheneinheit sowie die Überlappungsrate. Da die Gesamtlänge der Näherungslösung bekannt ist, können die eingegebenen Parameter so (geringfügig) modifiziert werden, dass der Anfang der ersten Recheneinheit mit dem Startpunkt und das Ende der letzten Recheneinheit mit dem Endpunkt der Mittelachse übereinstimmen. Nun können jeder Recheneinheit die jeweiligen Laserpunkte hinzugefügt werden.

Anschließend wird für jedes Teilstück die geeignete Flächenfunktion ausgewählt. Dazu untersucht man den Verlauf der Mittelachse in der Recheneinheit. Sofern die Mittelachse keine Richtungsänderung erfährt, wird die Basisversion verwendet. Ändert die Mittelachse jedoch ihre Richtung stärker als ein vorgegebener Schwellwert, so wird die Kreisversion herangezogen. Treten innerhalb einer Recheneinheit sowohl positive als auch negative Richtungsänderungen auf, so wird die Berechnung der Recheneinheit nicht durchgeführt, wenn die Änderungen jeweils größer als der Schwellwert sind. Andernfalls wird die Summe aus allen Richtungsänderungen gebildet und diese mit dem Schwellwert verglichen. Nachfolgend wird kontrolliert, ob jede Recheneinheit genügend Punkte für eine Berechnung beinhaltet und wie diese verteilt sind. Dazu gibt der Nutzer die Mindestanzahl an Punkten je Seite bezüglich der Mittelachse vor. Nur wenn die Punktzahl je Recheneinheit ausreichend hoch ist und für beide Seiten – insbesondere in den Bereichen außerhalb beider Strukturlinien – genügend Punkte vorhanden sind, werden für die Recheneinheit die Parameter bestimmt.

2.2.6 Berechnung der Startwerte, Ausgleichung und Ableitung der Strukturlinienpunkte

Nachdem die Recheneinheiten festgelegt und kontrolliert sind, müssen die Startwerte für die Unbekannten bestimmt werden. Die Startwerte werden benötigt, um die Beobachtungsgleichungen zu linearisieren. Je nach ausgewähltem Flächentyp unterscheidet sich der Berechnungsvorgang. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in BRZANK (2008).

Für jede Recheneinheit werden innerhalb einer vermittelnden Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate die gesuchten Parameter bestimmt. Weiterhin können zu-

sätzliche Pseudobeobachtungen eingeführt werden, um die Ausgleichung zu stützen. Sie beziehen sich jeweils auf einen ermittelten Startwert.

Nachfolgend werden die ermittelten Parameter s und f der Recheneinheiten plausibilisiert. Sofern Vorwissen über den minimalen und maximalen Abstand der gesuchten Strukturlinien bekannt ist, können unter Angabe des Strukturlinientyps die berechneten Lösungen der Recheneinheiten auf Einhaltung dieser Forderung kontrolliert werden. Gleiches gilt für den minimalen und maximalen Höhenunterschied zwischen den Linien. Im Zuge dieser Kontrolle der Ergebnisse werden unplausible Lösungen entfernt. Anschließend werden die Strukturlinien berechnet. Dazu wird in jeder Recheneinheit eine Ebene definiert. Diese verläuft durch den Schwerpunkt der Laserpunkte im Teilstück und steht senkrecht auf den beiden Lösungsgeraden (Basisversion) bzw. den konzentrischen Kreisen (Kreisversion). Auf diese Weise erhält man je einen Punkt der Böschungsoberkante und Böschungunterkante. In der ersten und letzten Recheneinheit werden die beiden Geraden/Kreise zusätzlich noch mit einer senkrechten Ebene durch den Startpunkt beziehungsweise Endpunkt der Mittelachse geschnitten. Durch eine Besselsplineinterpolation (siehe KRAUS, 2000) können nachfolgend alle Punkte beider Strukturlinien zu geschlossenen Linienzügen verknüpft werden.

3. Praktische Tests

3.1 Klassifikation der Wasserflächen

Das hier dargestellte Beispiel umfasst eine Wattfläche im Bereich der Außenelbe, die im Rahmen der Befliegung „Friedrichskoog 2005“ mit einem Scanner vom Typ Falcon II erfasst wurde. Es enthält drei große Wasserflächen. Am nördlichen und südlichen Ende befindet sich jeweils eine weitläufige Senke. Zudem verläuft im mittleren Bereich ein Priel, der in die südliche Senke mündet (siehe Abb. 13 links). Der aufgenommene Bereich hat eine Länge von 3.300 m sowie eine Breite von 310 m (siehe Abb. 13 rechts) und enthält 3.334.785 Punkte. Deutlich lässt sich das Abfallen der Intensitätswerte von der Streifenmitte zu den Randbe-

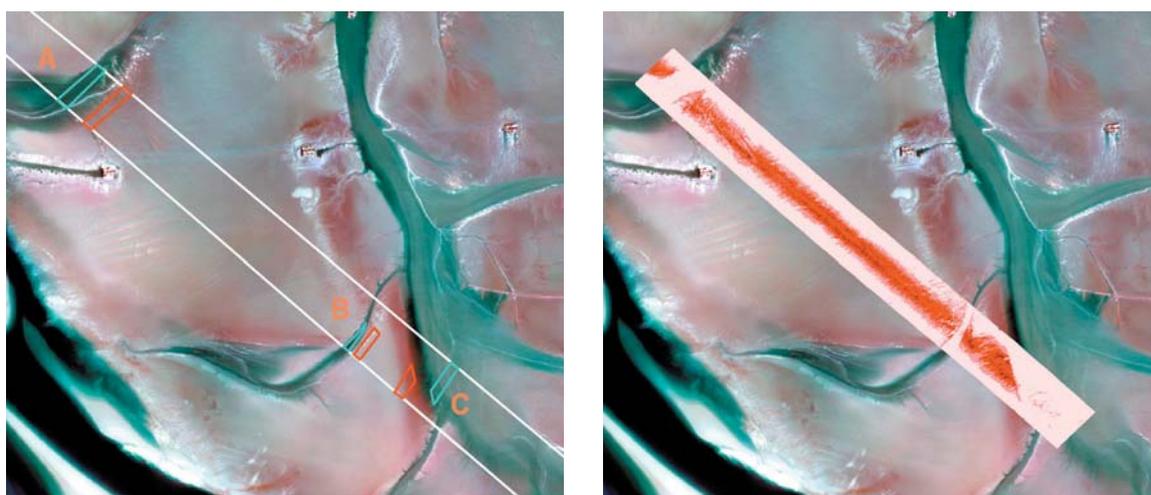


Abb. 13: Orthophoto der Befliegung „Friedrichskoog 2005“ mit der Begrenzung des prozessierten Flugstreifens (weiß) sowie der festgelegten Trainingsets A, B und C: Wasser – hellblau, Watt – rot (links); zu klassifizierende Punktwolke intensitäts-codiert: hell – geringe Intensität, dunkel – hohe Intensität (rechts)

reichen auch bei gleich bleibender Klassenzugehörigkeit erkennen. Ferner offenbart sich, dass sich die Intensitätswerte beider Klassen in der Nähe der Mittelachse unterscheiden, im Randbereich aber nahezu identisch sind. Innerhalb der Wasserflächen sind keine Punktlücken festzustellen. Das Scanmuster ist wie im Wattbereich vollständig besetzt.

Da das Beispiel für die Befliegung „Friedrichskoog 2005“ drei voneinander unabhängige Wasserbereiche enthält, wurde für jedes ein eigenes Trainingset festgelegt (siehe Abb. 13 links). Ihre Auswertung ergab, dass die signifikante Unterscheidbarkeit zwischen beiden Klassen anhand der Intensität mit steigendem Auslenkwinkel sinkt (siehe Abb. 14 links). Während in der Streifenmitte eine hohe Trennbarkeit über alle Trainingsets hinweg gegeben ist, kann die Intensität für Auslenkwinkel im Bereich von ca. 4 Grad und größer nicht mehr verwendet werden. Da das Scanmuster sowohl im Wasser- als auch Wattbereich vollständig besetzt ist, lässt sich für alle drei Trainingsets über den gesamten Winkelbereich keine signifikante Unterscheidung anhand der 2D-Punktdichte feststellen (siehe Abb. 14 rechts). Die Klassifikation stützt sich somit nur auf die Höhe sowie im Mittelbereich des Flugstreifens zusätzlich auf die Intensität. Diese Tatsache spiegelt sich im Klassifikationsergebnis wieder

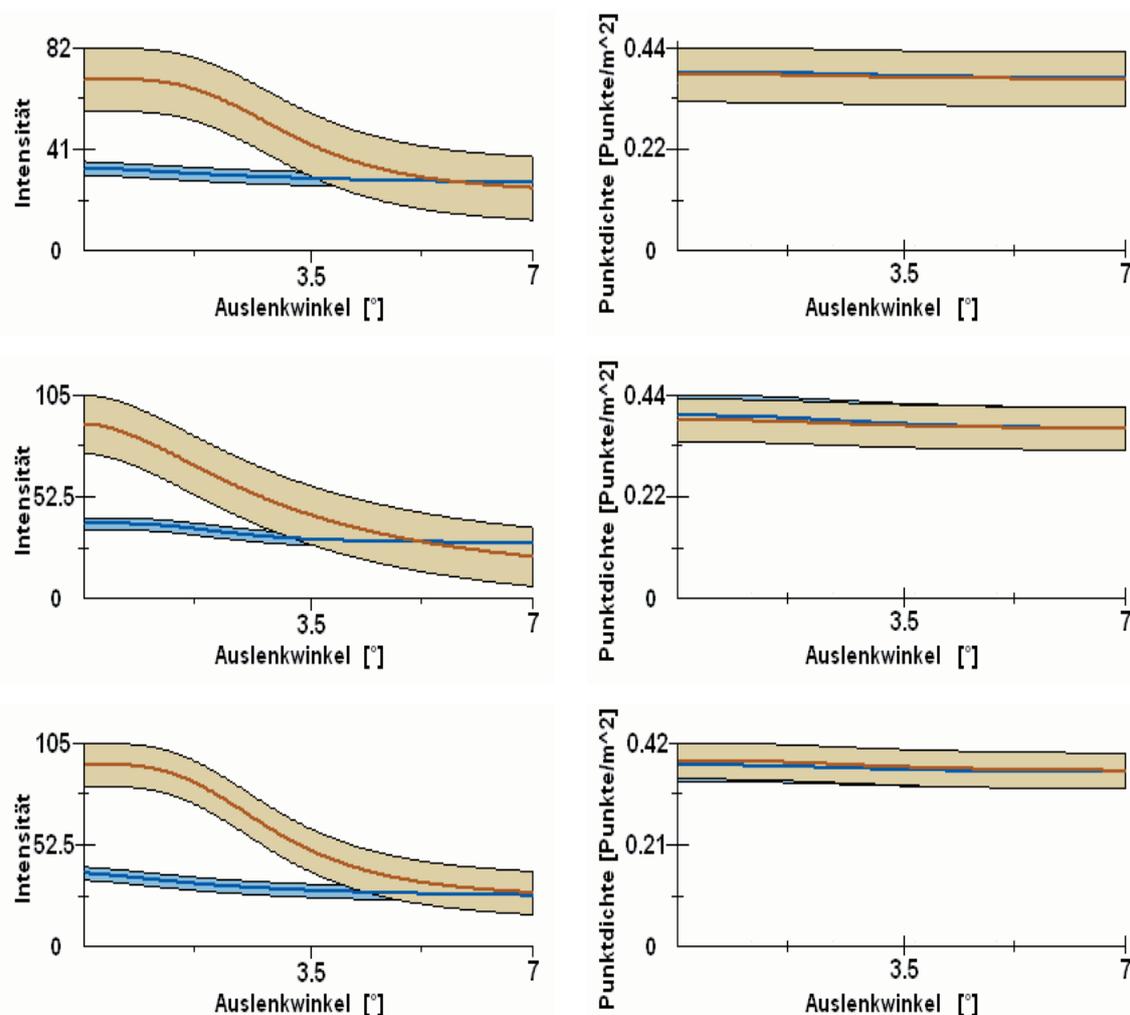


Abb. 14: Befliegung „Friedrichskoog 2005“ – geschätzte Abhängigkeit der Intensität (links) und der 2D-Punktdichte (rechts) vom Auslenkwinkel mit zugehöriger Standardabweichung der Verbesserungen: Watt – braun/ocker, Wasser – dunkelblau/hellblau, Trainingset A – oben, Trainingset B – mitte, Trainingset C – unten

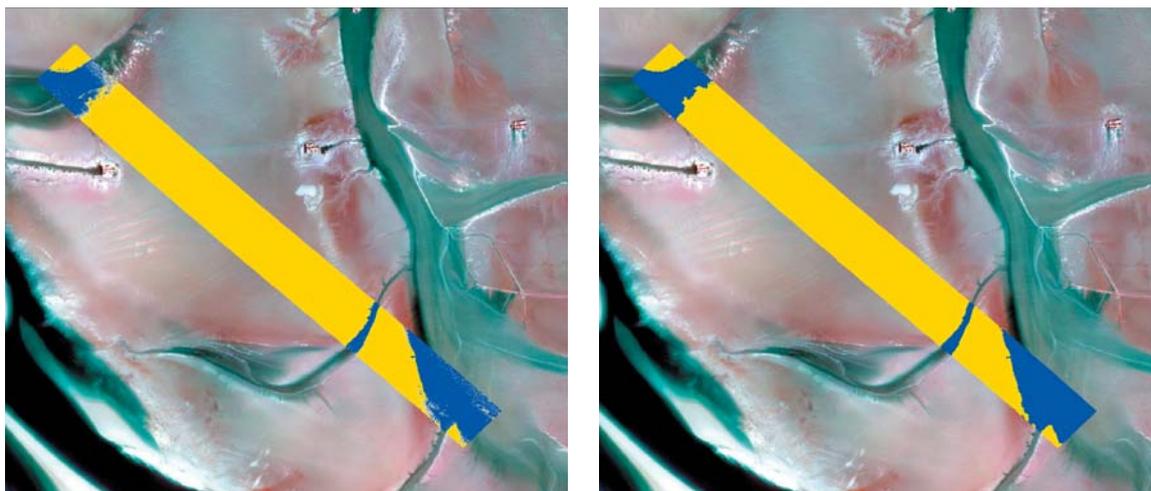


Abb. 15: Befliegung „Friedrichskoog 2005“ – Ergebnis der Klassifikation (links) und Ergebnis der Plausibilisierung (rechts). Die gelbe Farbe kennzeichnet Punkte, die als Watt klassifiziert wurden. Die blaue Farbe kennzeichnet Punkte, die als Wasser klassifiziert wurden



Abb. 16: Befliegung „Friedrichskoog 2005“ – nördlicher Abschnitt des Flugstreifens – Ergebnis der Klassifikation (links) und Ergebnis der Plausibilisierung (rechts). Die gelbe Farbe kennzeichnet Punkte, die als Watt klassifiziert wurden. Die blaue Farbe kennzeichnet Punkte, die als Wasser klassifiziert wurden

(siehe Abb. 15 links und Abb. 16 links). Während die Punkte in dem mittleren Bereich des Flugstreifens wenige Fehler aufweisen, treten in den östlichen Randbereichen der beiden Senken vermehrt Fehlklassifikationen auf. Diese ergeben sich durch das Auftreten von Höhenunterschieden innerhalb der Wasserfläche. Weitere Fehlklassifikationen sind im Bereich schäumender Wellen zu beobachten. Diese reflektieren das Signal stärker und zeichnen sich deshalb durch größere Intensitätswerte als umgebende Wasserbereiche aus. Sie werden, sofern das Merkmal Intensität innerhalb der jeweiligen Klassifikation signifikant ist, oftmals fehlerhaft als Watt klassifiziert. Eine solche Fehlklassifikation tritt am südlichen Ufer der Wasserfläche der nördlichen Senke auf (Abb. 16 links). Aufgrund des Einflusses der Intensität auf die Klassifikation in der Streifenmitte wird der schäumende Wellenbereich als Watt klassifiziert, während die gleiche Welle im westlichen Randbereich als Wasser erkannt wird. Durch die nachfolgend ausgeführte Plausibilisierung können jedoch die Wasserflächen homogen extrahiert werden (siehe Abb. 15 rechts und Abb. 16 rechts).

3.2 Extraktion von Strukturlinien

Das zweite Beispiel umfasst einen Ausschnitt eines Priels im Bereich der Außenweser nahe Bremerhaven (siehe Abb. 17 links). Er erstreckt sich vom Hafen des Seebades Wremen bis zum Mündungsbereich der Weser. Der umgebende Bereich verläuft eben und besteht aus Schlickwatt. Die Böschungen sind aufgrund ihrer im Vergleich zur Höhenänderung großen horizontalen Ausdehnung eher schwach ausgeprägt. Die Höhe fällt von der Umgebung zum Prielbett langsam ab. Es treten keine abrupten Neigungswechsel auf.

Der Priel wurde innerhalb einer Laserscanbefliegung der Firma Toposys im Zeitraum August/September des Jahres 2004 erfasst. Zum Einsatz kam ebenfalls ein Scanner des Typs Falcon II. Die Punktdichte der Laserscannerdaten beträgt ca. 4 Punkte/m². Zudem wurden zeitgleich Farbinfrarotaufnahmen der abgetasteten Oberfläche mit einer digitalen Zeilenkamera erhoben. Da der Priel während der Befliegung teilweise noch Wasser führte, wurden im Anschluss Fächerecholotdaten mit einer Dichte von mehr als 40 Punkten pro m² erfasst. Für die Kontrolle der extrahierten Strukturlinien stehen GPS-RTK-Messungen vom 08.09.2004 über eine Länge von knapp 500 m (siehe Abb. 17 rechts) zur Verfügung. Da das Prielbett sowie Teile der Böschung durch Wasser bedeckt waren, konnte die Böschungsunterkante nicht gemessen werden. Stattdessen wurde die Wasserliniengrenze bestimmt.

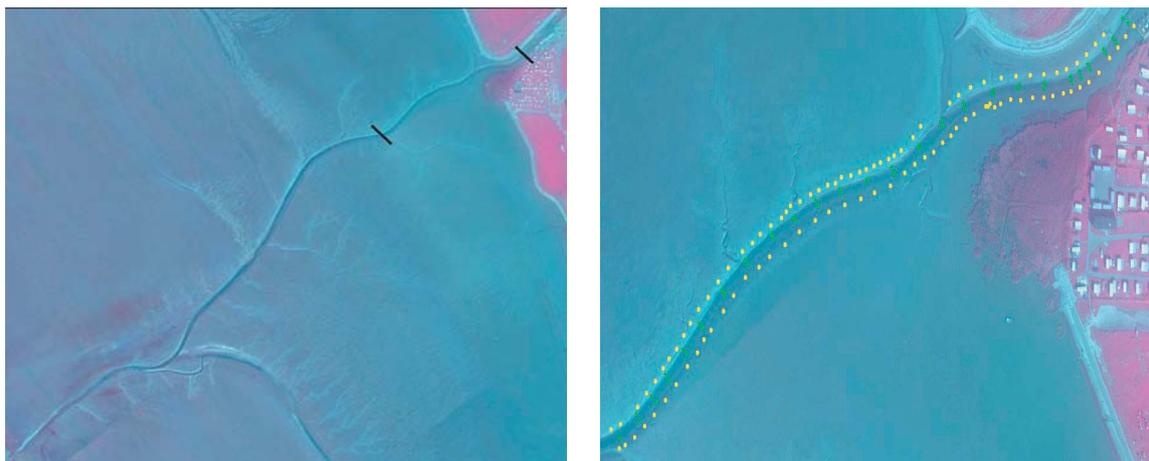


Abb. 17: Befliegung „Außenweser 2004“ – Orthophoto des Priels in der Nähe des Hafens „Wremen“ (links), GPS-RTK-Referenzmessungen eines Teils des Priels (rechts). Die gelben Punkte entsprechen der Böschungsoberkante. Die grünen Punkte kennzeichnen die Wasserliniengrenze zum Zeitpunkt der Erhebung der Kontrollmessungen

Zum Zeitpunkt der Befliegung enthielt der Priel eine zusammenhängende Wasserfläche. Um Einflüsse auf die Qualität der Extraktion durch eine fehlerhafte Klassifikation des Wassers auszuschließen, erfolgte die Trennung der Laserdaten durch Digitalisierung der Wasserflächen aus den zeitgleich erhobenen Orthophotos. Da die Fächerecholotdaten im Vergleich zu der Laserscanneraufnahme eine sehr hohe Punktdichte aufweisen, wurde im Vorfeld ein DGM aus den Echolotpunkten mit der Rasterweite 0,5 m berechnet und anstelle der originalen Punkte wurden die Gitterelemente im Wasserbereich verwendet. Aus dem vereinigten DGM wurden die Mittelachsen des Priels durch Bildverarbeitung abgeleitet, die Teilstücke verbunden und die Umringe bestimmt (siehe Abb. 18). Nachfolgend wurde für jede Rechen- einheit kontrolliert, ob genügend Punkte der vereinigten Laser-Echolot-Punkt- wolke für die Parameterschätzung zur Verfügung stehen, sowie die vermittelnde Ausgleichung nach der



Abb. 18: Befliegung „Außenweser 2004“ – Näherungslösung sowie Umringspolygon für die nördliche (links) und südliche Böschung (rechts). Die Mittelachsen sind in weiß und die Umringe in schwarz dargestellt

Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt. Aus diesen Recheneinheiten wurden dann die Strukturlinienpunkte mit den Krümmungmaxima (siehe Gl. 5) abgeleitet (siehe Abb. 19). Nachfolgend wurden auftretende Lücken durch eine Besselsplineinterpolation geschlossen (siehe Abb. 20).

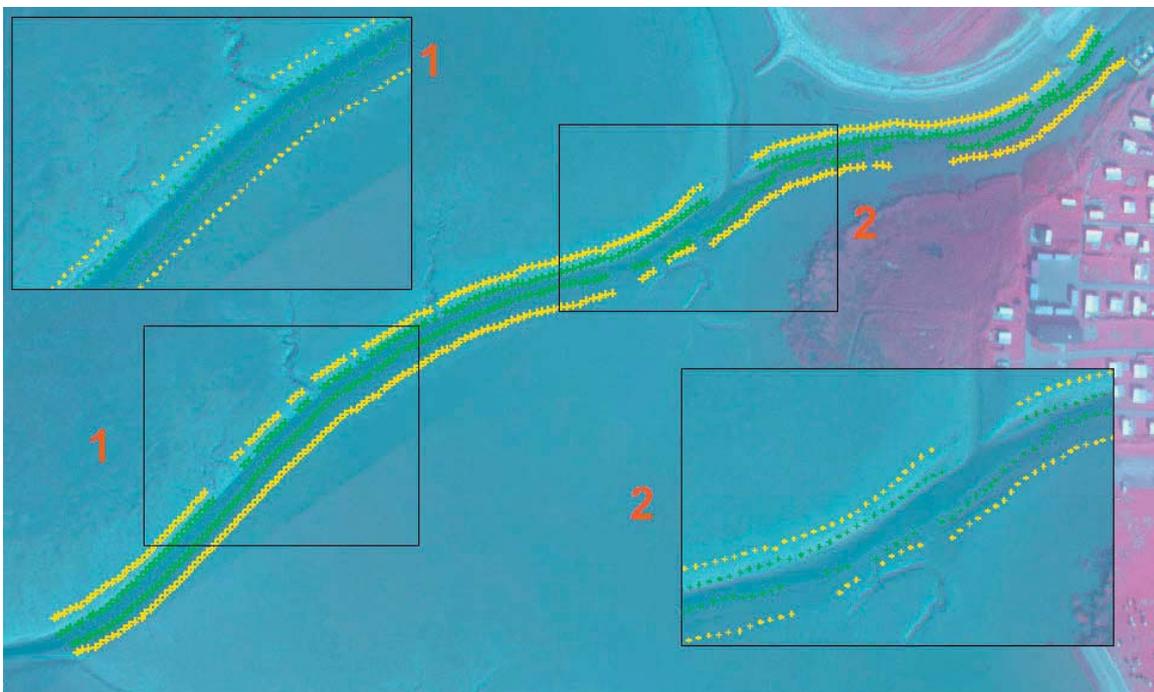


Abb. 19: Befliegung „Außenweser 2004“ – extrahierte Formlinienpunkte. Die Böschungsunterkanten sind in grün und die Böschungsoberkanten in gelb dargestellt

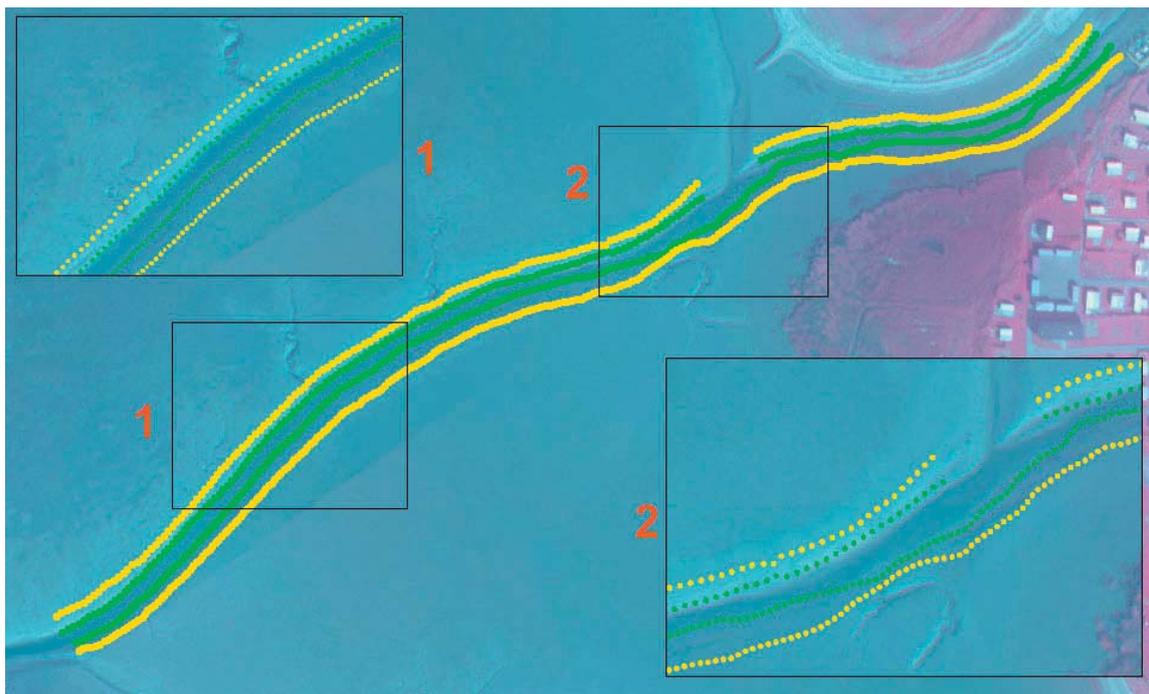


Abb. 20: Befliegung „Außenweser 2004“ – interpolierte Strukturlinienpunkte. Die Böschungsunterkanten sind in grün und die Böschungsoberkanten in gelb dargestellt

3.3 Ableitung eines Digitalen Geländemodells

In der Außenweser wurde ein 2×2 km großes repräsentatives Gebiet ausgewählt, um anhand des neuen Arbeitsablaufes ein DGM abzuleiten. Es ist durch ein zusammenhängendes System mehrerer Priele, deren Haupttrichtung von Nord nach Süd verläuft (siehe Abb. 21 links), geprägt. Ferner enthält das Beispiel mehrere östlich und westlich angrenzende Wattbereiche, die zum Zeitpunkt des Tideniedrigwassers trocken fallen. Während insbesondere die Seitenarme nur geringe Tiefen von 1 bis 2 m bezüglich der angrenzenden Watten besitzen, befindet sich im Zentrum des Hauptprieles eine Senke, die ca. 10 m unterhalb der umgebenden Wattflächen liegt. Der Bereich wurde im Rahmen der jährlichen Befliegung im August und September 2005 durch die Firma Toposys gescannt. Insgesamt zwölf parallel zueinander liegende Flugstreifen (siehe Abb. 21 links) enthalten Laserpunkte des Untersuchungsgebietes. Die Anzahl der zu klassifizierenden Punkte beläuft sich auf ca. 16,6 Millionen. Zeitnah zur Befliegung erhob das Wasser- und Schifffahrtsamt Bremerhaven Fächercholotdaten dieses Gebietes (siehe Abb. 21 rechts). Dabei wurde darauf geachtet, dass insbesondere der sicher überflutete Bereich durch die hydrographischen Vermessungen abgedeckt wird. In den Randbereichen steigt hingegen der Abstand zwischen den einzelnen Spuren auf bis zu 100 m, so dass größere Lücken verbleiben. Insgesamt umfasst der Echolotdatensatz ca. 20,4 Millionen gemessene Punkte.

Im Rahmen der Klassifikation in die Gruppen „Wasser“ und „Watt“ anhand des neuen Algorithmus erfolgte eine Analyse der Laserpunkte. Dabei zeigte sich, dass analog zum Beispiel aus der Befliegung „Friedrichskoog 2005“ (siehe Kap. 3.1) das Scanmuster auch im Bereich der Wasserflächen nahezu keine Lücken enthält (siehe Abb. 22 links). Die Intensitätswerte weisen für viele Streifen die typische Abhängigkeit vom Auslenkwinkel auf. Diese

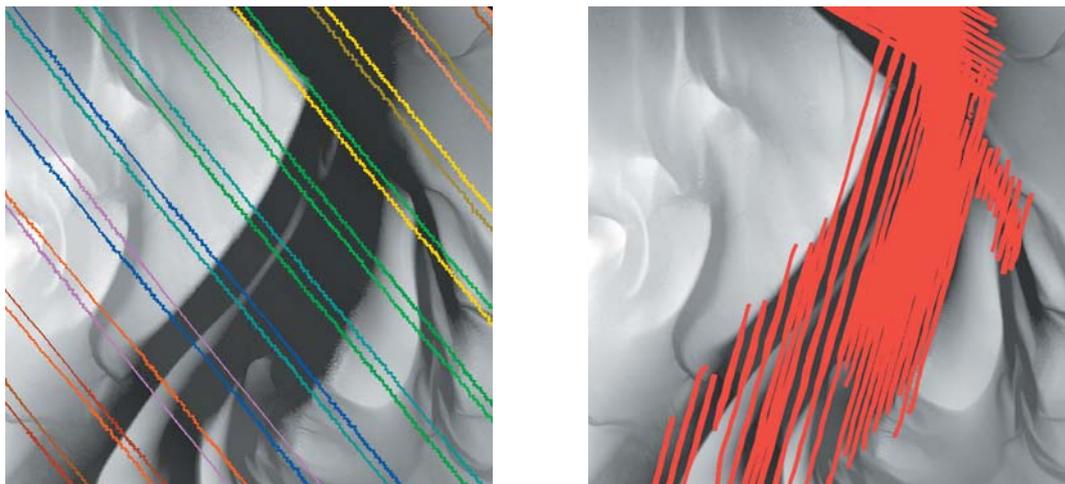


Abb. 21: Befliegung „Außenweser 2005“ – Digitales Oberflächenmodell des Untersuchungsgebietes aus den Laserscannerdaten mit Umringen der Flugstreifen (links), gemessene Echolotpunkte (rechts): Umringe – grün und braun, Echolotpunkte – rot

ist für Wasser und Watt unterschiedlich ausgeprägt. Im Bereich des Hauptpriel sind die Intensitätswerte starken hochfrequenten Schwankungen unterworfen. Diese werden hauptsächlich durch auftretende Wellen verursacht. Zu den Rändern des jeweiligen Streifens nehmen die Intensitätswerte langsam ab. Auf den trockenen Wattflächen finden sich in der Streifenmitte hohe Intensitätswerte, die sehr stark zu den Seiten abfallen. Dadurch sind die durchschnittlichen Intensitäten im Übergangsbereich zwischen Streifenmitte und -rand im Watt oft geringer als im Wasser. Ferner sind hochfrequente Streuungen im Watt kaum anzutreffen. Die nassen Wattflächen wiederum weisen in der Streifenmitte signifikant geringere Intensitätswerte auf. Diese liegen teilweise deutlich unterhalb der Werte auf dem Wasser.

Danach erfolgte die Festlegung der Trainingsgebiete. Für alle Streifen wurde jeweils ein Set digitalisiert. Dabei wurden das Watttrainingsgebiet jeweils im prielnahen nassen Sandbereich und das Wassertrainingsgebiet im Hauptpriell definiert. Die visuelle Analyse konnte

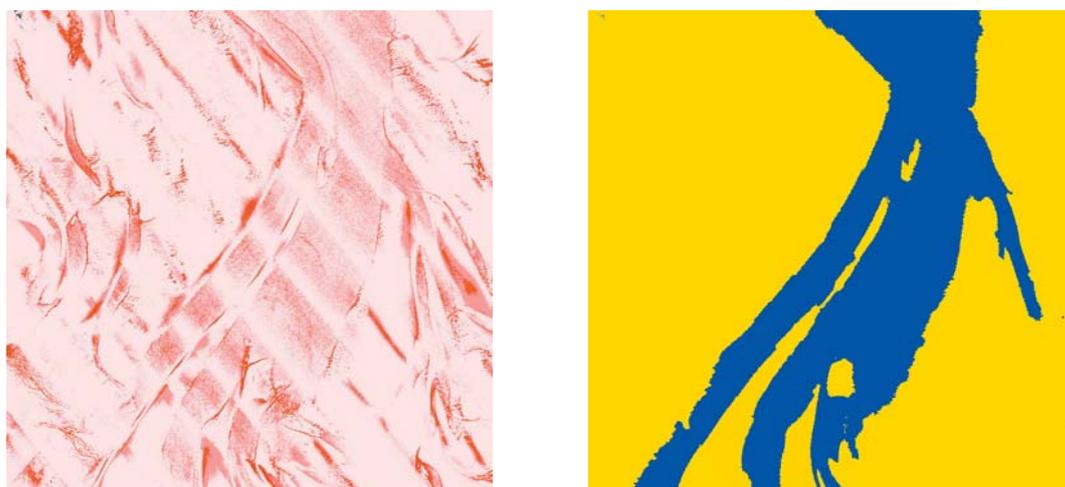


Abb. 22: Befliegung „Außenweser 2005“ – zu klassifizierende Laserpunktswolke intensitäts-codiert: hell – geringe Intensität, dunkel – hohe Intensität (links), Ergebnis der Plausibilisierung (rechts): Wasser – blau, Watt – gelb

innerhalb der Auswertung der Trainingsgebiete bestätigt werden. Für alle Streifen können die Klassen signifikant anhand des Merkmals Höhe unterschieden werden. Hingegen ermöglicht das Merkmal 2D-Punktdichte keine Trennung. Das Merkmal Intensität ist nur teilweise nutzbar. Im Randbereich unterscheiden sich die Verteilungen für Wasser und Watt generell kaum. In der Streifenmitte ist für mehrere Streifen die Intensität signifikant. Für andere Streifen konnte über den gesamten Winkelbereich keine Trennbarkeit anhand der Intensität festgestellt werden.

Basierend auf der Auswertung der Trainingsgebiete wurden nachfolgend die Klassifikation sowie die Plausibilisierung der Streifen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 22 rechts farblich dargestellt. Von den 16,6 Millionen Laserpunkten wurden ca. 4,7 Millionen als Wasser und 11,9 Millionen als Watt klassifiziert. Teilweise sind an den Grenzen benachbarter Flugstreifen deutliche Klassifikationsunterschiede zu erkennen, die durch den unterschiedlichen Befliegungszeitpunkt und den dadurch unterschiedlichen Wasserstand begründet sind.

Nachdem die Wasserpunkte aus der weiteren Berechnung ausgeschlossen wurden, erfolgte die Fusion der Laserscanner- und Fächerecholotdaten. Da die Lotungen teilweise größere Lücken aufwiesen, wurden diese durch eine Interpolation mittels Delaunay-Triangulierung (SHEWCHUK, 1997) geschlossen. Im Anschluss konnten elf Strukturlinienpaare an den Prielrändern bestimmt werden (siehe Abb. 23). Die Berechnung stützte sich dabei auf das Formlinienmodell.

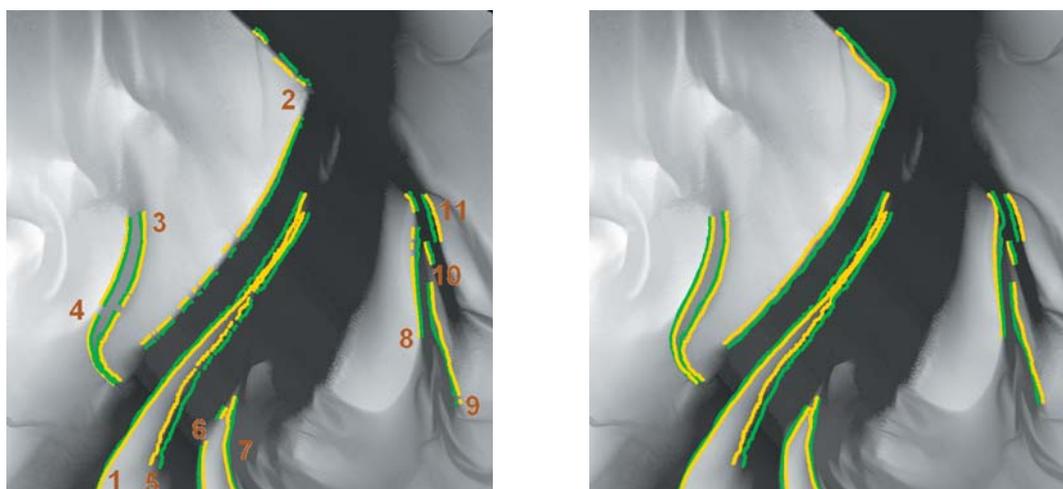


Abb. 23: Befliegung „Außenweser 2005“ – extrahierte Strukturlinienpunkte (links), interpolierte Strukturlinienpunkte (rechts)

Im Anschluss erfolgte die Interpolation des DGM durch Delaunay-Triangulation unter Berücksichtigung der ermittelten Formlinien. Abb. 24 illustriert das berechnete DGM. Deutlich prägen sich die Senke im Hauptpriel sowie die Neigungsänderungen im Bereich der Strukturlinien am Übergang zwischen horizontaler Wattfläche und dem Prielsystem aus.

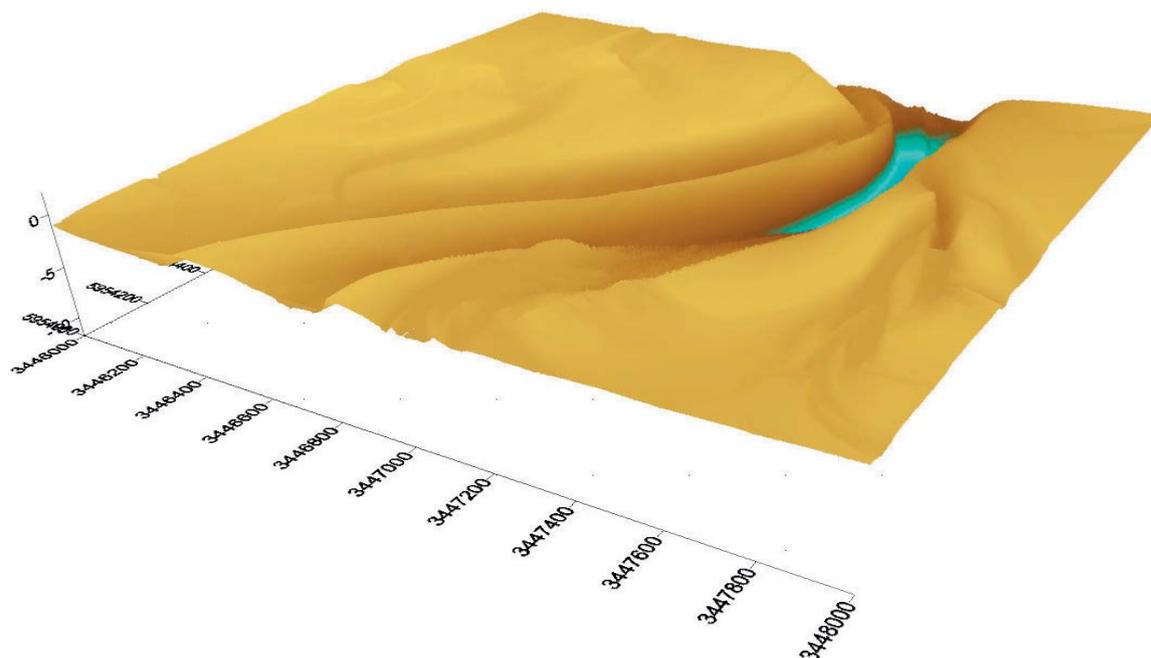


Abb. 24: Befliegung „Außenweser 2005“ – Modelliertes DGM aus Laserscanner- und Fächerecholotdaten sowie extrahierten Strukturlinien in einer 2,5D-Schrägdarstellung – Überhöhungsfaktor: 35

Die Abb. 25 visualisiert das Differenzmodell aus dem Laser-DOM (siehe Abb. 21 links) sowie dem aus den vereinigten Datensatz unter Berücksichtigung der Formlinien abgeleiteten DGM (siehe Abb. 24). Für die Gebiete, die als Watt innerhalb der Laserscannerbefliegung klassifiziert wurden, verschwinden die Differenzen, abgesehen von geringen Abweichungen aufgrund der jeweiligen Interpolation. Signifikante Differenzen treten jedoch für die als Wasser klassifizierten Bereiche auf. Innerhalb der Senke im Hauptpriel wachsen diese auf einen Betrag von bis zu 10 m an. Deutlich zeigt sich an diesem Beispiel, dass die Verwen-

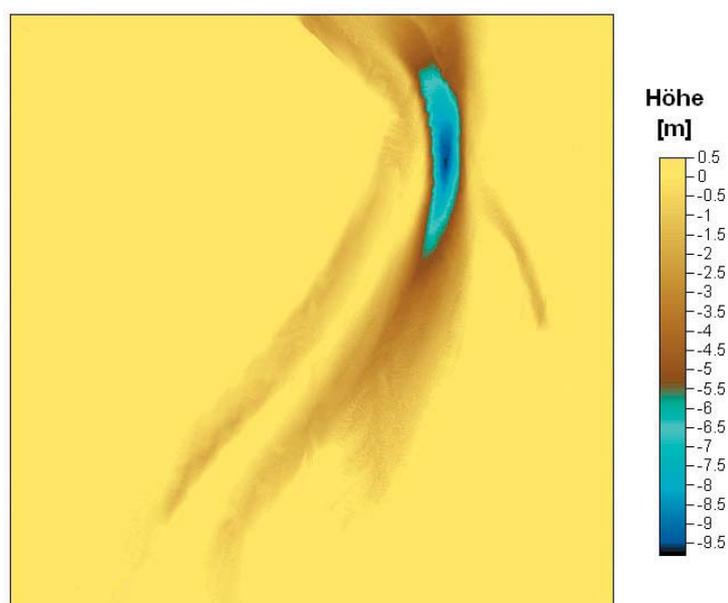


Abb. 25: Befliegung „Außenweser 2005“ – Differenzmodell aus dem Laser-DOM sowie dem modellierten DGM aus Laserscanner- und Fächerecholotdaten sowie extrahierten Strukturlinien

derung des Laser-DOM als DGM in Abhängigkeit von der Wassertiefe grob fehlerhaft sein kann und dadurch die nachfolgende Nutzung sehr stark einschränkt. Deshalb ist die Kombination von Laserscanner- und Echolotdaten in Form des eingeführten Arbeitsflusses durchzuführen, um ein hochgenaues DGM zu erhalten.

4. Bewertung und Ausblick

Der vorgestellte neue Arbeitsfluss ermöglicht die Bestimmung hochgenauer DGM im Wattenmeer aus luftgestützten Laserscannerdaten. Dieser berücksichtigt die spezifischen Eigenschaften der Laserpunktswolke im Wattenmeer (Auftreten von Wasser) sowie die Geländemorphologie (Strukturlinien). Er benötigt zusätzliche Höhendaten für wasserbedeckte Gebiete, die im Allgemeinen durch Echolotungen erhoben werden.

Die Genauigkeit des ermittelten DGM ist insbesondere von der Qualität der Ergebnisse der Teilschritte abhängig, wobei aufgrund des sequenziellen Ablaufes auftretende Fehler in einem Teilbereich negative Auswirkungen auf die nachfolgenden Schritte ausüben. Eine falsche Klassifikation der Laserpunkte in Wasser und Watt (insbesondere die Deklaration von Wasserpunkten als Watt) kann die Genauigkeit des DGM nachhaltig verschlechtern und eine Bestimmung der Strukturlinien verhindern. Bisherige Analysen der erzielten Genauigkeit und Zuverlässigkeit zeigen, dass die Fehlklassifikationsrate sehr gering ist, sofern eine Trennbarkeit der Klassen anhand der Merkmale gegeben ist (BRZANK, 2008). Ebenfalls können die Strukturlinien mit hoher Genauigkeit abgeleitet werden, wenn die impliziten Modellannahmen hinreichend erfüllt sind.

Beide Methoden besitzen weiterhin Verbesserungspotentiale, welche eine noch höhere Genauigkeit und Zuverlässigkeit ermöglichen. So sind die Unterschiede im Rahmen der Klassifikation von Wasser und Watt hinsichtlich der Ausprägung der Merkmale Intensität und 2D-Punktdichte zwischen Wasser und Watt häufig nicht signifikant. In diesen Fällen beruht die Unterscheidung nur auf der Höhe. Zusätzliche Merkmale könnten die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Klassifikation steigern. Das sind zum einen Merkmale, die sich analog zu den bisher verwendeten physikalisch begründbar zwischen beiden Klassen unterscheiden sollten. Denkbar sind beispielsweise Texturmerkmale der Höhenwerte, die insbesondere eine Identifikation von Punkten in Wellenbereichen verbessern könnten. Zum anderen sind Merkmale einsetzbar, die sich zwar zwischen beiden Klassen nicht signifikant unterscheiden aber die Bestimmung der Land-Wasser-Grenze exakter ermöglichen. Erste Tests wurden diesbezüglich mit einem Punktdichtequotienten durchgeführt. Dieser wird aus der maximalen und minimalen 2D-Punktdichte durch Drehung eines Kreisstücks um den jeweiligen Laserpunkt gebildet. Unter der Annahme, dass im Wasser die 2D-Punktdichte signifikant geringer als im Watt ist, erreicht der Quotient an der Land-Wasser-Grenze signifikant größere Werte als innerhalb einer Klasse. Eine weitere Steigerung der Klassifikationsgüte kann durch Integration parallel erhobener optischer Daten erreicht werden. Dazu könnten die einzelnen Farbkanäle als weitere Merkmale in die Methode einfließen, die bei entsprechender Signifikanz für die Berechnung des Gesamtzugehörigkeitsgrades verwendet werden. Der so erweiterte Algorithmus wäre in der Lage, sowohl Laserdaten alleine als auch im Verbund mit optischen Daten zu klassifizieren.

Innerhalb der Strukturlinienextraktion sind insbesondere die Gewinnung der Näherungslösung als auch die Erstellung der Umringe wichtige Elemente, die bei einer Erweiterung des Ansatzes berücksichtigt werden müssen. In beiden Bereichen ist bisher ein interaktives Eingreifen notwendig. So erhält man als Ergebnis des eingesetzten Kantenoperators

häufig nur Teilstücke zusammengehörender Mittelachsen, die nachfolgend manuell verbunden werden müssen. Der Umring muss ebenfalls häufig per Hand digitalisiert werden, um keine Punkte in der Flächenrekonstruktion zu berücksichtigen, die nicht zur Strukturlinienumgebung zählen. Die Integration von neuen Verfahren eröffnet die Möglichkeit, die Extraktion nicht mehr semi-automatisch sondern vollständig ohne manuelle Eingriffe ablaufen zu lassen. Denkbar ist die Verwendung eines Linienverknüpfungsalgorithmus basierend auf den Ausprägungen der extrahierten Teilstücke (wie zum Beispiel: Richtung, Länge, räumliche Nachbarschaft) sowie dem zugrunde liegenden DGM. Die automatische Umringgengenerierung könnte auf der Analyse der räumlichen Nachbarschaft angrenzender Mittelachsen sowie der Übereinstimmung der an den Umringrändern befindlichen Stützpunkte zur angesetzten Oberflächenform beruhen.

5. D a n k s a g u n g

Diese Untersuchungen wurden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Projektnummer 03KIS050 gefördert. Zusätzlich bedanken wir uns bei unseren Projektpartnern: dem Amt für ländliche Räume Husum (ALR), der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest (WSD) und dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz Norden-Norderney (NLWKN) für die fachliche und infrastrukturelle Unterstützung.

6. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- AARUP, T.: Transparency of the North Sea and Baltic Sea – a Secchi depth data mining study. *Oceanologia*, Vol. 44 (3), 2002.
- BALTSAVIAS, E.: Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54 (2–3), 1999.
- BRIESE, C.: Breakline modelling from airborne laser scanner data. Dissertation, TU Wien, 2004.
- BRÜGELMANN, R.: Automatic breakline detection from airborne laser range data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIII, B3, Amsterdam, 2000.
- BRZANK, A.: Automatische Ableitung von Bruchlinien aus Laserscannerdaten. Diplomarbeit, TU Dresden, unveröffentlicht, 2001.
- BRZANK, A.: Bestimmung Digitaler Geländemodelle in Wattgebieten aus Laserscannerdaten. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2008.
- BRZANK, A. and HEIPKE, C.: Classification of Lidar Data into water and land points in coastal areas. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI/3, Bonn, 2006.
- IRISH, J. L. and LILLYCROP, W. J.: Scanning laser mapping of the coastal zone: the SHOALS system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54 (2–3), 1999.
- JANZA, F. J.: *Manual of Remote Sensing – Theory, Instruments and Techniques*, The American Society of Photogrammetry, 1975.
- KRAUS, K.: *Photogrammetrie – Topographische Informationssysteme*, Band 3. Dümmler, 2000.
- KRAUS, K. and PFEIFER, N.: Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 53 (4), 1998.
- KRAUS, K. and PFEIFER, N.: Advanced DTM generation from LIDAR data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXIV, 3/W4, Annapolis, Maryland, 2001.
- KUCHLING, H.: *Taschenbuch der Physik*, Median-Verlag, 2004.
- NALWA, V. S. and BINFORD, T. O.: On Detecting Edges. *IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 8 (6), 1986.

- NIEMEIER, W.: Ausgleichsrechnung – Eine Einführung für Studierende und Praktiker des Vermessungs- und Geoinformationswesens. De Gruyter, 2002.
- PRANDLE, D.; HARGREAVES, J. C.; MCMANUS, J. P.; CAMPBELL, A. R.; DUWE, K.; LANE, A.; MAHNKE, P.; SHIMWELL, S. and WOLF, J.: Tide, wave and suspended sediment modelling on an open coast – Holderness. Coastal Engineering Vol. 41 (1–3), 2000.
- SHEWCHUK, J. R.: Delaunay Refinement Mesh Generation. Dissertation, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 1997.
- ZISSIS, G. J.: The Infrared and Elctro-Optical Systems Handbook. Vol. 1, Sources of Radiation. Enviromental Research Institute of Michigan, 1993.